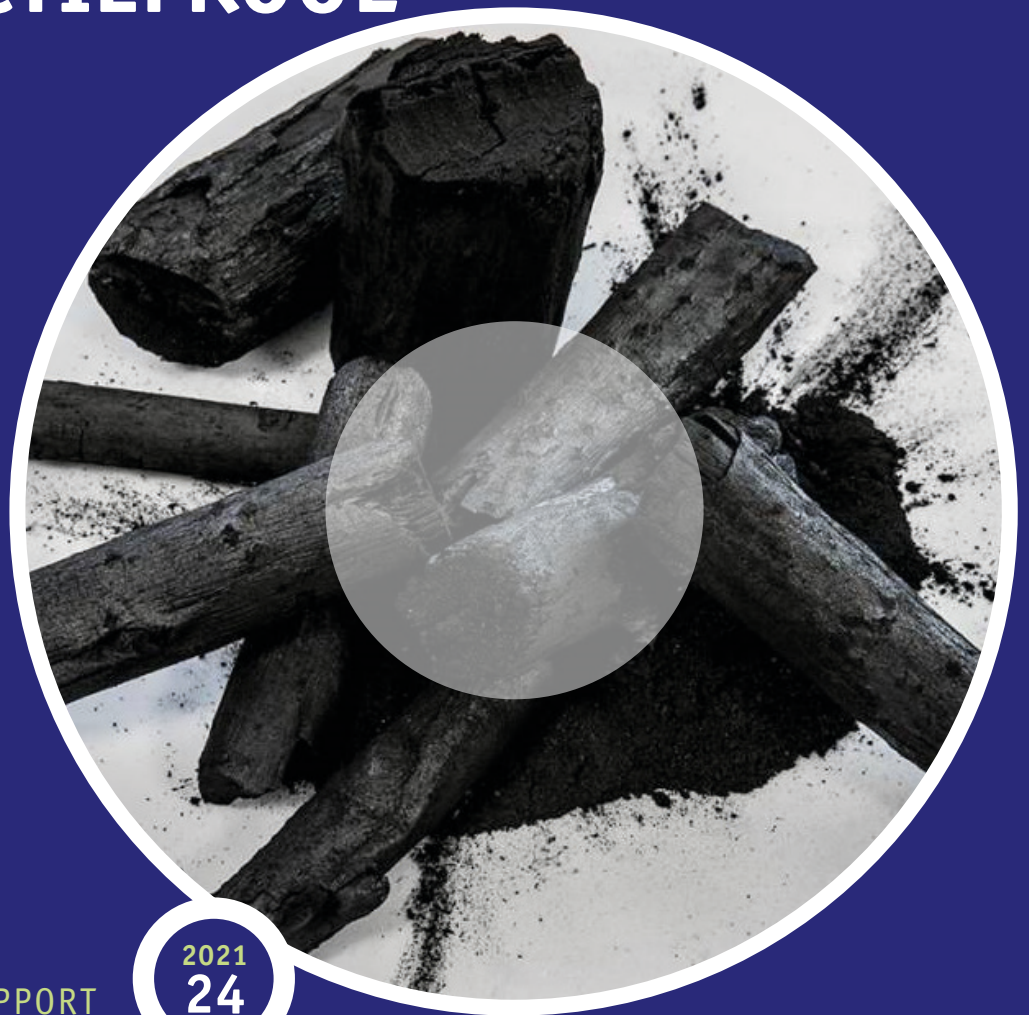




Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat

**stowa**

# LABORATORIUM TESTEN DUURZAME ALTERNATIEVEN ACTIEFKOOL



RAPPORT

2021  
24

LABORATORIUM TESTEN DUURZAME  
ALTERNATIEVEN ACTIEFKOOL

**RAPPORT**

2021

**24**

ISBN 978.90.5773.935.4



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Joost van den Bulk (TAUW)  
Amber Vergnes (TAUW)  
Herman Evenblij (Royal HaskoningDHV)  
Anna Veldhoen (Witteveen+Bos)  
Bernard Bos (Witteveen+Bos)  
Els Schuman (LeAF)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Annemarie Kramer (Waterschap Rijn en IJssel)  
Ruud Schemen (Waterschap de Dommel)  
Marlies Verhoeven (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)  
Manon Bechger (Waternet)  
Roberta Hofman Caris (KWR)  
Patricia Clevering-Loeffen (SWECO)  
Cora Uijterlinde (STOWA)  
Mirabella Mulder (Mirabella Mulder Waste Water Management)  
Gerard Rijs (RWS-WVL)  
Marijn van Son (Arcadis)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv  
STOWA STOWA 2021-24  
ISBN 978.90.5773.935.4

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

Uit STOWA 2020-19 is naar voren gekomen dat er kansrijke duurzame alternatieven zijn voor poederactiefkool uit steenkool/bruinkool. In deze studie is aanvullend laboratoriumonderzoek uitgevoerd om de praktische haalbaarheid van duurzame alternatieven te testen. Op basis van het laboratoriumonderzoek wordt geconcludeerd dat duurzame alternatieven gelijkwaardig, en in sommige gevallen zelfs beter, presteren dan poederactiefkool uit steenkool/bruinkool. Ook is aangetoond het mogelijk is om het PACAS-proces op kosteneffectieve wijze te verduurzamen door de inzet van niet-fossiel poederactiefkool. Duurzaam poederkool is daarmee klaar om in de praktijk te worden toegepast.

Het ministerie van IenW, de STOWA en de Nederlandse Waterschappen hebben gezamenlijk het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV) opgezet om de ontwikkeling van veelbelovende verwijderingstechnieken te versnellen. Doel is dat de waterschappen binnen vijf tot zeven jaar meer beproefde technieken tot hun beschikking hebben voor de verwijdering van microverontreinigingen. Het innovatieprogramma is onderverdeeld in vijf verschillende thema's, waaronder het thema 'Actief-Poederkool'.

In het kader van het thema 'Actief-Poederkool' is deze studie uitgevoerd naar duurzame alternatieven voor poederactiefkool (PAK) op basis van steenkool/bruinkool. Het reguliere poederactiefkool kan een grote invloed hebben op de duurzaamheidsaspecten van PACAS-toepassingen omdat het kool van fossiele herkomst is en niet geregenereerd kan worden.

In een laboratoriumonderzoek is het verwijderingsrendement op microverontreinigingen van verschillende duurzame PAK's vergeleken met de referentie PAK. Ook zijn de duurzaamheid en kosten van duurzame PAK's inzichtelijk gemaakt en zijn beschikbare organische reststromen voor de productie van duurzame PAK's geïdentificeerd.

Duurzame PAK's zijn nu klaar om de stap te zetten naar toepassing in een praktijkinstallatie.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

## AANLEIDING EN DOEL

In STOWA 2020-19 is voor het thema 'Actief-Poederkool' een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar duurzame alternatieven voor poederactiefkool (PAK) op basis van steenkool/bruinkool. Op basis van interviews met marktpartijen en experts en literatuuronderzoek zijn kenmerken van de duurzame PAK's geïnventariseerd waarna een shortlist is opgesteld met de 9 meest kansrijke duurzame PAK's. Uit het haalbaarheidsonderzoek kwam naar voren dat er kansrijke alternatieven bestaan voor PAK uit steenkool/bruinkool maar dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is om onder meer het verwijderingsrendement op microverontreinigingen vast te stellen. In onderliggende studie zijn de resultaten van dit aanvullende onderzoek beschreven. Er is een laboratoriumonderzoek uitgevoerd om het verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen vast stellen aan de hand van sorptietesten op rwzi-effluent. Verder is in deze studie de CO<sub>2</sub>-footprint van duurzame PAK's bepaald, zijn de kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van duurzaam PAK uitgewerkt voor een referentiesituatie van 100.000 i.e en zijn potentiële organische reststromen voor PAK-productie inzichtelijk gemaakt.

## LABORATORIUMTESTEN

Er zijn sorptietesten uitgevoerd met 9 geselecteerde duurzame poederkolen en 1 referentiekool, gebruikmakend van effluent van RWZI Horstermeer. Voor alle poederkolen was de toegepaste dosering 20 mg/l effluent. Alle 19 geanalyseerde microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaat-gidsstoffen) zijn boven de rapportagegrens aangetroffen in het effluent en dus alle gebruikt om de efficiëntie van de poederkolen voor de verwijdering van microverontreinigingen te bepalen en te vergelijken met de referentiekool. De resultaten laten het volgende zien:

- Voor *Puragen OxPure*, *Act&Sorb FibreCarb*<sup>®</sup> 110 <63 µm en *Chemviron Acticarbon* 2SW was de verwijdering van alle stoffen tenminste net zo hoog als die van de referentiekool. Voor enkele stoffen geldt dat het verwijderingsrendement zelfs net iets hoger was dan voor de referentiekool. Deze kolen zijn dus tenminste net zo effectief in de verwijdering van deze 19 microverontreinigingen uit RWZI effluent als de referentiekool.
- Het gemiddelde verwijderingsrendement met de kolen *Jacobi Aquasorb G9* en *Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300* is met 84% en 82% respectievelijk iets lager dan die van de referentiekool (86%). Voor maximaal vier stoffen was er een verschil in verwijderingsrendement, maar dit verschil was niet groter dan 20%-punt. De effectiviteit van deze kolen is dus voor enkele stoffen iets lager, maar over het algemeen is het redelijk goed vergelijkbaar met de referentiekool.
- De verwijdering met de andere vier kolen is lager dan de referentiekool, met name voor bepaalde individuele stoffen. Voor *CarboTech PAK C 1000C* was het gemiddelde rendement van de 19 stoffen 77%, voor *PYREG* kool was dit 75%, voor *Desotec Organosorb 200-1 WB* was dit 63% en het rendement met het geactiveerde zeefgoed was gemiddeld over de 19 stoffen 50%. De effectiviteit van deze kolen is dus duidelijk lager dan de referentiekool, de mate waarin verschilt per type kool. Hierbij wordt opgemerkt dat de *PYREG* en zeefgoed kolen afkomstig zijn uit een nieuw proces. De productie van deze actiefkool is niet geoptimaliseerd, wellicht dat er nog optimalisaties mogelijk zijn die leiden tot beter adsorptiegedrag. Het verdient aanbeveling om eventueel in samenwerking met een koolleverancier hier nader onderzoek naar te doen.

De resultaten zijn weergegeven in navolgende tabel.

TABEL 1.1 GEMIDDELDE VERWIJDERING VAN DE 19 GIDSSTOFFEN PER POEDERKOOL BIJ EEN DOSERING VAN 20 MG PAK/L

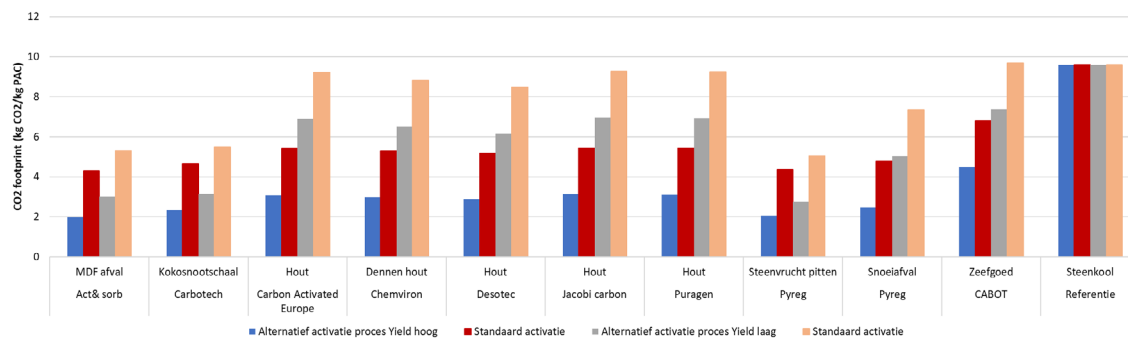
Nr.	Poederkool	Gemiddelde rendement over alle 19 stoffen (gidsstoffen en kandidaatstoffen)	Gemiddelde rendement over de 11 gidsstoffen	Aantal stoffen dat meer of minder presteert dan referentie (meer / minder)
0	Blanco zonder poederkool	0%	0%	n.v.t.
1	Referentie	86%	93%	n.v.t.
2	Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 um	90%	95%	3 / 0
3	CarboTech PAK C 1000 C	77%	84%	0 / 6
4	Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300	82%	89%	0 / 4
5	Chemviron Acticarbon 25W	87%	94%	2 / 0
6	Desotec Organosorb 200-1 WB	63%	72%	0 / 12
7	Jacobi Aquasorb G9	84%	90%	0 / 2
8	Puragen OxPure	90%	96%	4 / 0
9	Pyreg	75%	83%	0 / 8
10	geactiveerd zeefgoed Wilp	50%	57%	0 / 18

### CO<sub>2</sub> FOOTPRINT VAN NIET-FOSSIELE PAK'S

De CO<sub>2</sub>-footprint van niet-fossiele PAK's is bepaald door de GER-waarde (gross energy requirement) van de verschillende typen PAK te bepalen en deze vervolgens om te rekenen naar een CO<sub>2</sub>-footprint. Hierbij zijn de verschillende stappen van grondstof tot en met transport naar de zuivering meegenomen.

Uit onderstaand figuur kan worden afgeleid dat de CO<sub>2</sub>-footprint voor alle PAK's uit niet fossiele bron even hoog of lager is dan PAK op basis van steenkool. PAK op basis van MDF-afval, kokosschalen en steenvruchtpitten scoort hierbij het beste als gevolg van de hogere yield en drogestofgehalte. Daarnaast is afgaand op de berekening die Act&Sorb heeft laten uitvoeren, door een alternatief productieproces een nog lagere CO<sub>2</sub>-footprint te behalen.

FIGUUR 1.1 EFFECT VAN BEIDE GEVOELIGHEIDSANALYSES OP CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT



Een gevoeligheidsanalyse op basis van yield laat zien dat er voldoende rendement behaald moet worden om de CO<sub>2</sub>-footprint laag te houden. De yield en het drogestofgehalte zijn daarin de belangrijkste parameters. Met andere woorden: de input aan energie en grondstof om van deze niet-fossiele grondstof PAK te maken mag niet te hoog zijn. Als de carbonisatie en activatie op duurzame wijze kunnen worden uitgevoerd met een minimale CO<sub>2</sub>-footprint (bijvoorbeeld door het gebruik van hernieuwbare energie of restwarmte) kan de CO<sub>2</sub>-footprint verder worden gereduceerd.

**VERTALING NAAR 100.000 I.E. ZUIVERING**

Navolgend is de vertaling gemaakt naar toepassing van de onderzochte niet-fossiele PAK's op een rwzi van 100.000 i.e. Hiermee kunnen de resulterende kosten en de jaarlijkse uitstoot van niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> bepaald worden.

In onderstaande tabel is berekend wat de kosten zijn bij de bepaalde doseringen. Te zien is dat de kosten van PAK C 1000 C van CarboTech en van Act&Sorb gelijk uitvallen met die van de referentie PAK (4,6 cent per m<sup>3</sup>) en dat de kosten van MAR 300 met 4,2 cent per m<sup>3</sup> lager uitvallen dan de referentiekool.

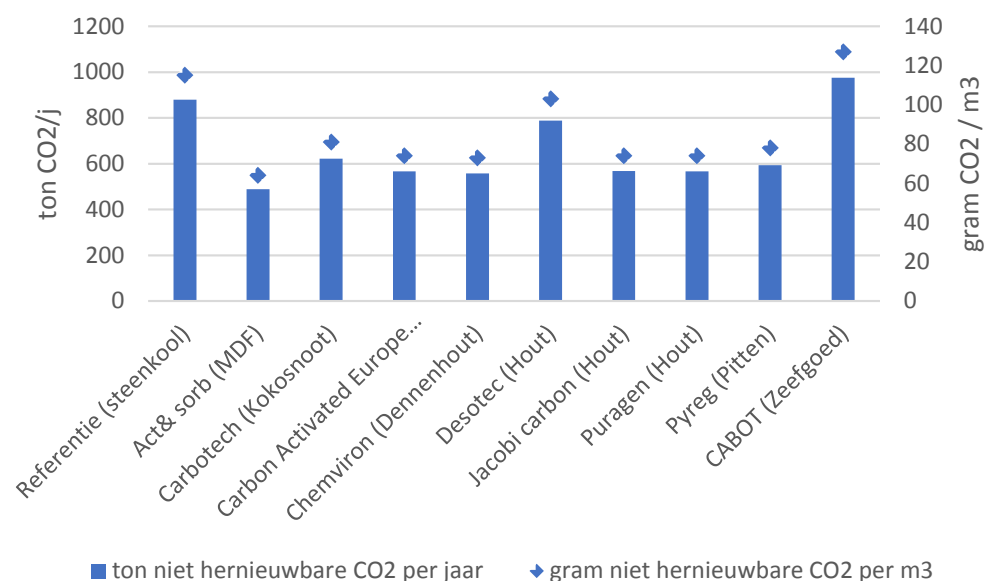
**TABEL 1.2** KOSTEN PER BEHANDELDE KUBIEKE METER AFVALWATER BIJ TOEPASSING VAN KOOL VAN NIET FOSSIELE HERKOMST; VAN DE NIET GENOEMDE KOLEN ZIJN DE KOSTEN NIET BEKEND

PAK	PAC prijs €/ton*	Dosering g/m <sup>3</sup>	Kosten €/m <sup>3</sup>
Referentiekool (Pulsorb WP235)	€ 1.950	15	4,6
Act&Sorb	>€ 2.000	15	>4,6
PAK C 1000 C (CarboTech)	€1.410	20	4,6
Jacobi	€ 2.500	15	5,3
MAR-300	€ 1.600	15	4,2

\* bron: STOWA 2020-19

In onderstaand figuur is weergegeven hoeveel niet-hernieuwbare CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten, alleen als gevolg van toepassing van de PAK. Dit is berekend voor een rwzi van 100.000 ie, met de doseringen zoals in het voorgaande bepaald. Hieruit blijkt dat de CO<sub>2</sub> footprint daalt (in vergelijking met de poederkool uit steenkool) voor alle kolen met niet-fossiele herkomst, met uitzondering van de kool uit zeefgoed. Van de geteste kolen geeft de kool uit MDF de grootste verbetering, een 44% lagere CO<sub>2</sub> uitstoot. De PAK uit zeefgoed heeft met 976 ton CO<sub>2</sub> per jaar 11% meer uitstoot van CO<sub>2</sub> dan de steenkool gebaseerde PAK. Dit wordt veroorzaakt doordat er van de zeefgoed kool relatief meer gedoseerd moet worden om tot een gelijk verwijderingsrendement te komen als de overige kolen.

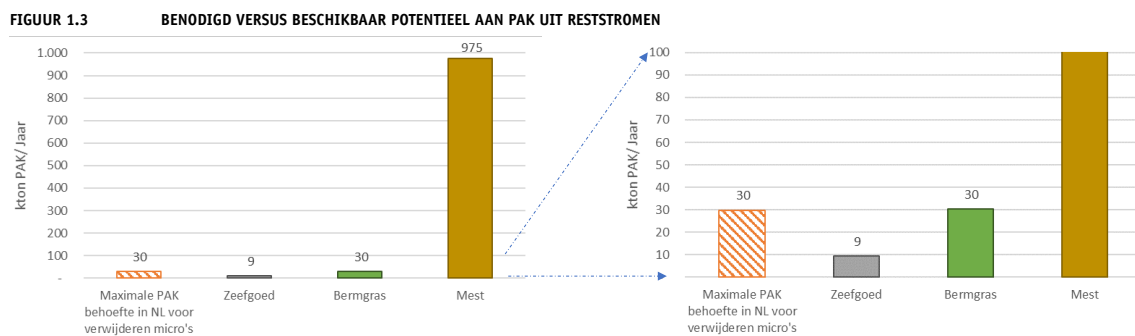
**FIGUUR 1.2** BEREKENDE JAARLIJKSE TOENAME VAN DE UITSTOOT VAN NIET HERNIEUWBARE CO<sub>2</sub>, ALS GEVOLG VAN TOEPASSING VAN POEDERKOOLEN VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, BIJ DE DOSERINGEN ZOALS BEPAALD IN TABEL 4.3, VOOR EEN RWZI VAN 100.000 IE. (EXCLUSIEF ENERGIE, MATERIAAL EN SLIBEINDVERWERKING) YIELD: 20%; ACTIVATIE-ENERGIE VOLGENS STOWA-2012-06



## BESCHIKBAARHEID ORGANISCHE RESTSTROMEN

In deze studie is de potentiële beschikbaarheid van organische reststromen in Nederland in kaart gebracht. De kwaliteit van de reststromen, de geschiktheid voor opwaardering tot poederkool en de effectiviteit van de geproduceerde poederkool is niet verkend. Zo is bermgras ruim beschikbaar maar vereisen de schommelingen over de seizoenen, transportafstanden, variërende samenstelling en de noodzaak tot drogen een complexe en kostbare logistiek. En daarnaast moet de opwerking naar poederkool en de effectiviteit voor de verwijdering van gidsstoffen nog worden vastgesteld. Mest bevat zware metalen wat de toepassing op rwzi's in de weg kan staan. Het voordeel van mest is dat het continue in grote hoeveelheden vrijkomt. Het opwerken van mest tot actiefkool kan als onderdeel van een toekomstige en duurzamere mestverwerking daarom interessant zijn. In een vervolgonderzoek moeten de kansen voor actiefkoolproductie uit mest verder worden verkend.

Los van de problemen die optreden bij de opwerking van organische reststromen tot actiefkool is aan de hand van omzettingsrendementen berekend hoeveel actiefkool theoretisch geproduceerd kan worden uit beschikbare organische reststromen. Dit is gedaan om inzicht te krijgen in het potentieel van de verschillen reststromen. Voor de reststromen zeefgoed, bermgras en mest zijn indicatieve omzettingsrendementen beschikbaar. Voor deze drie reststromen is de potentiële actiefkoolproductie in kaart gebracht Figuur 1.3. Ook de totale theoretische PAK behoefte voor de behandeling van al het Nederlandse afvalwater is in dit figuur opgenomen. Geconcludeerd wordt dat de beschikbare hoeveelheid mest in theorie meer dan voldoende groot is om het totale theoretische PAK verbruik voor de verwijdering van micro verontreinigingen te dekken. Bermgras kan in theorie in 100% van de PAK behoefte voorzien en zeefgoed in 30%.



## CONCLUSIES

Op basis van deze haalbaarheidsstudie zijn de prestaties van niet-fossiele PACAS samengevat en vergeleken met PACAS, O<sub>3</sub>+zandfiltratie en referentie GAK.

	Eenheid	PACAS	O <sub>3</sub> +ZF	GAK	PACAS niet-fossiel
CO <sub>2</sub> footprint	gram CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	115	128	325	64 – 127 *, **
Kosten	EUR / m <sup>3</sup>	0,046	0,17	0,26	0,042 – 0,058
Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W	%	70 – 75	80 – 85	80 – 85	70 – 75

\* op basis van Figuur 4.2 (hoge yield en inefficiënt activatieproces). Indien een lage yield of een efficiëntere activatie wordt gehanteerd valt de CO<sub>2</sub>-footprint hoger of lager uit

\*\* CO<sub>2</sub> footprint van commercieel beschikbaar niet-fossiele PAK's bedraagt 64 – 103 gram CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>. Zeefgoed PAK resulteert voor deze studie in een CO<sub>2</sub> uitstoot van 127 gram omdat deze PAK een laag verwijderingsrendement heeft waardoor er relatief veel gedoseerd moet worden

**De hoofdconclusie die op basis van deze studie wordt getrokken luidt: het is kosteneffectief mogelijk om het PACAS proces te verduurzamen door de inzet van niet-fossiele PAK.**



# DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

# LABORATORIUM TESTEN DUURZAME ALTERNATIEVEN ACTIEFKOOL

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	1
1.3	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>LABORATORIUM TESTEN</b>	<b>3</b>
2.1	Inleiding	3
2.2	Labtesten op rwzi effluent	3
2.3	Poederkolen	3
2.4	Uitvoering van de labtesten	4
2.5	Resultaten	5
2.6	Tussenconclusie adsorptietesten	7
<b>3</b>	<b>CO<sub>2</sub> FOOTPRINT VAN NIET-FOSSIELE PAK'S</b>	<b>8</b>
3.1	Inleiding	8
3.2	Aanpak CO <sub>2</sub> -footprint	8
3.3	Uitgangspunten	10
3.3.1	Grondstoffen	10
3.3.2	Transport naar productielocatie	12
3.3.3	Versnipperen grondstof	12
3.3.4	Drogen ruwe grondstof	12
3.3.5	Carbonisatie	12
3.3.6	Activatie	12
3.3.7	Transport van fabriek naar Nederland	13
3.3.8	Omrekenfactor GER-waarde - CO <sub>2</sub> -footprint	13
3.4	Resultaten	13
3.4.1	Referentiecasse	13
3.4.2	Gevoeligheidsanalyse yield	15
3.4.3	Gevoeligheidsanalyse activatie	16
3.5	Conclusie	16

<b>4</b>	<b>VERTALING NAAR 100.000 I.E. CASE</b>	<b>18</b>
4.1	Inleiding	18
4.2	Benodigde dosering voor het vereiste verwijderingsrendement	18
4.3	Kostenvergelijking	19
4.4	Duurzaamheidsvergelijking	20
<b>5</b>	<b>INVENTARISATIE RESTSTROMEN</b>	<b>23</b>
5.1	Inleiding	23
5.2	Bermgras	24
5.3	Zeefgoed	26
5.4	Overige reststromen	27
5.5	Resultaten	29
<b>6</b>	<b>CONCLUSIES</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>AANBEVELING EN VERVOLGONDERZOEK</b>	<b>35</b>
7.1	Aanbeveling	35
7.2	Vervolgonderzoek	35
	<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>37</b>
BIJLAGE 1	LABORATORIUM TESTEN	39
BIJLAGE 2	LEVERANCIERSINFORMATIE	49

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

Het ministerie van IenW, de STOWA en de Nederlandse Waterschappen hebben gezamenlijk het 'Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV)' opgezet om de ontwikkeling van veelbelovende verwijderingstechnieken te versnellen. Doel is dat de waterschappen binnen vijf tot zeven jaar meer beproefde technieken tot hun beschikking hebben voor de verwijdering van microverontreinigingen. Het innovatieprogramma is onderverdeeld in vijf verschillende thema's, waaronder het thema 'Actief-Poederkool'.

In een voorgaande fase is voor het thema 'Actief-Poederkool' een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar duurzame alternatieven voor poederactiefkool (PAK) op basis van steenkool/bruinkool. De resultaten hiervan zijn gepubliceerd in STOWA 2020-19. Op basis van interviews met marktpartijen en experts en literatuuronderzoek zijn kenmerken van de duurzame PAK's geïnventariseerd waarna een shortlist is opgesteld met de 9 meest kansrijke duurzame PAK's. Uit het haalbaarheidsonderzoek komt naar voren dat er kansrijke alternatieven bestaan voor PAK uit steenkool/bruinkool maar dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is.

Een aantal belangrijke kenmerken van de duurzame PAK's waren nog niet bekend, zoals het verwijderingsrendement op microverontreinigingen en de benodigde dosering. Om een vergelijking te kunnen maken tussen de PACAS referentiekool en duurzame PAK's zijn daarom laboratoriumtesten uitgevoerd. In deze rapportage worden de resultaten van dit vervolgonderzoek besproken. Op basis van laboratoriumonderzoek is verkend hoe de prestaties van duurzame PAK's zich verhouden tot de referentie PAK. Daarnaast zijn er analyses uitgevoerd en conclusies getrokken over de kosten en duurzaamheid van duurzame PAK's.

### 1.2 DOEL

Het doel van deze studie was om meer inzicht te krijgen in de geschiktheid van duurzame PAK's voor gebruik op de rioolwaterzuivering ten behoeve van microverontreiniging verwijdering. Hiertoe zijn een aantal deelonderwerpen onderzocht:

- Sorptietesten om voor een geselecteerd aantal duurzame PAK's het verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen vast te stellen op rwzi-effluent
- CO<sub>2</sub>-footprint van niet fossiele PAK
- Kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van niet fossiele PAK evalueren voor een referentiesituatie van 100.000 i.e.
- Inventariseren beschikbare organische reststromen voor PAK-productie in Nederland

Daarnaast was het op voorhand een doel om extra praktisch informatie op te halen door een aantal proefinstallaties in Duitsland te bezoeken. In verband met de maatregelen rondom COVID-19 ten tijde van dit onderzoek heeft dit niet kunnen plaatsvinden. Hierdoor zijn aandachtspunten uit de praktijk geen onderdeel van deze rapportage. Het is daarmee een kennishiaat die in een vervolgonderzoek verder uitgewerkt zou kunnen worden.

### **1.3 LEESWIJZER**

Deze rapportage beschrijft de resultaten van het onderzoek. De methode en resultaten van de laboratoriumtesten staan in hoofdstuk 2. Daarna gaat hoofdstuk 3 dieper in op de CO<sub>2</sub>-footprint van PAK op basis van duurzame grondstoffen. In hoofdstuk 4 worden de resultaten uit deze studie vertaald naar de referentiesituatie van 100.000 i.e. Vervolgens gaat hoofdstuk 5 in op de inventarisatie van organische reststromen. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken. Ten slotte gaat hoofdstuk 7 in op de kennishiaten en mogelijk vervolgonderzoek.

# 2

## LABORATORIUM TESTEN

### 2.1 INLEIDING

De kolen van niet fossiele herkomst worden gemaakt van niet fossiele grondstoffen, en dragen daarmee bij aan een duurzamere rioolwaterbehandeling. Daarnaast moeten de kolen van niet fossiele herkomst uiteraard wel in staat zijn om in voldoende mate microverontreinigingen uit afvalwater te verwijderen. Daarom is op labschaal de effectiviteit in verwijdering van microverontreinigingen getest. Deze testen zijn uitgevoerd door LeAF in Wageningen. De beschrijving van de labtesten is opgenomen in Bijlage 1. In dit hoofdstuk worden de resultaten samengevat.

### 2.2 LABTESTEN OP RWZI EFFLUENT

De effectiviteit van de verschillende kolen van niet fossiele herkomst is getest door middel van sorptietesten in rwzi effluent. Voor de testen is effluent van RWZI Horstermeer gebruikt. Er was ongeveer 22 L nodig en hiervoor zijn de 24-uursdebietsproportionele monsters van 22-1-2020 (4L), 25-1-2020 (9L), 26-1-2020 (9L) samengevoegd. Er is bemonsterd tijdens droogweeraanvoer. Bij aankomst op 27-1-2020 is het effluent gezeefd over een 50 µm zeef om enkele grove slibdeeltjes te verwijderen. De testen zijn ingezet op 27-1-2020 en 29-1-2020. Gedurende de tijd tussen aanlevering en start van de testen is het effluent bij 4°C bewaard. Het effluent is gekarakteriseerd op de concentratie microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaatgidsstoffen) en DOC. Alle microverontreinigingen zijn boven de rapportagegrens (RG) aangetroffen.

### 2.3 POEDERKOLEN

De geteste poederkolen zijn geselecteerd in de eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-19) waarbij op basis van de criteria duurzaamheid en kosten kansrijke poederkolen geselecteerd zijn. In Tabel 2.1 zijn de geteste poederkolen opgenomen. Twee kolen waren echter niet in poedervorm aangeleverd. Het PYREG kool was granulair en het geactiveerde zeefgoed bestond voornamelijk uit brokstukjes. Om de vergelijking met de andere kolen zo eerlijk mogelijk te houden zijn deze twee kolen vermalen met een vijzel en vervolgens gezeefd door een 200 µm zeef<sup>1</sup>, om eventueel grotere deeltjes er nog uit te halen.

1 Volgens richtlijnen van ASTM kunnen deeltjes die door een 80-mesh zeef (=177µm) komen geclassificeerd worden als poeder actiefkool (<https://www.astm.org/Standards/D5158.htm>).

TABEL 2.1

DE GETESTE KOLEN VAN NIET FOSSIELE HERKOMST

Naam van de kool	Leverancier	Grondstof van de kool
Referentie: Pulsorb WP 235	Chemviron	Steenkool blend
Act&Sorb product*	Act&Sorb	MDF afvalhout
PAK C 1000 C	CarboTech	kokosnootschil
MAR-300	Carbon Activated Europe	hernieuwbaar
Acticarbone 2SW	Chemviron	marine dennen hout
Organosorb 200-1 WB	Desotec	hout
Aquasorb G9	Jacobi carbon	hout
Oxpure 325W-12	Puragen	hout
PYREG kool	PYREG	steenvrucht pitten
Zeefgoed kool	Waterschappen	Zeefgoed uit afvalwater

\* Deze kool is nog niet volledig commercieel beschikbaar, naar verwachting is halverwege 2021 de eerste productie in werking, samples van de kool zijn al beschikbaar

## 2.4 UITVOERING VAN DE LABTESTEN

Bij PACAS met referentiekool (fossiele PAK) wordt over het algemeen een PAK dosering van 15 mg/l gehanteerd (STOWA 2018-02). In overleg met de STOWA begeleidingscommissie is voor de labtesten uitgegaan van een poederkooldosering van 20 mg/l. Er is voor deze relatief hoge dosering gekozen omdat voor (tenminste) een aantal kolen een lager rendement werd verwacht dan de referentiekool. Met deze hogere dosering kan naast de vergelijking met de referentiekool ook alvast worden bepaald of het rendement alsnog wel voldoende hoog kan zijn in het geval van toepassing van PACAS of nageschakelde poederkooldosering op de RWZI.

De testen zijn in triplo uitgevoerd in 0,5 L Schott flessen. In elke fles is 0,5 L RWZI effluent afgewogen en vervolgens is 10 mg PAK toegevoegd. Na het afwegen van de kool zijn de flessen weggezet bij kamertemperatuur in een end-over-end shaker (zie Figuur 2.1).

FIGUUR 2.1

END-OVER-END SHAKER (LINKS) EN TESTFLESSEN MET RWZI EFFLUENT (RECHTS)



De temperatuur van het effluent was gemiddeld 23°C. Na 24 uur zijn de flessen van de shaker gehaald. De inhoud is gefiltreerd over een 0,45 µm filter om de PAK te verwijderen en vervolgens zijn de monsters geanalyseerd op microverontreinigingen en DOC. Er is een blanco met alleen RWZI effluent (zonder poederkool) meegenomen (in triplo) om te controleren of de

waargenomen veranderingen in concentratie het gevolg zijn geweest van de toevoeging van de poederkool en niet van andere processen, zoals abiotische of biologische afbraak. De testen zijn uitgevoerd in twee series. In beide series is een blanco monster geanalyseerd op microverontreinigingen en DOC. Voor aanvang van elke serie is een RWZI effluent monster genomen voor analyse op microverontreinigingen en DOC.

## 2.5 RESULTATEN

De verwijderingsrendementen op de afzonderlijke (kandidaat) gidsstoffen zijn opgenomen in Bijlage 1. De gemiddelde verwijderingsrendementen per de verschillende duurzame PAK's zijn weergegeven in Tabel 2.2.

TABEL 2.2 GEMIDDELDE VERWIJDERING VAN DE 19 GIDSSTOFFEN PER POEDERKOOL BIJ EEN DOSERING VAN 20 MG PAK/L

Nr.	Poederkool	Gemiddelde rendement over alle 19 stoffen (gidsstoffen en kandidaatstoffen)	Gemiddelde rendement over de 11 gidsstoffen	Aantal stoffen dat meer of minder presteert dan referentie (meer / minder)
0	Blanco zonder poederkool	0%	0%	n.v.t.
1	Referentie	86%	93%	n.v.t.
2	Act&Sorb Fibre-Carb® 110 <63 µm	90%	95%	3 / 0
3	CarboTech PAK C 1000 C	77%	84%	0 / 6
4	Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300	82%	89%	0 / 4
5	Chemviron Acticarbon 25W	87%	94%	2 / 0
6	Desotec Organosorb 200-1 WB	63%	72%	0 / 12
7	Jacobi Aquasorb G9	84%	90%	0 / 2
8	Puragen OxPure	90%	96%	4 / 0
9	Pyreg	75%	83%	0 / 8
10	geactiveerd zeefgoed Wilp	50%	57%	0 / 18

### Referentiekool

De verwijderingsrendementen in de testen met de referentiekool zijn hoog, zoals ook verwacht werd bij een dosering van 20 mg/l. 14 stoffen zijn voor meer dan 90% verwijderd. De overige vijf stoffen zijn minder goed met PAK te verwijderen. Twee stoffen (diclofenac en irbesartan) zijn wel voor meer dan 70% verwijderd, sulfamethoxazol voor 44%, candesartan voor 32% en gabapentine voor slechts 16%. De gemiddelde verwijdering van alle 19 stoffen was 86%.

### Poederkool van niet fossiele herkomst

De 9 kolen van niet fossiele herkomst kunnen in 3 groepen worden ingedeeld.

Voor de kolen Puragen OxPure, Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 µm en Chemviron Acticarbon 25W geldt dat de verwijderingsrendementen tenminste even hoog zijn in vergelijking met de referentiekool. Voor enkele stoffen is het rendement zelfs net iets hoger (ong. 10-20%-punt hoger), zie Bijlage 1. Voor Jacobi Aquasorb G9 geldt dat het rendement over het algemeen vergelijkbaar is met de referentiekool, alleen voor twee stoffen ligt het rendement iets lager (ongeveer 20%-punt). Een vergelijkbaar beeld is waargenomen voor Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300, waarbij voor vier stoffen 10-20%-punt lager rendement is waargenomen.

Voor de overgebleven vier PAK is voor meer individuele stoffen een lager rendement ( $\geq 10\%$ ) waargenomen vergeleken met de referentiekool en is het verschil in rendement ten opzichte van de referentiekool voor sommige individuele stoffen ook groter.



Met CarboTec PAK C 1000 C ligt voor zes stoffen het verwijderingsrendement lager dan voor de referentiekool (voor 5 stoffen ligt het rendement 20-40%-punt lager, en voor 1 stof 60%-punt). Met PYREG kool is voor acht stoffen het rendement lager dan voor de referentiekool (van 10 tot ruim 40%-punt). Met Desotec Organosorb 200-1 WB is het rendement van 11 stoffen lager (10% tot ruim 60%-punt). Het laagste rendement is behaald met geactiveerd zeefgoed (voor 18 stoffen was een lager rendement waargenomen). Analyses door Cabot aan het geactiveerde zeefgoed laten zien dat dit kool een relatief hoog asgehalte heeft en een laag specifiek oppervlak (48% as, en een specifiek oppervlak van 240 m<sup>2</sup>/g). Dit kan het lagere rendement verklaren.

Over het algemeen volgt uit de resultaten dat er met name verschillen zijn tussen kolen voor stoffen die matig tot redelijk goed aan poederkool sorberen. Voor een stof als gabapentine geldt dat het met alle kolen zeer slecht wordt verwijderd, en dat er dus vrijwel geen verschil is tussen de kolen. Daarnaast zijn er microverontreinigingen met een hoge affiniteit voor PAK. Deze worden met veel kolen voor meer dan 90% verwijderd bij 20 mg PAK/l, zoals: benzotriazol, som 4- en 5methylbenzotriazol, amisulpride, citalopram, metoprolol en propranolol. In Tabel 2.3 zijn de verwijderingsrendementen voor de afzonderlijke PAK's opgenomen voor de 10 stoffen waar sprake was van de grootste variatie in de verwijdering. In het geval van candesartan is bijvoorbeeld te zien dat de verwijdering uiteen loopt van 5% voor zeefgoedkool tot 53% voor het Act en Sorb product. Wat verder opvalt is dat de producten van CarboTech, Desotec, PYREG en de zeefgoed kool voor het merendeel van de stoffen lagere verwijderingsrendementen opleveren dan de andere kolen.

TABEL 2.3 DE (INDICATOR)GIDSSTOFFEN MET DE GROOTSTE VARIATIE IN VERWIJDERINGSRENDEMENT

	Azitromycine	Candesartan	Carbamazepine	Clartromycine	Diclofenac	Furosemide	Hydrochloorthiazide	Irbesartan	Sotalol	Sulfamethoxazol
Blanco zonder poederkool	4%	3%	1%	4%	4%	-1%	6%	10%	-6%	-6%
Referentie	98%	32%	100%	100%	87%	100%	100%	74%	96%	44%
Act&Sorb FibreCarb® 110	100%	53%	100%	100%	95%	100%	100%	90%	98%	63%
CarboTech PAK C 1000 C	68%	13%	98%	36%	70%	100%	100%	35%	97%	27%
Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300	93%	21%	98%	76%	87%	100%	100%	61%	96%	27%
Chemviron Acticarbon 2SW	100%	45%	98%	100%	87%	94%	100%	90%	98%	50%
Desotec Organosorb 200-1 WB	54%	8%	82%	36%	35%	41%	82%	23%	83%	-2%
Jacobi Aquasorb G9	100%	35%	97%	100%	81%	78%	95%	81%	97%	28%
Puragen OxPure	100%	47%	100%	100%	99%	100%	100%	95%	99%	61%
PYREG	95%	18%	89%	84%	55%	56%	83%	49%	92%	18%
geactiveerd zeefgoed Wilp	71%	5%	47%	60%	22%	11%	42%	27%	42%	-1%

#### Blanco

Met de blanco bepaling is gecontroleerd of er geen andere verwijdering van de microverontreinigingen dan sorptie aan PAK plaats heeft gevonden (bijv. biologische afbraak). Uit de resultaten volgt dat er geen tot zeer weinig afname heeft plaatsgevonden in de blanco's. De gemiddelde verwijdering van de 19 stoffen in de blanco's is 0% (dus geen afname), en is maximaal 10%, in het geval van irbesartan.

## 2.6 TUSSENCONCLUSIE ADSORPTIETESTEN

Er zijn sorptietesten uitgevoerd met 9 geselecteerde duurzame poederkolen en 1 referentiekool, gebruikmakend van effluent van RWZI Horstermeer. Voor alle poederkolen was de toegepaste dosering 20 mg/l effluent. Alle 19 geanalyseerde microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaat-gidsstoffen) zijn boven de rapportagegrens aangetroffen in het effluent en dus alle gebruikt om de efficiëntie van de poederkolen voor de verwijdering van microverontreinigingen te bepalen en te vergelijken met de referentiekool. De resultaten laten het volgende zien:

- Voor *Puragen OxPure*, *Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 µm* en *Chemviron Acticarbon 2SW* was de verwijdering van alle stoffen tenminste net zo hoog als die van de referentiekool. Voor enkele stoffen geldt dat het verwijderingsrendement zelfs net iets hoger was dan voor de referentiekool. Deze kolen zijn dus tenminste net zo effectief in de verwijdering van deze 19 microverontreinigingen uit RWZI effluent als de referentiekool.
- Het gemiddelde verwijderingsrendement met de kolen *Jacobi Aquasorb G9* en *Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300* is met 84% en 82% respectievelijk iets lager dan die van de referentiekool (86%). Voor maximaal vier stoffen was er een verschil in verwijderingsrendement, maar dit verschil was niet groter dan 20%-punt. De effectiviteit van deze kolen is dus voor enkele stoffen iets lager, maar over het algemeen is het redelijk goed vergelijkbaar met de referentiekool.
- De verwijdering met de andere vier kolen is lager dan de referentiekool, met name voor bepaalde individuele stoffen. Voor *CarboTech PAK C 1000C* was het gemiddelde rendement van de 19 stoffen 77%, voor *PYREG* kool was dit 75%, voor *Desotec Organosorb 200-1 WB* was dit 63% en het rendement met het geactiveerde zeefgoed was gemiddeld over de 19 stoffen 50%. De effectiviteit van deze kolen is dus duidelijk lager dan de referentiekool, de mate waarin verschilt per type kool. Hierbij wordt opgemerkt dat de *PYREG* en zeefgoed kolen afkomstig zijn uit een nieuw proces. De productie van deze *PAK* is niet geoptimaliseerd, wellicht dat er nog optimalisaties mogelijk zijn die leiden tot beter adsorptiegedrag. Het verdient aanbeveling om eventueel in samenwerking met een koolleverancier hier nader onderzoek naar te doen.

# 3

## CO<sub>2</sub> FOOTPRINT VAN NIET-FOSSIELE PAK'S

### 3.1 INLEIDING

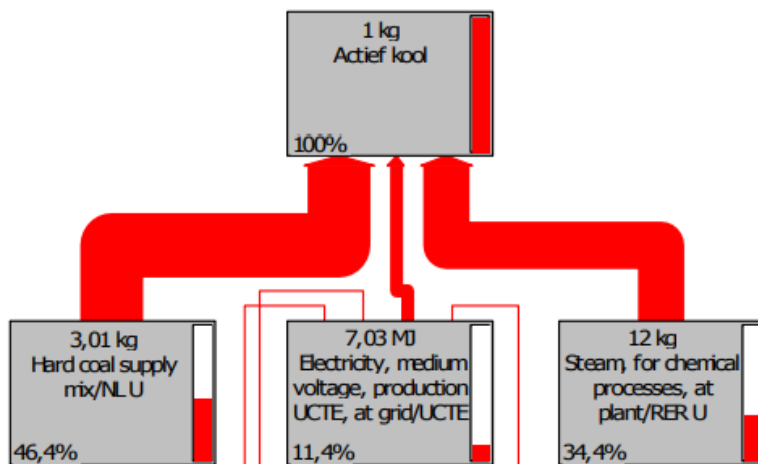
In dit hoofdstuk worden de werkwijze en de resultaten beschreven van de uitgevoerde CO<sub>2</sub>-footprintanalyse van verschillende niet-fossiele PAK's. De CO<sub>2</sub>-footprint dient hierbij als maat voor de duurzaamheid van de verschillende alternatieven.

### 3.2 AANPAK CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT

De CO<sub>2</sub>-footprint is bepaald door eerst de totale hoeveelheid primaire energie te bepalen die nodig is voor de productie van PAK. De totale hoeveelheid primaire energie wordt uitgedrukt in de GER-waarde (gross energy requirement) welke vervolgens omgerekend wordt naar een CO<sub>2</sub>-footprint. Hierbij zijn de verschillende stappen van het winnen van de grondstof tot en met transport naar de zuivering meegenomen.

Voor het bepalen van de GER-waarde is gebruik gemaakt van een vergelijkbare netwerkanalyse als in STOWA 2012-06 (STOWA, GER-waarden en milieuimpactscores productie van hulpstoffen in de waterketen, STOWA-rapport 2012-06, 2012), zie Figuur 3.1. De in dat rapport gepresenteerde opbouw van de GER-waarde is gehanteerd als referentie voor de niet fossiele PAK soorten. Op hoofdlijnen bestaat de GER-waarde uit drie componenten: grondstof, elektriciteit voor het productieproces en stoom voor het productieproces. Bij het bepalen van de GER-waarde voor niet-fossiele PAK is aangenomen dat de benodigde elektriciteit en stoom per kg PAK gelijk blijft aan het proces voor PAK op basis van steenkool. In overeenstemming met STOWA 2012-06 is de GER-waarde opgedeeld in een deel hernieuwbaar en een deel niet-hernieuwbaar. Hernieuwbaar betreft hier energie die afkomstig is van onuitputtelijke bronnen zoals wind en zon terwijl niet-hernieuwbaar de energie betreft die tot uitputting van bronnen leidt.

FIGUUR 3.1 TOP VAN NETWERKANALYSE VOOR ACTIEFKOOL OP STEENKOOI BASIS UIT STOWA 2012-06 EN BASIS VOOR DE UITGEVOERDE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT ANALYSE



Om de juiste uitgangspunten te verkrijgen voor gedegen analyse is contact opgenomen met de leveranciers van alle geselecteerde niet-fossiele PAK's. Hierbij bleek echter dat niet alle benodigde informatie beschikbaar was. Op basis van de beschikbare leveranciersinformatie is daardoor geen gedetailleerde GER-waarde te bepalen voor het carboniseren en activeren. De gehanteerde aanname houdt dus nog geen rekening met eventuele verduurzaming in het productieproces door bijvoorbeeld warmtewinning of een WKK. Gezien het grote aandeel van elektriciteit en stoom valt hier zeker winst te boeken. Ook was niet in alle gevallen duidelijk wat de opbrengst (yield) van een grondstof was: hoeveel grondstof is nodig om 1 kg PAK te produceren. De resultaten van de GER-berekening en CO<sub>2</sub>-footprintanalyse geven daarmee een goede indicatie van de duurzaamheid van de types PAK, maar kunnen afwijken van de daadwerkelijke waarde. Voor twee parameters is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd: yield (kg PAK/kg ds grondstof) en activatieproces (kg stoom/kg PAK) om het effect van een andere inputwaarde voor deze parameters inzichtelijk te maken.

#### **LEVERANCIERSINFORMATIE**

*Bij het bepalen van de CO<sub>2</sub>-footprint is veelvuldig contact geweest met leveranciers van niet-fossiele PAK. Informatie over het productieproces is veelal vertrouwelijk en werd daarom niet verstrekt of niet vrijgegeven voor publicatie. De berekende waarden op basis van STOWA 2012-06 hebben wij ter bevestiging voorgelegd aan de leveranciers. Inhoudelijke reacties, voor zover beschikbaar, zijn toegevoegd in Bijlage 2. Enkele leveranciers geven aan dat de uitkomsten moeilijk te beoordelen zijn, omdat er geen standaarden bestaan voor een dergelijke analyse. Leverancier Act&Sorb heeft als enige een door een externe partij onderbouwde berekening van de CO<sub>2</sub>-footprint van zijn PAK aangeleverd. De hierin berekende waarde wordt besproken in paragraaf 3.4.*

De systeemgrenzen zijn zo gedefinieerd dat er een “cradle to gate” analyse is uitgevoerd. “Gate” is in het geval van STOWA 2012-06 de fabriekspoort. In het geval van de niet fossiele-PAK is ook het transport van de fabriek naar de zuivering meegenomen, omdat er grote verschillen zijn tussen de productielocaties van de verschillende PAK-soorten. De gehele keten is opgedeeld in de volgende stappen:

- Transport van grondstof naar productielocatie;
- Versnipperen van ruwe grondstof;
- Drogen van ruwe grondstof;
- Carbonisatie;
- Activatie;
- Transport van fabriek naar toepassingslocatie in Nederland.

Naast de verwerkingsstappen is de energetische waarde van de grondstof onderdeel van de GER-waarde. In het geval van actiefkool uit niet-fossiele bronnen, is het aandeel van de grondstof in de GER-waarde (grotendeels) hernieuwbaar, zoals toegelicht in paragraaf 4.3.1. Het hernieuwbare deel wordt niet meegerekend in de CO<sub>2</sub>-footprint.

De uitgangspunten en aannames per stap in de “cradle to gate” keten worden in de volgende paragrafen behandeld.

### 3.3 UITGANGSPUNTEN

In deze paragraaf worden de uitgangspunten voor de verschillende kolen en processtappen weergegeven en toegelicht.

#### 3.3.1 GRONDSTOFFEN

Tabel 3.1 presenteert de belangrijkste eigenschappen van de grondstoffen van de verschillende niet-fossiele PAKs die in hoofdstuk 2 getest zijn. Een uitzondering hierop is Pyreg PAK op basis van snoeiafval. Deze PAK was ten tijde van de proeven niet beschikbaar. Dat is jammer omdat snoeiafval in Nederland meer beschikbaar is dan pitten van steenvruchten. Om toch een CO<sub>2</sub> vergelijking te kunnen maken tussen Pyreg PAK op basis van pitten van steenvruchten en op basis van snoeiafval is aan de tabel eveneens een Pyreg PAK op basis van snoeiafval toegevoegd.

De yield is de opbrengst per grondstof: hoeveel kilogram PAK er kan worden geproduceerd uit 1 kg drogestof van de grondstof. De yield is gebaseerd op de opgave van verschillende leveranciers. Zij geven vaak geen vaste waarde op, maar een range waarbinnen de opbrengst fluctueert. De volgende waarden zijn gehanteerd voor de yield:

- 0,05 tot 0,2 kg PAK/kg ds voor houtige bronnen. De daadwerkelijke yield is afhankelijk van het type hout en vastlegging van koolstof. Deze range is gehanteerd voor alle PAK-soorten op basis van hout en MDF
- 0,05 tot 0,2 kg PAK/kg ds voor snoeiafval en steenvruchtpitten. Voor een goed geactiveerd product moet 0,05 tot 0,1 kg PAK/kg ds worden aangenomen (Rensmann, 2020)
- 0,05 tot 0,12 kg PAK/kg ds voor kokosnootschaal, op basis van leveranciersopgaves en literatuur;
- 0,05 tot 0,10 kg PAK/kg ds voor zeefgoed, op basis van de eenmalig uitgevoerde activatie van zeefgoed van de pilot van waterfabriek Wilp.

Het drogestofgehalte (ds-gehalte) is de hoeveelheid drogestof per kilogram ruwe grondstof. Dit is van belang om te bepalen hoeveel energie er nodig is om het aanwezige vocht te verdampen in een droogstap of tijdens de carbonisatie.

De GER-waarde van de grondstof zelf bestaat uit een hernieuwbaar deel en vaak een klein niet-hernieuwbaar deel (voor het verbouwen en oogsten van de grondstof). Dit wordt onder de tabel verder toegelicht.

TABEL 3.1 UITGANGSPUNTEN NIET FOSSIELE PAK SOORTEN

PAK	Grondstof	PAK Yield hoog (g ds/g ds)	PAK Yield laag (g ds/g ds)	ds voor drogen (% ds)	GER grondstof hernieuwbaar (MJ/kg)	GER grondstof totaal (MJ/kg)
Act&Sorb	MDF afval	0,2	0,05	92 (MDF-info, 2020)	31	31 (RVO, 2018)
CarboTech (PAK C 1000 C)	Kokosnoot-schaal	0,12 (FAO, 2020)	0,05	91 (Arena, 2016)	21	21 (Rashid, 2016)
Carbon Activated Europe (MAR-300)	Hout	0,2	0,05	80 *	36	39 (RVO, 2018)
Chemviron (Acticarbone 2Sw)	Dennenhout	0,2	0,05	80*	45	48 (RVO, 2018)
Desotec (Organosorb 200-1 WB)	Hout	0,2	0,05	80*	36	39 (RVO, 2018)
Jacobi Carbon (Aquasorb G9)	Hout	0,2	0,05	80*	36	39 (RVO, 2018)
Puragen (Oxpure 325W-10)	Hout	0,2	0,05	80*	36	39 (RVO, 2018)
Pyreg **	Pitten van steenvruchten	0,2	0,05	85 (range 85-90) (Innoliva, 2020) (Teresa Miranda, 2008)	19	19 (Cappelletti, 2014)
Pyreg ****	Snoeiafval	0,1	0,05	50 (centre, 2020)	36	36 (RVO, 2018)
CABOT***	Zeefgoed	0,1	0,05	40	17	17 (STOWA, Vezelgrondstof uit zeefgoed, rapport 2013-21, 2013)
Referentie: Chemviron (Pulsorb WP 235)	Steenkool	0,33	0,33	-	0,5	32,6 (RVO, 2018)

\* Aanneمة voor licht gedroogd hout op basis van (centre, 2020) bij gebrek aan leveranciersinformatie

\*\* Het proces van Pyreg is nog volop in ontwikkeling. Door voortschrijdend inzicht zijn gedurende de looptijd van dit project nieuwe waarden aangeleverd voor het drogestofgehalte (95%) en yield (0,05-0,10 g ds/g ds). Dit beïnvloedt de exacte waarde van de CO<sub>2</sub>-footprint van dit type actiefkool, maar verandert de ordegröte niet

\*\*\*CABOT heeft zeefgoed gecarboniseerd en geactiveerd voor de laboratoriumtesten. Voor full-scale toepassing is nog geen leverancier bekend. Het zeefgoed is afkomstig van de pilotinstallatie voor de Waterfabriek Wilp op rwzi Terwolde. Voor dit zeefgoed zijn de genoemde opbrengst en ds-gehalte vastgesteld

\*\*\*\*Niet getest op labschaal maar wel in CO<sub>2</sub> beschouwing meegenomen omdat juist snoeiafval een interessante bron voor PAK productie kan zijn in Nederland

De grondstoffen snoeiafval, zeefgoed, MDF-afval, pitten van steenvruchten en kokosnootschillen worden over het algemeen als afvalstromen behandeld of dienen als brandstof voor de productie van warmte en/of elektriciteit. De overgang naar een hoogwaardigere toepassing zoals actiefkool zorgt ervoor dat de GER-waarde van deze stoffen hernieuwbaar is, zie Tabel 3.1. Het aandeel hernieuwbaarheid van hout is afhankelijk van de soort hout en waar het gewonnen wordt. Dennenhout van Chemviron wordt bijvoorbeeld gewonnen uit eeuwenoude productiebossen. Hiervoor kan dus de GER-waarde voor Europees naaldhout worden aangenomen. Voor de houtsoorten uit Azië is dit lastiger te zeggen, mede door het gebrek aan bedrijfsinformatie over de exacte locatie, type hout en productieomstandigheden. Dit geldt voor de niet-fossiele PAK van Carbon Activated Europe, Desotec, Jacobi Carbon en Puragen.

Het aandeel hernieuwbaar in de GER-waarde van de niet fossiele PAK is gelijk aan de calorische waarde van de gebruikte grondstof. Dit is het geval omdat dit kort cyclische koolstof betreft. Het niet-hernieuwbare deel van de grondstoffen MDF, kokosnootschalen, pitten van steenvruchten, snoeiafval en zeefgoed kan hierbij op 0 worden gezet aangezien dit afvalproducten

zijn. De GER-waarde hiervan wordt toegerekend aan het product waarbij deze afvalstromen vrijkomen. Voor hout dat echter verbouwd wordt met als einddoel actiefkoolproductie, telt een deel niet-hernieuwbaar mee afkomstig uit de productie en het oogsten van het hout.

### 3.3.2 TRANSPORT NAAR PRODUCTIELOCATIE

Hiervoor zijn het aantal kilometers en de hoeveelheid te transporteren ruwe grondstof gebruikt met de voor de hand liggende wijze van transport. In de meeste gevallen vindt transport plaats per vrachtwagen. Bij Pyreg is voor de PAK uit pitten van steenvruchten en snoeiafval geen transport in rekening gebracht, omdat deze methode gedecentraliseerd is en dus zeer dicht bij de grondstofbron plaats kan vinden. De maximale aangenomen afstand die aangenomen is, is 200 km. Dit is gebaseerd op contact met verschillende leveranciers. Zie Tabel 3.2 voor de gehanteerde uitgangspunten.

### 3.3.3 VERSNIJPEREN GRONDSTOF

Voor het verhogen of verkrijgen van een goede efficiëntie in de navolgende stappen, wordt de ruwe grondstof vermalen of versnipperd. Dit kan gedaan worden met een installatie gevoed met diesel, aardgas of elektriciteit (Mi Hyung Kim, 2018). De GER-waarde die hier uit voortkomt is niet hernieuwbaar. De GER-waarde per kg PAK is afhankelijk van de hoeveelheid grondstof die vereist is voor de productie van 1 kg PAK. Verder is de aanname gedaan dat er geen ruwe grondstof verloren gaat.

### 3.3.4 DROGEN RUWE GRONDSTOF

De carbonisatie vindt plaats nadat het vocht uit de grondstof is verwijderd. Energetisch is het voordelig om de grondstof zo droog mogelijk in het carbonisatieproces in te voeren. De methode die hiervoor gebruikt is, is gebaseerd op het verdampen van het vocht. Afhankelijk van het aangenomen % ds (drogestof) kan de hoeveelheid energie berekend worden die nodig is voor deze verdamping. Er is hierbij vanuit gegaan dat het drogen gebeurt bij 100 °C waarbij de begintemperatuur 20 °C is. De meest voor de hand liggende brandstof die hiervoor gebruikt wordt is afhankelijk van de locatie en bepaalt dus de GER-waarde.

### 3.3.5 CARBONISATIE

Het carbonisatieproces is de omzetting van de grondstof in kool. Hierbij is aangenomen dat deze stap slechts een beperkte input aan energie nodig heeft, op basis van correspondentie met leveranciers en literatuur (Mi Hyung Kim, 2018). Het proces houdt zich na opstart draaiende met de energie die vrijkomt uit de grondstof. De inputenergie per kg PAK is voor elk type kool gelijk gehouden en is dus ook niet gecompenseerd voor de invloed van de yield van het gehele productieproces. De reden hiervoor is de beperkte informatie over afzonderlijke opbrengst van carbonisatie en activatie.

### 3.3.6 ACTIVATIE

Voor het activatieproces is uitgegaan van dezelfde benodigde input voor de activatie als voor de poederkool uit steenkool (referentieproces) in STOWA 2012-06. Deze referentie gaat uit van 12 kg stoom en 7,03 MJ elektriciteit per kg PAK. Uit literatuurvergelijking is gebleken dat deze input relatief hoog is. Met name de bijdrage van de stoom in het activatieproces is substantieel: 34% van de totale GER-waarde. Dat komt overeen met 12 kg stoom per 1 kg actiefkool. Literatuur op dit onderwerp laat zien dat er gevallen bekend zijn waarbij slechts 1,5-2 kg stoom per kg actiefkool nodig is (Gu, Bergman, Anderson, & Alanya-Rosenbaum, 2018) (Mochen Liao, 2020). De benodigde hoeveelheid stoom is daarom als gevoeligheidsanalyse meegenomen bij zowel de lage als hoge yield.

### 3.3.7 TRANSPORT VAN FABRIEK NAAR NEDERLAND

De bijdrage van het transport van de productielocatie naar de toepassingslocatie aan de GER-waarde is op dezelfde manier bepaald als het transport van de grondstof. Het aandeel van transport is vooral van belang bij productie op grote afstand. Door onduidelijkheid over productielocaties, is voor alle uit Azië afkomstige PAKs een afstand van 12.500 km aangenomen, die wordt afgelegd per vrachtschip. De afstand van de Europese distributiecentra naar Nederland wordt per vrachtauto afgelegd en verschilt per leverancier. Deventer is aangenomen als gebruikslocatie door de centrale ligging. In Tabel 3.2 zijn de gehanteerde aannames voor transport weergegeven. GER-Waarden van dit transport zijn berekend met behulp van de uitgangspunten van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO, 2018).

TABEL 3.2 TRANSPORT VAN GRONDSTOF EN GEPRODUCEERD PAK. GEGEVENS VAN CORRESPONDENTIE MET LEVERANCIERS EN WEBSITES VAN LEVERANCIERS.. VOOR AZIË IS 12.500 KM ALS STANDAARD AANGENOMEN

Producent	Grondstof	Productie locatie	Grondstof transport per vrachtwagen (km)	Distributie locatie	PAK transport per schip (km)	PAK transport per vrachtwagen (km)
Act&Sorb	MDF afval	Genk	200	Genk	0	200
CarboTech	Kokosnootschalen	Azië	200	Oberhausen	12.500	130
Carbon Activated Europe	Hout	Azië	200	Engeland	12.500	400
Chemviron	Dennen hout	Bordeaux	100	Bordeaux	0	1200
Desotec	Hout	Azië	20	Antwerpen	12.500	200
Jacobi carbon	Hout	Azië	200	Berlijn	12.500	600
Puragen	Hout	Azië	200	Parijs	12.500	560
Pyreg	Steenvruchtpitten	Toscane	0	Toscane	0	1300
Pyreg	Snoeiafval	Zuivering	0	Zuivering	0	0
CABOT	Zeefgoed	Klazienaveen	100	Klazienaveen	0	100

### 3.3.8 OMREKENFACTOR GER-WAARDE - CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT

De gebruikte omrekenfactor van niet-hernieuwbare GER-waarde naar CO<sub>2</sub>-footprint is 0,05844 kg CO<sub>2</sub>/MJ (Mulder M. , 2020). Deze factor is aangenomen omdat de GER-waarde van de niet fossiele PAK grotendeels veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van koolstof in de grondstof en in de extra fossiele energie die nodig is voor de productieprocessen.

## 3.4 RESULTATEN

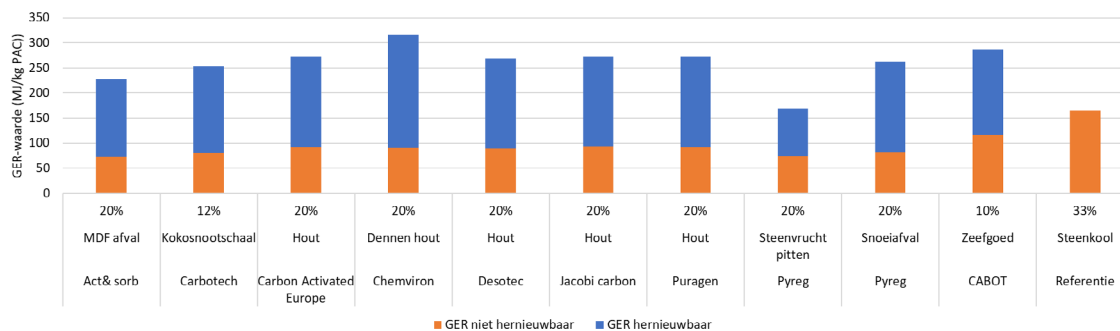
### 3.4.1 REFERENTIECASE

Als referentiecasse is uitgegaan van de situatie met hoge yield en het activatieproces conform STOWA 2012-06, wat een energie inefficiënt activatieproces betreft. In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 3.4.2 is de CO<sub>2</sub> footprint berekend voor een lage yield en in paragraaf 3.4.3 is een gevoeligheidsanalyse uitgewerkt voor een energie efficiënter activatieproces.

De resultaten van de GER-waarde per kool voor de referentiecasse zijn weergegeven in Figuur 3.2.



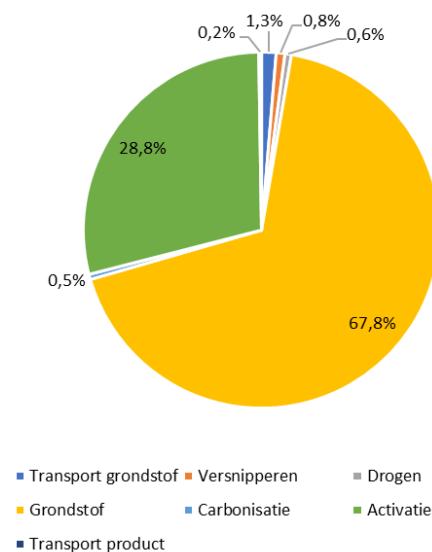
FIGUUR 3.2 GER-WAARDE MET HOGE YIELD (PER PAK WEERGEGEVEN OP X-AS), ACTIVATIE VOLGENS STOWA 2012-06



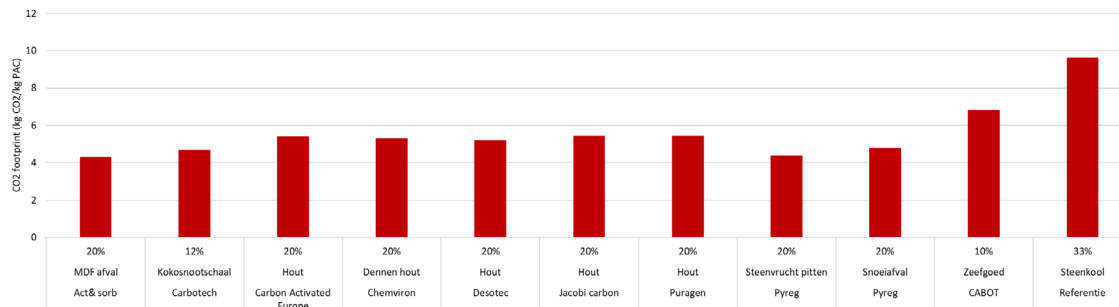
Hier is duidelijk het effect van het aandeel hernieuwbaar te zien. De totale GER-waarde van alle beschouwde kolen is hoger dan die van de referentiekool (uit steenkool). De actiefkool uit pitten van steenvruchten van Pyreg heeft de laagste GER-waarde, gevolgd door de MDF kool van Act&Sorb. Het hoge droge stofgehalte en de hoge yield zijn hier de oorzaak van.

Figuur 3.3 laat het aandeel van de verschillende processtappen en de grondstof zien in de totale GER-waarde. Deze afbeelding heeft betrekking op niet fossiele-kool van Act&Sorb. Hetzelfde beeld is zichtbaar bij de andere niet fossiele PAK's. Hieruit blijkt dat de grondstof (hernieuwbaar bij niet-fossiele kool) en het activatieproces (niet-hernieuwbaar) veruit het grootste aandeel uitmaken van de totale GER-waarde. De duurzaamste PAK zullen dus vooral een energie-efficiënt activatieproces hebben en een grondstof gebruiken waaruit een hoge yield te behalen is.

FIGUUR 3.3 AANDEEL VERSCHILLENDE PROCESSTAPPEN OP DE TOTALE GER-WAARDE VOOR ACT&amp;SORB MDF PAK. TOTALE GER-WAARDE 228 MJ/KG PAK



De CO<sub>2</sub>-footprint is berekend op basis van het niet-hernieuwbare deel van de GER-waarde en de genoemde omrekenfactor. Het resultaat is te zien in Figuur 3.4. Niet-fossiele kolen hebben een lagere CO<sub>2</sub>-footprint dan actiefkool uit steenkool. Actiefkool uit zeefgoed heeft de hoogste CO<sub>2</sub>-footprint, doordat de yield en het droge stofgehalte lager zijn dan bij andere bronnen.

FIGUUR 3.4 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT HOGE YIELD (PER PAK WEERGEGEVEN OP X-AS), ACTIVATIE VOLGENS STOWA 2012-06

Ter referentie is deze CO<sub>2</sub>-footprint vergeleken met de footprint bepaald in STOWA 2020-19. Daarin is voor steenkoolgebaseerde PAK een CO<sub>2</sub>-footprint van 11-18 kg CO<sub>2</sub>/kg PAK en voor PAK uit kokosshalen een footprint van 5-7 kg CO<sub>2</sub>/kg PAK vastgesteld. De ordegrrootte komt daarmee goed overeen.

### BEREKENING ACT&SORB

Act&Sorb heeft studie bureau Encon opdracht gegeven de CO<sub>2</sub> footprint van zijn product te bepalen (Encon, 2020) en het resultaat daarvan gedeeld ten behoeve van deze rapportage. Encon heeft in zijn berekening andere grenzen gehanteerd dan deze rapportage: transport en voorbehandeling van de grondstof (versnipperen) zijn niet meegenomen. Zoals te zien is in Figuur 3.3 is de bijdrage van deze stappen aan de totale GER-waarde beperkt.

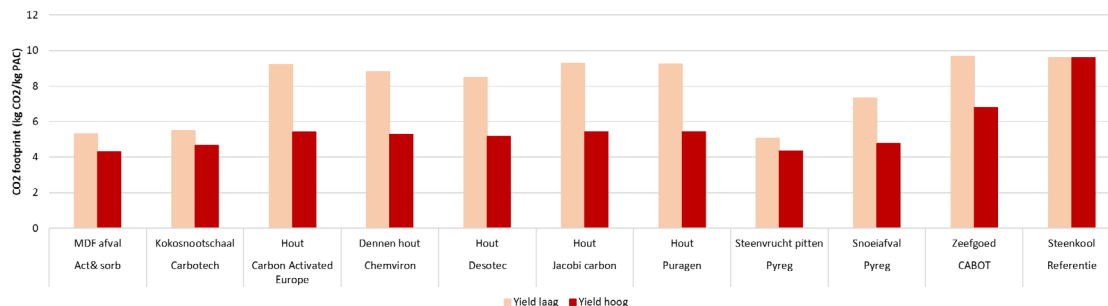
Een belangrijker verschil is dat het proces van Act&Sorb anders is dan het standaard proces zoals beschreven in STOWA 2012-06. Het proces van Act&Sorb gebruikt MDF als input. Voor de opstart van het proces wordt daarnaast een beperkte hoeveelheid aardgas gebruikt. In het feitelijke proces wordt MDF-afval omgezet in actiefkool en syngas. Het syngas vindt een nuttige toepassing omzetting naar elektriciteit, die deels ook wordt gebruikt in het eigen proces en deels extern wordt afgezet. De CO<sub>2</sub>-footprint wordt deels toegerekend aan de PAK, deels aan het geproduceerde syngas. Dit leidt tot een CO<sub>2</sub>-footprint van PAK van Act&Sorb van 0,083 kg CO<sub>2</sub>-eq / kg PAK. Dit is substantieel lager dan alle beschouwde niet-fossiele PAK's in deze studie. Ook als voor transport en voorbehandeling extra CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt meegerekend, blijft de CO<sub>2</sub>-footprint laag vergeleken met de alternatieven.

Vanwege de afwijkende systeemgrenzen en het specifieke productieproces wordt de door Encon berekende CO<sub>2</sub>-footprint in deze studie niet overgenomen. De zeer lage CO<sub>2</sub>-footprint van 0,083 kg CO<sub>2</sub>-eq / kg PAK laat echter zien dat er goede mogelijkheden zijn om de CO<sub>2</sub>-footprint van duurzame PAK's te reduceren.

#### 3.4.2 GEVOELIGHEIDSANALYSE YIELD

Als een lagere yield wordt aangenomen dan in de basissituatie, dan is de CO<sub>2</sub>-footprint van de meeste kolen in dezelfde ordegrrootte als die van PAK uit steenkool. Alleen de kolen van Act&Sorb, CarboTech en Pyreg hebben dan een CO<sub>2</sub>-footprint die duidelijk lager is dan die van conventioneel PAK uit steenkool.

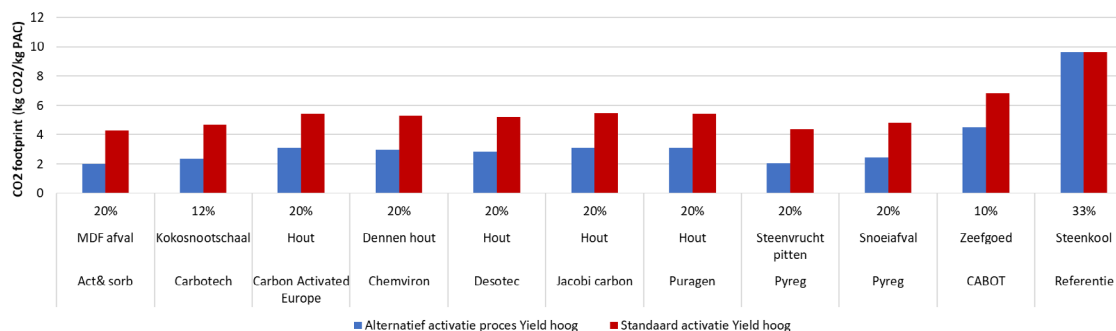
FIGUUR 3.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE OP BASIS VAN YIELD, VOOR GEBRUIKTE YIELD ZIE TABEL 4.1, ACTIVATIE VOLGENS STOWA 2012-06



### 3.4.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE ACTIVATIE

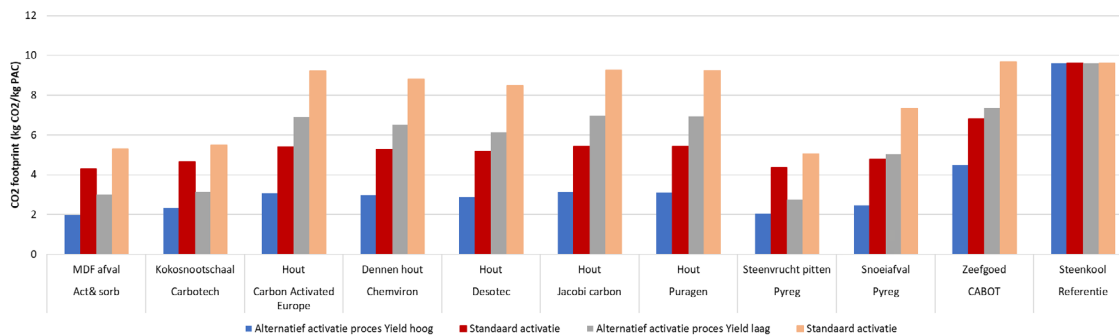
Er zijn twee manieren om actiefkool te activeren: chemische activatie en stoomactivatie. Voor niet-fossiele PAK zijn uit duurzaamheidsoogpunt alleen PAK-soorten op basis van stoomactivatie meegenomen. Activatie maakt het grootste deel uit van de CO<sub>2</sub>-footprint van actiefkool uit niet-fossiele bronnen. Volgens verschillende bronnen is een substantieel lagere stoominput (2 kg stoom/kg PAK in plaats van 12 kg stoom/kg PAK) voor activatie nodig als een biogene bron voor actiefkool wordt gehanteerd (Gu, Bergman, Anderson, & Alanya-Rosenbaum, 2018). In sommige gevallen kan in dat geval de totale CO<sub>2</sub>-footprint gehalveerd worden. Sommige kolen komen dan uit op een footprint die nog maar 20% van die van steenkool gebaseerde PAK bedraagt.

FIGUUR 3.6 GEVOELIGHEIDSANALYSE OP BASIS VAN ACTIVATIE PROCES BIJ HOGE YIELD (PER PAK WEERGEGEVEN OP X-AS), STANDAARD ACTIVATIE IS VOLGENS STOWA 2012-06



## 3.5 CONCLUSIE

Tenslotte zijn alle resultaten samengevoegd in Figuur 3.7. Hieruit blijkt dat de CO<sub>2</sub>-footprint voor alle actiefkolen uit niet fossiele bron even hoog of lager is dan die voor steenkoolgebaseerde actiefkool. Actiefkool op basis van MDF-afval, kokosschalen en steenvrucht pitten scoort hierbij het beste als gevolg van de hogere yield en droge stof gehalte. Daarnaast is afgaand op de berekening die Act&Sorbs heeft laten uitvoeren, door een alternatief productieproces een nog lagere CO<sub>2</sub>-footprint te behalen.

FIGUUR 3.7 EFFECT VAN BEIDE GEVOELIGHEIDSANALYSES OP CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT. VOOR GEBRUIKTE YIELD ZIE TABEL 3.1

De gevoeligheidsanalyse op basis van yield laat zien dat de duurzaamheidswinst van de niet-fossiele PAK samenhangt met de yield en het energieverbruik van de activatie. De combinatie van een lage yield met standaard activatie leidt voor PAK op basis van hout en zeefgoed nauwelijks tot duurzaamheidsvoordeel in vergelijking met de referentiekool. Bij een hoge yield en alternatieve activatie levert PAK op basis van hout juist een aanzienlijke duurzaamheidswinst ten opzichte van de referentiekool. Voor zeefgoed is de duurzaamheidswinst kleiner. Al met al moet er voldoende rendement behaald kunnen worden om de CO<sub>2</sub>-footprint laag te houden. De yield en het drogestofgehalte zijn daarin de belangrijkste parameters. Met andere woorden: de input aan energie en grondstof om van deze niet-fossiele grondstof PAK te maken mag niet te hoog zijn. Als de carbonisatie en activatie op duurzame wijze kunnen worden uitgevoerd met een minimale CO<sub>2</sub>-footprint (bijvoorbeeld door het gebruik van hernieuwbare energie of restwarmte) kan de CO<sub>2</sub>-footprint verder worden gereduceerd.

# 4

## VERTALING NAAR 100.000 I.E. CASE

### 4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt de vertaling gemaakt naar toepassing van de onderzochte biokolen op een rwzi van 100.000 i.e. Hiermee kunnen de resulterende kosten en de jaarlijkse uitstoot van niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> bepaald worden.

### 4.2 BENODIGDE DOSERING VOOR HET VEREISTE VERWIJDERINGSRENDEMENT

In hoofdstuk 2 is vastgesteld dat de kolen van niet fossiele herkomst in staat zijn om microverontreinigingen uit rwzi-effluent te verwijderen. Wat nu moet gebeuren is de vertaalslag naar een dosering in actiefslib. Hierbij moet een aanname worden gedaan voor de mate waarin een biologische zuivering de microverontreinigingen verwijdert. De actiefkool moet immers 'de rest' doen. In de meetcampagne op 18 rwzi's in Rijn Oost is vastgesteld dat een RWZI de elf gidsstoffen gemiddeld voor zo'n 30% verwijdert. Uitgaand van een benodigd verwijderingsrendement van 70%, zal een aanvullende verwijderingsstap, *ten opzichte van het effluent*, aanvullend 57% rendement moeten behalen <sup>2</sup>.

Vervolgens moet de vertaalslag gemaakt worden vanuit de experimenten die in Hoofdstuk 2 beschreven zijn. Deze labtesten zijn uitgevoerd met 1 dosering, namelijk 20 mg PAK per liter, in effluent. De voorziene dosering van de kolen van niet fossiele herkomst vindt echter plaats in actiefslib, waardoor twee effecten erbij komen: storing door aanwezigheid van veel organisch materiaal maar tevens een veel langere verblijftijd van de kool in de AT. Het is moeilijk te voorspellen hoe hierdoor de benodigde dosering verandert. Gelukkig is vanuit het PACAS project bekend bij welke dosering in actiefslib van ChemvironPulsorbWP235 een rendement van 70% gehaald werd. Dit type kool is ook gebruikt als referentie in de labtesten. Uit de labtesten bleek dat deze kool in het effluent een verwijderingsrendement bereikte van 93%. Deze resultaten gebruiken we om een inschatting te maken van de verwachte benodigde doseringen in actiefslib. Van de kolen van niet fossiele herkomst die een vergelijkbare prestatie hebben, nemen we aan dat ze met een vanuit PACAS vergelijkbare dosering in actiefslib (15 mg/l) de vereiste 70% totaalrendement kunnen behalen. Hoe slechter de kolen presteren in de labtest, hoe hoger we de benodigde dosering in actiefslib inschalen. Een en ander is toegelicht in Tabel 4.1.

In kolom twee wordt per type kool het rendement gepresenteerd zoals dat gemeten is in de labtesten met effluent. Kolom drie geeft aan welk verwijderingsrendement gehaald moest worden in het effluent, om het gewenste totaalrendement van 70% te bereiken. Een gemiddelde rwzi heeft al een verwijderingsrendement, van tussen 30 en 50%, zodat een aanvullende techniek nog maar 57% rendement hoeft te halen. Kolom vier geeft het verschil tussen deze twee; een negatieve waarde betekent dus dat de kool in de labtesten eigenlijk al 'te veel' doet, in het bereiken van de gewenste 70%.

<sup>2</sup> Uitgaande van PACAS waarmee al het rioolwater behandeld wordt. Dit geldt niet voor nageschakelde technieken

De laatste kolom geeft een inschatting van de dosering die nodig zal zijn, indien gedoseerd wordt in het actiefslib (dus niet in het effluent), voor het bereiken van een totaalrendement van 70% op 7 van de 11 gidsstoffen. Hierbij is geredeneerd dat een kool die vergelijkbaar presteert als de referentiekool, eveneens met een dosering van 15 mg/l in actiefslib (net zoals in PACAS project) het gewenste rendement zal kunnen halen. Van kolen die minder presteren dan de referentiekool zal meer gedoseerd moeten worden, hierbij zijn twee categorieën aangehouden: 20 of 25 mg/l, afhankelijk van het verschil met de prestaties van de referentiekool.

TABEL 4.1 BEPALING VAN TE DOSEREN HOEVEELHEID KOOL OP BASIS VAN DE LABTESTEN

Naam kool	Gemiddeld verwijderingsrendement voor 11 gidsstoffen bij dosering van 20 mg/l (%)	Gewenst rendement t.o.v. effluent (%)	Vershil (%)	Aanname voor dosering, om totaal 70% te halen (mg/l)
Referentie: Pulsorb WP 235	93	57	-36	15
Act&Sorb product	95	57	-38	15
PAK C 1000 C	84	57	-27	20
MAR-300	89	57	-32	15
Acticarbone 2SW	94	57	-37	15
Organosorb 200-1 WB	72	57	-15	25
Aquasorb G9	90	57	-33	15
Oxpure	96	57	-39	15
PYREG kool	81	57	-24	20
Zeefgoed kool	57	57	0	25

#### 4.3 KOSTENVERGELIJKING

Nu we een inschatting hebben welke dosering per kool toegepast moet worden om het gewenste rendement te bereiken, kunnen we berekenen wat de kosten zijn voor

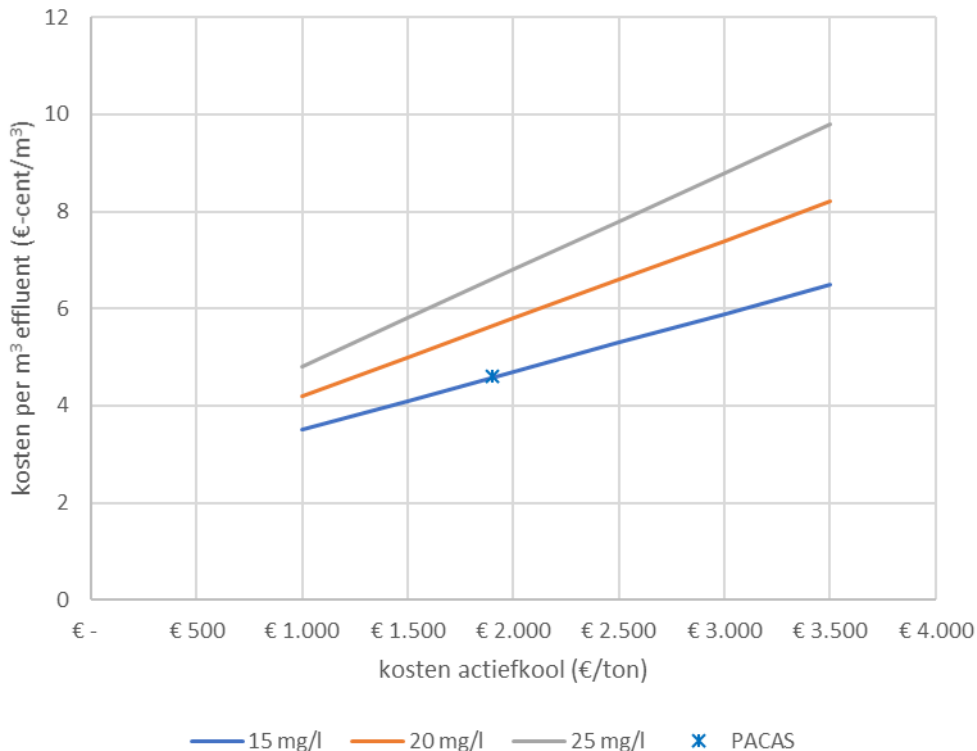
- Aanschaf van de kool
- Verwerking van spuislib
- Afzet van het mengsel van ontwaterd spuislib en actiefkool

Voor de overige kosten is ervan uitgegaan dat deze gelijk blijven aan de kostenberekening zoals die is gedaan voor het PACAS project (STOWA 2018-02), onafhankelijk van welk type kool gebruikt wordt, zie Figuur 4.1. Dit betekent dat aangenomen wordt dat elke PAK uiteindelijk geleverd wordt als poederkool die vanuit de poederkoolsilo gedoseerd kan worden. Het is voor veel van de kolen van niet fossiele herkomst onbekend wat de kostprijs is, daarom is voor een range van koolprijzen het resultaat gepresenteerd. Voor de kolen waarvan de prijs wel bekend is, is in Tabel 4.2 gepresenteerd wat de kosten zijn bij de bepaalde doseringen.

Te zien is dat de kosten van PAK C 1000 C van CarboTech gelijk uitvallen met die van de referentie PAK (4,6 cent per m<sup>3</sup>) en dat de kosten van MAR 300 met 4,2 cent per m<sup>3</sup> lager uitvallen dan de referentiekool.

FIGUUR 4.1

KOSTEN PER BEHANDELDE KUBIEKE METER AFVALWATER, ALS FUNCTIE VAN DE DOSERING IN ACTIEFSLIB (MG/L) EN DE PRIJS VAN PAK (€/TON)



TABEL 4.2

KOSTEN PER BEHANDELDE KUBIEKE METER AFVALWATER BIJ TOEPASSING VAN KOOL VAN NIET FOSSIELE HERKOMST; VAN DE NIET GENOEMDE KOLEN ZIJN DE KOSTEN NIET BEKEND

PAK	PAK prijs €/ton*	Dosering g/m³	Kosten €ct/m³
Referentiekool (Pulsorb WP235)	€ 1.950	15	4,6
Act&Sorb	>€ 2.000	15	>4,6
PAK C 1000 C (CarboTech)	€1.410	20	4,6
Jacobi	€ 2.500	15	5,3
MAR-300	€ 1.600	15	4,2

\* bron: STOWA 2020-19

#### 4.4 DUURZAAMHEIDSVERGELIJKING

De inzet van de kolen van niet fossiele herkomst heeft primair tot doel het verlagen van de uitstoot van niet hernieuwbare CO<sub>2</sub>, die op zou treden bij toepassing van steenkool gebaseerde actiefkool.

De CO<sub>2</sub>-footprint is berekend volgens het model van STOWA, en bevat de volgende posten:

- Hulpstoffen
- Materiaal
- Energie
- Slibeindverwerking

##### HULPSTOFFEN (ACTIEFKOOL)

In hoofdstuk 3 is bepaald hoeveel niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> vrijkomt bij toepassing van de kolen van niet fossiele herkomst. In Figuur 3.4 is hiervoor een range gevonden tussen 4 en 7 kg niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> per kilogram kool van niet fossiele herkomst. Voor poederkool uit steenkool bedraagt deze waarde 9,6 kg CO<sub>2</sub> per kilogram. Voor deze range is uitgerekend wat de

equivalente uitstoot van niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> op jaarbasis wordt bij een drietal doseringen op een rwzi van 100.000 i.e., zie figuur 5.2.

### ENERGIE

De energie heeft betrekking op het energieverbruik van de doseerapparatuur. Deze is onafhankelijk van het type kool, en ook onafhankelijk van de doseerverhouding.

### SLIBEINDVERWERKING

Het is nog niet bekend of er verschillen zijn per type kool, in de mate waarin deze invloed heeft op bijvoorbeeld de ontwatering van slib. Voor deze beschouwing is ervan uitgegaan dat de effecten op de ontwatering onafhankelijk zijn van het type kool.

Wat wel invloed heeft is hoeveel kool er wordt gedoseerd. Op dezelfde manier als in het PACAS project is gedaan, wordt de hoeveelheid poederkool verrekend in de hoeveelheid af te voeren slib en de hiervoor benodigde hoeveelheid PE.

### MATERIAAL

Hierbij gaat het om de hoeveelheid materiaal die gebruikt wordt bij de bouw van de doseerapparatuur. Deze verandert niet bij toepassing van kool van niet fossiele herkomst.

Voor de posten Energie, Slibeindverwerking en Materiaal is in Tabel 4.3 aangegeven welke waarden zijn gebruikt voor de bepaling van de jaarlijkse CO<sub>2</sub> uitstoot bij drie doseringen van PAK.

**TABEL 4.3** BIJDRAGE AAN UITSTOOT VAN CO<sub>2</sub> (TON CO<sub>2</sub>/JAAR) VAN DE CATEGORIEËN ENERGIE, SLIBEINDVERWERKING EN MATERIAAL BIJ 3 DOSERINGEN VAN KOOL VAN NIET FOSSIELE HERKOMST VOOR EEN RWZI VAN 100.000 IE

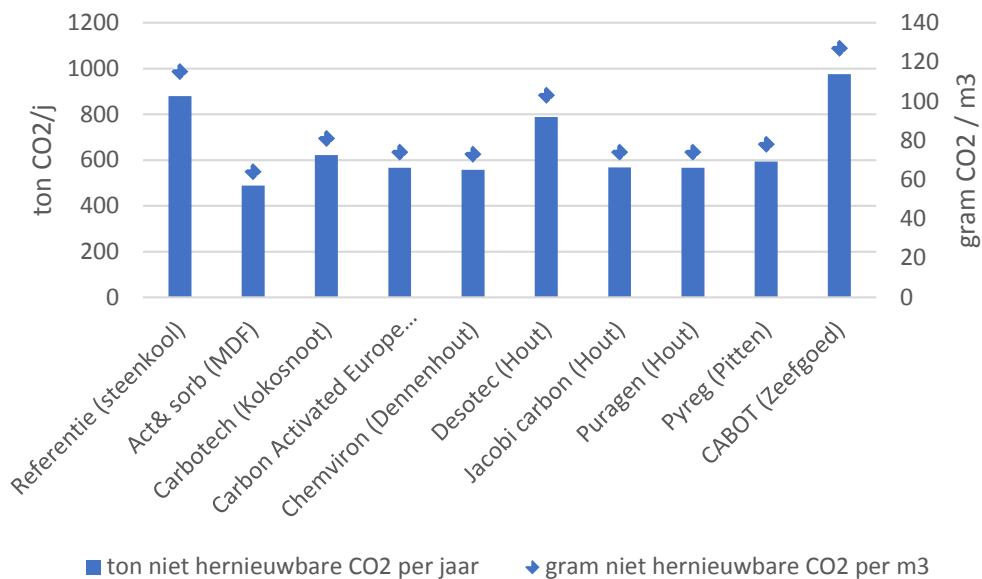
Aspect	Eenheid	15 mg/l (referentie)	20 mg/l	25 mg/l
Energie	Ton CO <sub>2</sub> /jaar	718	718	718
Slibeindverwerking	Ton CO <sub>2</sub> /jaar	391	393	395
Materiaal	Ton CO <sub>2</sub> /jaar	17	17	17

In Figuur 4.2 is weergegeven hoeveel niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten, alleen als gevolg van toepassing van de actiefkool. Dit is berekend voor een rwzi van 100.000 ie, met de doseringen zoals in het voorgaande bepaald. Hieruit blijkt dat de CO<sub>2</sub> footprint daalt (in vergelijking met de poederkool uit steenkool) voor alle kolen met niet fossiele herkomst, met uitzondering van de kool uit zeefgoed. Van de geteste kolen geeft de PAK uit MDF de grootste verbetering, een 44% lagere CO<sub>2</sub> uitstoot. De PAK uit zeefgoed heeft met 976 ton CO<sub>2</sub> per jaar 11% meer uitstoot van CO<sub>2</sub> dan de steenkool gebaseerde PAK. Dit wordt veroorzaakt doordat er van de zeefgoed kool relatief meer gedoseerd moet worden om tot een gelijk verwijderingsrendement te komen als de overige kolen.



FIGUUR 4.2

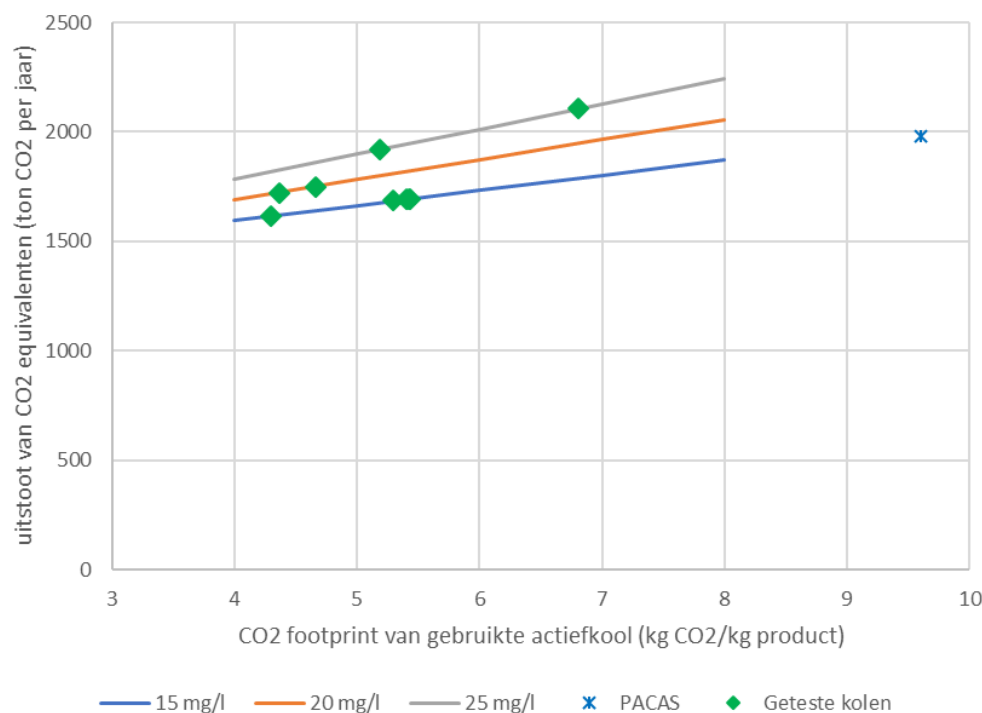
BEREKENDE JAARLIJKSE TOENAME VAN DE UITSTOOT VAN NIET HERNIEUWBARE CO<sub>2</sub>, ALS GEVOLG VAN TOEPASSING VAN POEDERKOOL VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, BIJ DE DOSERINGEN ZOALS BEPAALD IN TABEL 4.3, VOOR EEN RWZI VAN 100.000 IE. (EXCLUSIEF ENERGIE, MATERIAAL EN SLIBEINDVERWERKING) YIELD: 20%; ACTIVATIE-ENERGIE VOLGENS STOWA-2012-06



In Figuur 4.3 is de CO<sub>2</sub> footprint gepresenteerd van de kooldosering, inclusief de gehele rwzi. In deze figuur is af te lezen in welk gebied een verbetering te verwachten is ten opzichte van de referentiesituatie. De groene ruiten in Figuur 4.3 geven aan welke kolen van niet fossiele herkomst een verbetering zouden geven ten opzichte van steenkool. In deze figuur is af te lezen dat wanneer een kool van niet fossiele herkomst minder effectief is dan de referentie (en er dus meer dan 15 mg/l gedoseerd moet worden), dat de footprint van de kool dit moet compenseren, door (substantieel) lager te zijn dan die van de referentiekool. Als er bijvoorbeeld 20 mg/l gedoseerd moet worden, dan mag de footprint van de kool niet hoger zijn dan circa 7,5 kg CO<sub>2</sub> per kilogram poederkool, om nog een verbetering te bewerkstelligen.

FIGUUR 4.3

VERWACHTE TOTALE JAARLIJKSE UITSTOOT VAN NIET HERNIEUWBARE CO<sub>2</sub> BIJ TOEPASSING VAN KOLEN VAN NIET FOSSIELE HERKOMST, INCLUSIEF DE RWZI



# 5

## INVENTARISATIE RESTSTROMEN

### 5.1 INLEIDING

Uit het laboratoriumonderzoek beschreven in hoofdstuk 2 komt naar voren dat PYREG kool van pitten van steenvruchten in staat is om de 11 gidsstoffen met een rendement van 83% uit rwzi-effluent te verwijderen. Dit is weliswaar lager dan de 93% van de referentiekool maar het feit dat de PYREG kool met een relatief eenvoudige installatie is geproduceerd uit een organische reststroom is veelbelovend. Uit onderzoek op de rwzi Baden Baden (ReDirect) is naar voren gekomen dat PYREG kool uit snoeiafval effectief microverontreinigingen verwijdert op een full-scale rwzi. De exacte PAK-dosering en de toename in verwijderingsrendement zijn echter nog niet gepubliceerd. Snoeiafval en pitten van steenvruchten kunnen duurzame bronnen zijn voor PAK-productie omdat het organische reststromen betreft.

In dit hoofdstuk is nagegaan welke reststromen in Nederland in grote volumes beschikbaar zijn die potentieel ingezet kunnen worden voor PAK productie. De volgende reststromen zijn beschouwd:

- Bermgras
- Zeefgoed
- Overige organische reststromen waaronder mest, snoeiafval en organisch afval uit de land- en tuinbouw

Bermgras en zeefgoed komen bij de waterschappen zelf beschikbaar en zijn daardoor extra interessant voor PAK-productie. De overige reststromen komen vrij bij gemeentes, Rijkswaterstaat en agrariërs. Een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van actiefkool uit reststromen is dat er geen uitloging dient te zijn van ongewenste stoffen zoals zware metalen, PAK (polycyclische aromatische koolwaterstoffen) of nutriënten. Voordat een actiefkool uit een reststroom toegepast wordt op een rwzi dienen daarom uitloogtesten uitgevoerd te worden. Voor de in dit rapport geteste kolen is het onwaarschijnlijk om aan te nemen dat uitloging van ongewenste stoffen een risico vormt.

FIGUUR 5.1

BERMGRAS; BRON HANDREIKINGGRASBEKLEDING/STOWA

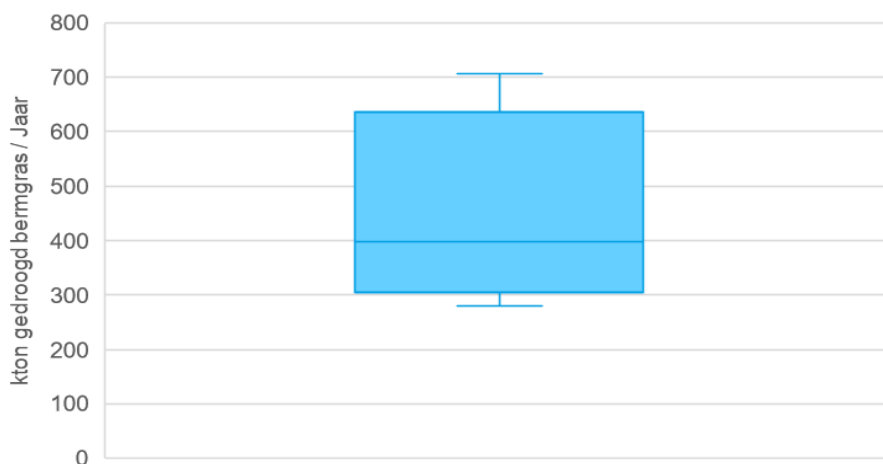


## 5.2 BERMGRAS

Hoewel de effectiviteit van actiefkool uit bermgras nog niet is getest of bewezen, zou bermgras vanwege de aanwezige lignine een geschikte grondstof voor PAK kunnen zijn. Bermgras is in grote hoeveelheden beschikbaar en doordat het een niet-fossiele organische reststroom betreft (kort cyclisch CO<sub>2</sub>), is de CO<sub>2</sub>-voetprint ten opzichte van fossiele bronnen zoals bruinkool aanzienlijk lager. Hierdoor zou het een geschikte optie kunnen zijn om duurzame actiefkool van te maken. In de praktijk zijn er echter veel belemmeringen voor het gebruik van bermgras als bron voor actiefkoolproductie. Allereerst komt bermgras verspreid over het land vrij waardoor er veel transportbewegingen nodig zijn. Daarnaast is er sprake van seizoen fluctuaties in de productie van bermmaaisel en dient het maaisel gedroogd te worden voordat het omgezet kan worden naar actiefkool. Een logistiek hiervoor opzetten is kostbaar en complex. Een ander aandachtspunt is de variërende samenstelling van het bermgras en de potentiële vervuiling van bermgras met zware metalen. Bermgras langs wegen was tot enkele decennia geleden sterk vervuild met zware metalen maar is de afgelopen decennia veel schoner geworden door het gebruik van schonere brandstoffen. In een recent onderzoek wordt geconcludeerd dat de samenstelling van bermmaaisel in Drenthe nauwelijks afwijkt van natuurgras en dat de concentraties zware metalen ver onder de maximum toegelaten waardes voor toepassing in een vergister liggen (Alterra, 2015). Of dit ook voor andere delen van Nederland geldt is niet bekend. De opwerking van bermgras naar actiefkool is echter een andere toepassing waarvoor andere eisen gelden. Zo is het van belang dat aanwezige zware metalen niet in het afvalwater terecht komen.

Los van de hier boven beschreven belemmeringen is navolgend een inventarisatie opgenomen van de hoeveelheid bermgras in Nederland en de potentie om dit op te werken tot actiefkool. In 2003 is een uitgebreide inventarisatie uitgevoerd van de hoeveelheid bermgras in Nederland waarvoor gegevens van 5 verschillende onderzoeken gebruikt zijn: Universiteit Utrecht, BTG, NOVEM, TNO MEP en BVOR (BTG, 2003). Uit deze inventarisatie blijkt dat in Nederland ongeveer 400 tot 1.000 kton/jaar bermgras beschikbaar is met een drogestofpercentage van 60%. Door dit bermgras aanvullend te drogen tot 85% drogestof ontstaat een organische reststroom die omgezet kan worden in een product met de eigenschappen van actiefkool. Uitgaande van een drogestofgehalte van 85% zou er ongeveer 280-700 kton gedroogd bermgras/jaar beschikbaar zijn in Nederland, zoals weergegeven in Figuur 5.2.

FIGUUR 5.2 TOTAAL GEWICHT GEDROOGD BERMGRAS (85% DS) IN NEDERLAND; UITKOMST VAN 5 ONDERZOEKEN IN EEN BOX-WHISKER PLOT



Doordat de tonnages gedroogd bermgras in de verschillende onderzoeken nogal uiteen lopen is in deze analyse uitgegaan van drie verschillende scenario's:

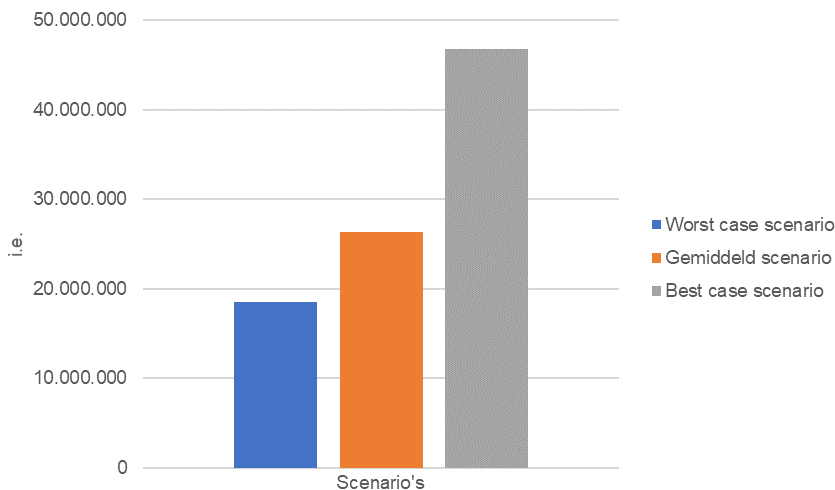
- Een worst case scenario waarbij is uitgegaan van de kleinste hoeveelheid beschikbaar gras per jaar (279 kton/jaar)
- Een gemiddeld scenario waarbij is uitgegaan van de mediaan van alle onderzoeken; dit om uitschieters naar boven en onder te elimineren (397 kton/jaar)
- Een best case scenario waarbij is uitgegaan van de grootste hoeveelheid beschikbaar gras per jaar (706 kton/jaar)

Op basis van mondelinge communicatie met de firma PYREG wordt uitgegaan van een opbrengst van 7,6 kg PAK uit 100 kg gedroogd bermgras. Uitgaande van deze opbrengst kan theoretisch tussen de 22 en 58 kton PAK per jaar worden geproduceerd uit Nederlands bermgras. Uitgaande van een PAK-dosering van 15 mg/L en de uitgangspunten in Tabel 5.1 zorgt dit voor een jaarlijks behandelbaar afvalwatervolume overeenkomstig met 18.000.000 tot 47.000.000 i.e. In Figuur 5.3 is dit schematisch weergegeven. Hierin is niet meegenomen dat in de praktijk meestal gebruik wordt gemaakt van een maximale doseerhoeveelheid bij RWA-pieken. Dit betekent dat de door bermgras behandelbare i.e.'s in praktijk mogelijk hoger uitvallen. Uit praktijk gegevens blijkt dat het PAK verbruik ongeveer 15% lager uitvalt door het hanteren van een maximale dosering bij RWA-pieken. (STOWA, 2018).

TABEL 5.1 UITGANGSPUNTEN STOWA REFERENTIEZUIVERING 100.000 I.E., BRON: (MULDER M. , 2019)

Parameter	Eenheid	Waarde
Aantal i.e. op zuivering	i.e.	100.000
Behandeld volume	m <sup>3</sup> /jaar	7.665.000
Jaartijks behandel volume per i.e.	m <sup>3</sup> /i.e. jaar	76,7

FIGUUR 5.3 JAARLIJKSE THEORETISCH MOGELIJK TE BEHANDELDE I.E.'S. MET PAK UIT GEDROOGD BERMGRAS IN NEDERLAND. OP BASIS VAN EEN DOSERINGSCONCENTRATIE VAN 15 MG/L EN EEN OPBRENGSTPERCENTAGE VAN 8% UIT GEDROOGD BERMGRAS



Theoretisch gezien kan al het Nederlandse afvalwater, totaal 26 miljoen i.e. (CBS), hiermee behandeld worden. Mocht in de praktijk blijken dat er een hogere dosering dan 15 mg/l nodig is bij gebruik van PAK uit bermgras zal de potentieel te behandelen i.e.'s afnemen. Stel dat een dosering van 30 mg/l nodig is (worst case) dan zal de potentieel te behandelen hoeveelheid afvalwater afnemen naar 10.000.000- 25.000.000 i.e. per jaar. Dit is nog steeds een significante hoeveelheid. Daarom is kool uit bermgras niet alleen lokaal interessant maar kan het voor heel Nederland interessant zijn.

Naast de eerder beschreven complexiteit om een keten op te zetten voor het opwerken van bermgras naar PAK moet ook de duurzaamheid van bermgras opwerken tot kool worden beschouwd. Een randvoorwaarde voor het opwerken van bermgras naar PAK is de duurzaamheid in vergelijking met de huidige situatie. Bermgras wordt op dit moment o.a. gecomponeerd of omgewerkt in de bodem waardoor de bodemstructuur verbetert. Om de duurzaamheid van PAK uit bermgras vast te stellen dient in een vervolgfase de huidige toepassing van bermgras vergeleken te worden met het opwerken van bermgras naar PAK. Hetzelfde geldt voor het opwerken van andere organische reststromen naar PAK.

### 5.3 ZEEFGOED

Zeefgoed is een grondstof die lokaal op de rwzi's gewonnen kan worden met fijnzeven. Het zeefgoed in fijnzeven vindt zijn oorsprong voornamelijk in stoffen zoals toiletpapier en bevat daarom veel cellulose (ScreenCap, 2017), (STOWA, 2017), (STOWA, 2014), (STOWA, 2019). Zeefgoed wordt momenteel door de waterschappen afgezet als afvalstof wat kosten met zich meebrengt en weinig duurzaam is. Een opwaardering van zeefgoed tot duurzame grondstof voor de productie van PAK is daarom gewenst. In het gunstigste geval kan zeefgoed direct op de rwzi opgewerkt worden tot PAK om daarna ingezet te worden voor de verwijdering van microverontreinigingen.

Uit de laboratoriumtesten in hoofdstuk 2 volgt dat PAK uit zeefgoed microverontreinigingen uit afvalwater verwijdert, maar het gemiddeld 36%-punt minder goed doet dan de referentiekool. Dit kan betekenen dat er in de praktijk een hogere dosering nodig is van PAK uit zeefgoed vergeleken met PAK uit steenkool. De vraag is of zeefgoed het wel goed genoeg gaat doen of dat je teveel pak moet toevoegen (met andere woorden, dat een hogere concentratie op een gegeven moment niet tot een hoger rendement leidt). Hierbij moet worden aangegeven dat de productie van PAK uit zeefgoed nog niet geoptimaliseerd is en hier mogelijk nog verbeterstappen te maken zijn in de toekomst (CABOT, 2020).

In dit onderzoek is een theoretische exercitie uitgevoerd om te berekenen wat het theoretisch potentieel is van PAK-productie uit zeefgoed. In Tabel 5.2 zijn de uitgangspunten opgenomen die hierbij zijn gebruikt. Deze uitgangspunten zijn bevindingen van CABOT op basis van het op laboratoriumschaal opwerken van zeefgoed tot PAK, zoals dat voorafgaand aan de labfase van deze studie is uitgevoerd. Uit deze uitgangspunten blijkt dat er een activatie-efficiëntie van 21% is behaald op drogestof basis. Deze hoge yield wordt naar verwachting veroorzaakt door het hoge asgehalte van zeefgoed. Dit hoge asgehalte verklaart echter ook het lage verwijderingsrendement op gidsstoffen zoals vastgesteld in hoofdstuk 2.

#### **PILOT PYROLYSE ZEEFGOED RWZI EDE**

Medio 2021 start Waterschap Vallei en Veluwe op de rwzi Ede een pilot naar de pyrolyse van zeefgoed waarbij productgas, bio olie, biochar en azijnzuur geproduceerd worden uit zeefgoed. Als onderdeel van deze pilot zal een hoeveelheid zeefgoed biochar door een externe partij opgewerkt worden tot zeefgoed. Dit onderzoek zal meer informatie verschaffen over de activatie-efficiëntie van zeefgoed en het verwijderingsrendement op gidsstoffen.

TABEL 5.2 UITGANGSPUNTEN PAK UIT ZEEFGOED EN ACTIVATIE EFFICIËNTIE BEREKENING (OP BASIS VAN DS) (BRON: CABOT)

Parameter	Eenheid	Waarde
Input zeefgoed	gram	354
Drogestof percentage	%	37,5
Input zeefgoed	gram droge stof	132,8
Hoeveelheid PAK	gram droge stof	28 *
Activatie efficiëntie op drogestof basis	%	21

\*asgehalte bedraagt 48% wat hoog is in vergelijking met commercieel PAK

Op basis van de activatie-efficiëntie en de uitgangspunten in Tabel 5.3 en Tabel 5.4 is berekend hoeveel PAK er theoretisch gemaakt zou kunnen worden als op alle rwzi's in Nederland zeefgoed afgevangen zou worden en dit allemaal ingezet wordt om PAK te maken. Hieruit volgt dat er theoretisch 9.383 ton PAK per jaar uit zeefgoed gemaakt zou kunnen worden. Bij een dosering van 15 mg/l is dit genoeg om afvalwater van 7.622.635 i.e. met deze PAK te behandelen.

TABEL 5.3: UITGANGSPUNTEN POTENTIËLE PAK PRODUCTIE IN NEDERLAND UIT ZEEFGOED (BRON: (SCREENCAP, 2017)

Parameter	Eenheid	Waarde
Capaciteit rwzi	i.e.	272.000
Zeefgoed productie	kg DS/d	1.275
Zeefgoed productie	g DS/d. i.e.	4,7

TABEL 5.4 OVERIGE UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN BEREKENING POTENTIËLE JAARLIJKSE PAK PRODUCTIE UIT ZEEFGOED IN NEDERLAND

Parameter	Eenheid	Waarde
Aantal i.e. in NL (CBS)	i.e.	26.000.000
Zeefgoed productie	kg DS/jaar	44.484.375
Potentiële PAK productie	kg/jaar	9.382.768
Potentiële PAK productie	ton/jaar	9.383

#### 5.4 OVERIGE RESTSTROMEN

Naast bermgras en zeefgoed zijn er in Nederland verschillende andere organische reststromen beschikbaar waaruit theoretisch PAK geproduceerd zou kunnen worden. Restafvalstromen zoals snoeiafval, agrarisch afval, bloemteeltafval, GFT of mest kunnen theoretisch allemaal ingezet worden om PAK te produceren. De hoeveelheden van deze reststromen zijn geïnventariseerd, zie Tabel 5.5.

TABEL 5.5 INVENTARISATIE ORGANISCHE RESTSTROMEN HOEVEELHEID IN NEDERLAND

Organische reststroom	Hoeveelheid (kton nat gewicht/ jaar)	Droge stof gehalte (%)
Mest	78.000 *	5
Snoeiafval	1.010	50**
Glastuinbouw en landbouw afval	429	35*
Bloembouw afval	144	100
GFT	1.400	35*

\*totale Nederlandse mestproductie

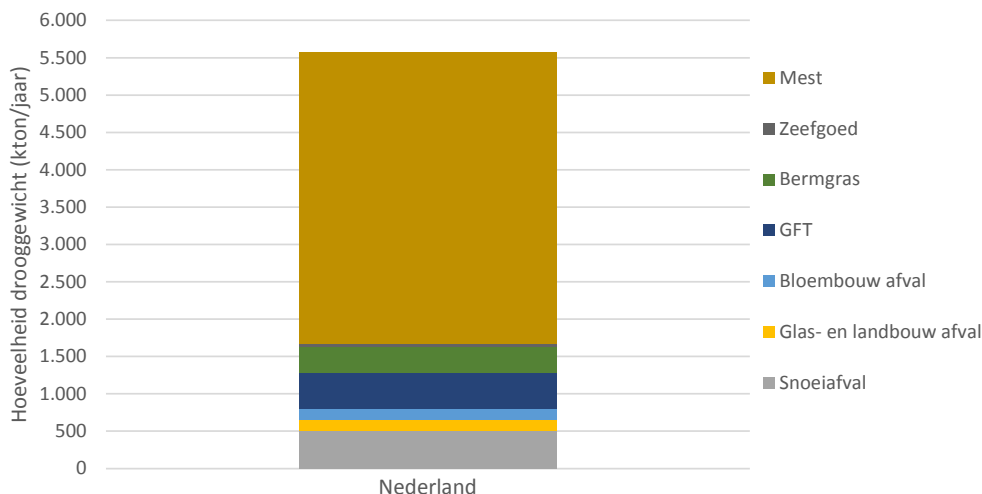
\*\*aanname

In Tabel 5.6 zijn de hoeveelheden drooggewicht van deze stromen weergegeven. De geschiktheid en beschikbaarheid van de verschillende stromen dient nader onderzocht te worden.

Het is voor de meeste van deze stromen nog niet bekend wat de omzettingspercentages naar PAK zijn, wat de invloed van de kwaliteit is (verontreinigingen) en of het verwijderingsrendement wel hoog genoeg is. Bij mest speelt eveneens de aanwezigheid van diergeneesmiddelen en hormonen. De toepasbaarheid van deze stromen voor de productie van PAK dient daarom in een vervolgfase te worden onderzocht.

FIGUUR 5.4

JAARLIJKSE HOEVEELHEID DROOGGEWICHT VAN VERSCHILLENDE (REST)STROMEN IN NEDERLAND



In Figuur 5.4 valt meteen op dat mest het grootste deel uitmaakt van al deze reststromen. In het onderzoek Tetra-project Biosorb is op laboratoriumschaal geëxperimenteerd met de productie van biochar uit varkensmest via pyrolyse. Waarbij vervolgens de biochar geactiveerd is tot actiefkool. De resultaten uit dit onderzoek zijn in Tabel 5.6 opgenomen (K. Sniegowski, 2016).

TABEL 5.6

RESULTATEN UIT TETRA-PROJECT BIOSORB. BRON: (K. SNIEGOWSKI, 2016)

Parameter	Eenheid	Waarde
Ruwe varkensmest	% DS	5
Gedroogde varkensmest	% DS	70
Conversiefactor natte naar droge varkensmest	-	0,071
Conversie droge varkensmest naar actiefkool	kg actiefkool/ton gedroogde varkensmest	175
Activatie-efficiëntie op drogestofbasis	%	17,5

Op basis van de uitgangspunten in Tabel 5.6 is de theoretische potentie van actiefkoolproductie uit mest berekend. Hierbij is er dus het uitgangspunt genomen dat het drogestofgehalte van Nederlandse mest en de conversie van alle soorten mest gelijk is aan de uitgangspunten in Tabel 5.6. Met een productie van 78.000 kton mest in Nederland zou er theoretisch 975 kton actiefkool per jaar gemaakt kunnen worden uit mest. Hiervoor is het noodzakelijk dat de mest wordt gedroogd alvorens te worden verwerkt tot actiefkool.

Als het in de praktijk mogelijk is om een product met de eigenschappen van actiefkool te produceren uit mest dan biedt dit perspectief voor zowel het mestoverschot als het tekort aan duurzame actiefkool. Diverse firma's bieden thermische verwerkingsinstallaties aan waarbij gedroogde mest omgezet wordt in een product met de eigenschappen van actiefkool. Voorbeelden hiervan zijn de firma's PYREG en Mavitec. De Nederlandse firma Mavitec heeft recent door de universiteit van Wageningen actiefkool uit varkensmest laten testen voor de verwijdering van micro verontreinigingen. De resultaten van dit onderzoek zijn momenteel nog niet beschikbaar.

Andere interessante reststromen zijn houtachtige fracties die vrijkomen bij compostering. Een voorbeeld zijn de houtfracties die door Attero na compostering uit het GFT en snoeiafval gezeefd worden. De houtachtige fractie in groenafval en groencompost wordt nu al veel toegepast in biomassa energiecentrales; zoals te zien in Figuur 5.5 is de productie van actiefkool (recycling) een meer hoogwaardige toepassing dan verbranden (energie) of storten. Deze fractie heeft een hoog drogestofgehalte en een hoge calorische waarde maar omdat de fractie vervuild is met plastic kan deze niet hoogwaardig worden afgezet. Als deze reststroom opgewerkt kan worden tot actiefkool is dit voor Attero interessant omdat er geen voordroging noodzakelijk is en er een hoogwaardig product gecreëerd wordt. Van hout is reeds bekend dat dit een zeer geschikte grondstof is voor de productie van actiefkool.

FIGUUR 5.5 LADDER VAN LANSINK; BRON RECYCLING.NL



## 5.5 RESULTATEN

In dit hoofdstuk is de potentiële beschikbaarheid van organische reststromen in Nederland in kaart gebracht. De kwaliteit van de reststromen, de geschiktheid voor opwaardering tot poederkool en de effectiviteit van de geproduceerde poederkool is nog niet verkend. Zo is bermgras ruim beschikbaar maar vereisen de schommelingen over de seizoenen, transportafstanden, variërende samenstelling en de noodzaak tot drogen een complexe en kostbare logistiek (bron George Zoutberg, HHNK). En daarnaast moet de opwerking naar poederkool en de effectiviteit voor de verwijdering van gidsstoffen nog worden vastgesteld.

Mest bevat naast zware metalen ook medicijnresten en hormonen wat de toepassing op rwzi's in de weg kan staan. Het voordeel van mest is dat het continue in grote hoeveelheden vrijkomt. Het opwerken van mest tot actiefkool kan als onderdeel van een toekomstige en duurzamere mestverwerking daarom interessant zijn. In een vervolgonderzoek moeten de kansen voor actiefkoolproductie uit mest verder worden verkend.

Los van de problemen die optreden bij de opwerking van organische reststromen tot actiefkool is in dit hoofdstuk aan de hand van omzettingsrendementen berekend hoeveel PAK theoretisch geproduceerd kan worden uit beschikbare organische reststromen. Dit is gedaan om inzicht te krijgen in het potentieel van de verschillen reststromen. Voor de reststromen zeefgoed, bermgras en mest zijn indicatieve omzettingsrendementen beschikbaar. Voor deze drie reststromen is de potentiële PAK productie in kaart gebracht in Figuur 5.6. Ook de totale theoretische PAK behoefte voor de behandeling van al het Nederlandse afvalwater is in dit figuur opgenomen. Geconcludeerd wordt dat de beschikbare hoeveelheid mest in theorie meer dan



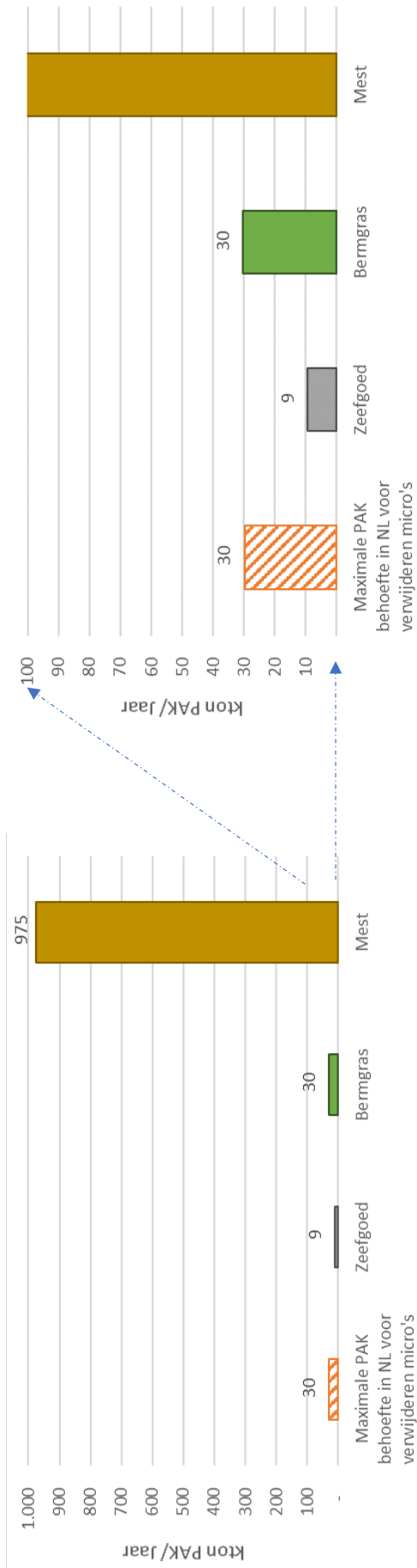
voldoende groot is om het totale theoretische PAK verbruik voor de verwijdering van micro verontreinigingen te dekken. Bermgras kan in theorie in 100% van de PAK behoefte voorzien en zeefgoed in 30%.

Omdat er in de praktijk een grote variëteit aan reststromen bestaat kan niet zonder meer worden beoordeeld of een organische reststroom geschikt is voor de productie van een poederkool. Mest is bijvoorbeeld beschikbaar als drijfmest (laag drogestofgehalte) of als gedroogd product. De diversiteit, beschikbaarheid en geschiktheid van de verschillende reststromen dient in een vervolgonderzoek nader in kaart gebracht te worden. Ook de huidige toepassing van de reststromen is van belang. Het merendeel van de Nederlandse mest wordt bijvoorbeeld nuttig toegepast als meststof op het land en bermmaaisel komt ten goede aan de bodemkwaliteit als de organische stof en nutriënten terug gebracht worden in de bodem.

Op basis van de ladder van Lansink kan beoordeeld worden welke toepassing van een reststroom de meeste toegevoegde waarde oplevert. Aan de hand van een beslismodel te maken of LCA analyses uit te laten voeren waarmee onderbouwde keuzes gemaakt kunnen worden.

Voor zeefgoed wordt aanbevolen om aan de hand van een businesscase en value case te bepalen wat de totale kosten en baten zijn voor het opwerken van zeefgoed tot PAK gevolgd door dosering op de rwzi. De ervaringen van Vallei en Veluwe met het pyrolyseren van zeefgoed op de rwzi Ede kunnen hier voor als uitgangspunt gebruikt worden.

FIGUUR 5.6 BENODIGD VERSUS THEORETISCH POTENTIEEL AAN PAK UIT RESTSTROMEN



# 6

## CONCLUSIES

Op basis van deze haalbaarheidsstudie zijn de prestaties van niet-fossiele PACAS samengevat en vergeleken met PACAS, O<sub>3</sub>+zandfiltratie en referentie GAK.

	Eenheid	PACAS	O <sub>3</sub> +ZF	GAK	PACAS niet-fossiel
CO <sub>2</sub> footprint	gram CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	115	128	325	64 – 127 *, **
Kosten	EUR / m <sup>3</sup>	0,046	0,17	0,26	0,042 – 0,058
Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W	%	70 – 75	80 – 85	80 – 85	70 – 75

\* op basis van Figuur 4.2 (hoge yield en inefficiënt activatieproces). Indien een lage yield of een efficiëntere activatie wordt gehanteerd valt de CO<sub>2</sub>-footprint hoger of lager uit

\*\* CO<sub>2</sub> footprint van commercieel beschikbaar niet-fossiele PAK's bedraagt 64 – 103 gram CO<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>. Zeefgoed PAK resulteert voor deze studie in een CO<sub>2</sub> uitstoot van 127 gram omdat deze PAK een laag verwijderingsrendement heeft waardoor er relatief veel gedoseerd moet worden

De **hoofdconclusie** die op basis van deze studie wordt getrokken luidt: **het is kosten effectief mogelijk om het PACAS proces te verduurzamen door de inzet van niet-fossiele PAK.**

De sub conclusies van deze studie worden navolgend per thema besproken.

### Laboratorium testen

Er zijn sorptietesten uitgevoerd met 9 geselecteerde poederkolen van niet fossiele herkomst en 1 referentiekool, gebruikmakend van effluent van RWZI Horstermeer. Voor alle poederkolen was de toegepaste dosering 20 mg/l effluent. Alle 19 geanalyseerde microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaat-gidsstoffen) zijn boven de rapportagegrens aangetroffen in het effluent en dus alle gebruikt om de efficiëntie van de poederkolen voor de verwijdering van microverontreinigingen te bepalen en te vergelijken met de referentiekool. De resultaten laten het volgende zien.

- Voor drie kolen was de verwijdering van alle stoffen tenminste net zo hoog als die van de referentiekool. Voor enkele stoffen geldt dat het verwijderingsrendement zelfs net iets hoger was dan voor de referentiekool. Deze kolen zijn dus tenminste net zo effectief in de verwijdering van deze 19 microverontreinigingen uit RWZI effluent als de referentiekool.
- Voor twee kolen was het gemiddelde verwijderingsrendement met 84% en 82% iets lager dan die van de referentiekool (86%). De effectiviteit van deze kolen is dus voor enkele stoffen iets lager, maar over het algemeen is het redelijk goed vergelijkbaar met de referentiekool.
- De verwijdering met de overige vier kolen (waaronder de kolen uit pitten van steenvruchten en zeefgoed) is lager dan de referentiekool, met name voor bepaalde individuele stoffen. De effectiviteit van deze kolen is duidelijk lager dan de referentiekool, de mate waarin verschilt per type kool. Hierbij wordt opgemerkt dat de kolen gemaakt van pitten van steenvruchten en zeefgoed afkomstig zijn uit een nieuw proces. De productie van deze PAK is niet geoptimaliseerd, wellicht dat er nog optimalisaties mogelijk zijn die leiden tot beter adsorptiegedrag.

*CO<sub>2</sub>footprint*

Doordat informatie over het productieproces van de verschillende typen PAK beperkt beschikbaar was, bleek het niet mogelijk een gedetailleerde CO<sub>2</sub>-footprint vast te stellen van niet-fossiele PAK's. Daarom is de CO<sub>2</sub>-footprint opgesteld voor een standaard proces van carbonisatie en activatie (worst case benadering), waarbij onderscheid is gemaakt tussen opbrengst (yield), drogestofgehalte van de grondstof en productielocatie. Na het type grondstof levert het activatieproces de grootste bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-footprint. Alternatieve activatieprocessen kunnen de CO<sub>2</sub>-footprint van niet fossiele PAK met de helft reduceren.

De berekende CO<sub>2</sub>-footprint voor niet-fossiele PAK varieert tussen 4 en 7 kg CO<sub>2</sub>/kg PAK (bij hoge yield), afhankelijk van de grondstof. De duurzaamste PAK zullen dus vooral een energie-efficiënt activatieproces hebben en een grondstof gebruiken waaruit een hoge yield te behalen is. Voor de referentiekool (PAK uit steenkool) is de gehanteerde footprint 9,6 kg CO<sub>2</sub>/kg PAK (Mulder M. , 2019)<sup>3</sup>. Deze waarden komen goed overeen met de eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-19).

Alle onderzochte alternatieve grondstoffen presteren per kilo kool substantieel beter qua CO<sub>2</sub>-footprint dan de steenkool gebaseerde kolen. Om tot een totale duurzaamheidsscore per kool te komen moet echter ook het verwijderingsrendement van de kolen op gidsstoffen meegewogen worden, omdat de benodigde dosering daar mee samen hangt. Hier wordt bij de vertaling naar de 100.000 i.e. case nader op ingegaan.

Het verschil tussen de niet-fossiele PAK's op basis van hout is klein. Kolen op basis van kokoschalen, MDF-afval, snoeiafval en pitten van steenvruchten lijken een iets lagere CO<sub>2</sub>-footprint te hebben dan hout. PAK uit zeefgoed heeft een iets hogere CO<sub>2</sub>-footprint per kg PAK, doordat de opbrengst relatief laag is. De CO<sub>2</sub>-footprint is echter nog steeds lager dan die van PAK uit steenkool. Het grote effect van de yield en het gebruikte activatieproces in de gevoeligheidsanalyse, laat zien dat gedetailleerdere input van de leveranciers de kwaliteit van de CO<sub>2</sub>-footprint sterk kan verbeteren. In hoofdstuk 7 wordt hier verder op in gegaan. In zijn algemeenheid kan geconcludeerd worden dat de duurzaamste PAKs vooral een energie-efficiënt activatieproces hebben en een grondstof gebruiken waaruit een hoge yield te behalen is.

*Vertaling naar 100.00 i.e. case*

De vertaling van de labresultaten naar een rwzi van 100.000 i.e. heeft de volgende inzichten opgeleverd:

- De kosten van toepassing van de kolen van niet fossiele herkomst kunnen lager of hoger uitvallen, ten opzichte van de referentie (Chemviron Pulsorb WP235). De kosten van MAR-300 (Carbon Activated) bedragen 4,2 eurocent per m<sup>3</sup> en zijn daarmee lager dan de 4,6 cent per m<sup>3</sup> van Pulsorb WP235 (referentie). In de andere gevallen zijn de kosten van niet fossiele kolen gelijk of hoger doordat enerzijds de meeste kolen duurder zijn dan de referentiekool. Anderzijds doordat naar verwachting meer gedoseerd moet worden voor eenzelfde verwijderingsresultaat
- De uitstoot van niet hernieuwbare CO<sub>2</sub> zal met circa 40% omlaag gaan bij het gebruik van het merendeel van de geteste kolen
- De toepassing van PAK uit zeefgoed zal met de nu geteste kool (met hoge asrest) leiden tot een verhoging van de uitstoot van CO<sub>2</sub>

3 Overigens worden in literatuur hogere waarden gerapporteerd voor steenkoolgebaseerde actief kool, zoals 18 kg CO<sub>2</sub>/kg actiefkool in (Gu, Bergman, Anderson, & Alanya-Rosenbaum, 2018) en 11 kg CO<sub>2</sub>/kg actiefkool in 'Economical and ecological comparison of granular activated carbon adsorber refill strategies, Bayer et al, 2005.

*Inventarisatie reststromen*

In hoofdstuk 5 is de potentiële beschikbaarheid van organische reststromen in Nederland geïnventariseerd. De kwaliteit van de reststromen en de geschiktheid voor opwaardering tot poederkool dient in een vervolgfase te worden vastgesteld. De volgende conclusies worden getrokken:

- Bermgras is ruim beschikbaar maar de schommelingen over de seizoenen, transportafstanden, variërende samenstelling en de noodzaak tot drogen vereisen een complexe en kostbare logistiek. Bermgras lijkt daarom geen kansrijke grondstof voor actiefkoolproductie
- Snoeiafval kent net als bermgras grote schommelingen over de seizoenen, vereist veel transportbewegingen en varieert sterk in samenstelling waardoor het opwerken tot actiefkool niet realistisch lijkt
- Mest is continue in grote hoeveelheden beschikbaar. Het opwerken van mest tot actiefkool kan als onderdeel van een toekomstige en duurzamere mestverwerking daarom interessant zijn. Aan mest kleven echter veel aspecten die onderzocht moeten worden voordat kool uit mest toegepast kan worden op rwzi's. De aanwezige verontreinigingen en nutriënten in mest mogen bijvoorbeeld niet via de kool in het afvalwater terecht komen. In een vervolgonderzoek moeten de kansen voor actiefkoolproductie uit mest daarom verder worden verkend.
- Los van de problemen die optreden bij de opwerking van organische reststromen tot actiefkool is aan de hand van omzettingsrendementen berekend hoeveel PAK theoretisch geproduceerd kan worden uit beschikbare organische reststromen. Dit is gedaan om inzicht te krijgen in het potentieel van de verschillen reststromen. Voor de reststromen zeefgoed, bermgras en mest zijn indicatieve omzettingsrendementen beschikbaar. Voor deze drie reststromen is de potentiële PAK in kaart gebracht. Geconcludeerd wordt dat de beschikbare hoeveelheid mest in theorie meer dan voldoende groot is om het totale theoretische PAK-verbruik voor de verwijdering van microverontreinigingen te dekken. Bermgras kan in theorie in 100% van de PAK-behoefte voorzien en zeefgoed in 30%.

# 7

## AANBEVELING EN VERVOLGONDERZOEK

### 7.1 AANBEVELING

In dit onderzoek is geconcludeerd dat PACAS met niet-fossiele PAK een duurzaam en doelmatig alternatief kan zijn voor PACAS met fossiele PAK. De volgende stap is om in de praktijk aan te tonen hoe niet-fossiele PAK zich gedraagt in de doseerinstallatie en in de rwzi.

De aanbeveling aan de waterschappen is daarom om op een full scale PACAS rwzi te kiezen voor niet-fossiele PAK.

### 7.2 VERVOLGONDERZOEK

Naast de in paragraaf 7.1 opgenomen aanbeveling om niet-fossiele PAK in te zetten op PACAS rwzi's zijn per deelaspect punten voor vervolgonderzoek benoemd.

*Kennishiaten naar aanleiding van de laboratoriumtesten*

Nu bekend is wat de effectiviteit is van de kolen bij dosering aan effluent wordt geadviseerd om de volgende zaken nader te onderzoeken:

- De effectiviteit van de PAK's bij dosering in actiefslib. Bij voorkeur gebeurt deze test op praktijkschaal bij PACAS-demo's in de Bijdrageregeling Zuivering Medicijnresten, zodat ook ondervonden kan worden hoe deze 'nieuwe' kolen zich in de dagelijkse praktijk gedragen.
- Verbetering van het activatieproces van zeefgoed. Voor het zeefgoed is aandacht nodig voor de kwaliteit (aandeel asrest) van het uitgangproduct. Hierbij is samenwerking nodig met een actiefkoolproducent. Dit onderzoek zou eveneens uitgevoerd kunnen worden voor bermmaaisel en snoeiafval.

*CO<sub>2</sub>footprint*

De CO<sub>2</sub>-footprintberekening is gebaseerd op openbaar beschikbare informatie, aannames en leveranciersinformatie voor zover beschikbaar was. Doordat leveranciersinformatie beperkt beschikbaar was is de gehanteerde CO<sub>2</sub>-footprint grotendeels gebaseerd op onderbouwde aannames. Meer gedetailleerde informatie, met name over de yield en het activatieproces, is nodig om een onderscheidende CO<sub>2</sub>-footprint te kunnen vaststellen. Ook de gebruikte energiebronnen en eventuele energierugwinning kunnen een substantieel effect hebben op de CO<sub>2</sub>-footprint.

De niet fossiele PAK's zitten in verschillende ontwikkelingsstadia: een deel is commercieel beschikbaar en dus min of meer uitontwikkeld. De PAK uit MDF-afval van Act&Sorb is in een vergevorderd ontwikkelingsstadium, maar doorgevoerde optimalisaties zijn in onvoldoende mate bekend om deze mee te kunnen nemen in de analyse. Ook hier kan aanvullende informatie de resultaten beïnvloeden. Het proces van PYREG, dat gebruik kan maken van diverse bronnen is nog volop in ontwikkeling, maar de decentrale manier van productie en de grote

hoeveelheid grondstoffen die behandeld kunnen worden hebben een nog nader te bepalen effect op de daadwerkelijke CO<sub>2</sub>-footprint. Dat geldt ook voor PAK-productie uit zeefgoed: hiervoor is nog geen specifiek proces geselecteerd.

#### *Organische reststromen*

- Bij het in kaart brengen van de organische reststromen zijn een aantal kennishiaten naar voren gekomen. Zoals de variatie in het (organisch)drogestof gehalte van verschillende reststromen zoals mest en snoeiafval en de bijbehorende omzettingsrendementen naar actiefkool. Daarnaast is over de geschiktheid van mest als bron voor actiefkool nog onvoldoende bekend. Om de geschiktheid van andere reststromen zoals mest en bermgras te beoordelen wordt aanbevolen om in een vervolgfase meer reststromen om te zetten naar PAK's en aanvullende laboratoriumtesten uit te voeren om het verwijderingsrendement op micro verontreinigingen vast te stellen. Daarbij dient ook de eventuele uitloging van verontreinigingen (zware metalen, hormonen, nutriënten) vanuit de kool naar de waterfase te worden onderzocht. Aanbevolen wordt om de database met effectiviteiten en GER-scores uit te breiden met kolen uit andere stromen, zoals maaisel, snoeihout en mest. Tot slot wordt aanbevolen een value case uit te voeren voor activatie van zeefgoed, maaisel en snoeiafval op rwzi locatie. De waterschappen kunnen op deze manier een deel van hun reststromen zelf (laten) opwaarderen tot een bruikbare grondstof voor een verbetering van de waterkwaliteit.

# BIBLIOGRAFIE

- (2020). Opgehaald van MDF-info: <http://mdf-info.eu/using-mdf/handling-and-storing/controlling-moisture-content?lang=nl>
- Alterra. (2015). *Droge vergisting van berm- en natuurgas*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- Arena, N. (2016). Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells.
- BTG. (2003). *Verkennen onderzoek naar mogelijkheden voor de inzet van bermgras in Overijssel voor duurzame energie-opwekking*. Enschede: Energiebureau Overijssel.
- CABOT. (2020). Personal communication.
- Cappelletti. (2014). Energy Requirement of Extra Virgin Olive Oil Production. *Sustainability* , 4966-4974.
- CBS. (2020, 02 26). CBS. Opgehaald van <https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2019/49/dierlijke-mest-en-mineralen-2018>
- centre, B. t. (2020). Opgehaald van [http://www.biomassradecentre2.eu/data/upload/D5\\_5\\_Manual\\_firewood\\_production\\_biohousing.pdf](http://www.biomassradecentre2.eu/data/upload/D5_5_Manual_firewood_production_biohousing.pdf)
- Encon. (2020). *CO2 berekening en vergelijking met de conventionele plant Act&Sorb V02.4*. Bilzen: Encon.
- FAO. (2020). Opgehaald van <http://www.fao.org/3/y3612e/y3612e03.htm#TopOfPage>
- Gu, H., Bergman, R., Anderson, N., & Alanya-Rosenbaum, S. (2018). Life Cycle Assessment of Activated Carbon from Woody Biomass. *Wood and Fiber Science*, 229-243.
- Innoliva. (2020). Opgehaald van <https://innoliva.com/innoliva-converts-45000-tons-of-olive-waste-into-biomass-as-long-as-possible/>
- K. Sniegowski, J. S. (2016, 12 2). Er zit meer in mest dan je denkt. *Boerenbond*, pp. 30-31.
- Mi Hyung Kim, I. T. (2018). Analysis of environmental impact of activated carbon production from wood waste. *Environmental Engineering Research*.
- Mochen Liao, S. K. (2020). Generating Energy and Greenhouse Gas Inventory Data of Activated Carbon Production Using Machine Learning and Kinetic Based Process Simulation. *ACS Sustainable Chem. Eng.*
- Mulder, M. (2019, 01 17). *Richtlijnen haalbaarheidsstudie onderzoeksprogramma microverontreinigingen uit afvalwater* . STOWA.
- Mulder, M. (2020). *Persoonlijke communicatie*.
- Nationaal Georegister. (2020, 2 26). Opgehaald van <https://nationaalgeoregister.nl/geonetwerk/srv/dut/catalog.search#/metadata/11d83e36-fd0d-46bc-838c-0567c5dfdb19>
- Rashid, M. H. (2016). *Electric Renewable Energy Systems*. Elsevier Inc.
- Rensmann, M. (2020). *Persoonlijke communicatie PYREG*.
- Rijkswaterstaat. (2020, 2 26). Opgehaald van <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2019/01/afvalverwerking-in-nederland-stabiel.aspx>



- RVO. (2018). *RVO GER-waarden en CO2-lijst 2018*. Opgehaald van <https://www.rvo.nl/file/ger-waarden-en-co2-lijst-augustus-2018xlsx-1>
- Screenap. (2017). *D4.3 Monitoring Report fijnzeven op rwzi Aarle-Rixtel, het effect van fijnzeven op het rwzi proces*.
- Screenap. (2017). *D4.3 Monitoring Report, Fijnzeven op rwzi Aarle-Rixtel*. WAM.
- STOWA. (2012). *GER-waarden en milieufactiescores productie van hulpstoffen in de waterketen, STOWA-rapport 2012-06*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2013). *Vezelgrondstof uit zeefgoed, rapport 2013-21*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2014). *Praktijkresultaten influent fijnzeef rwzi Blaricum*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2015). *Verkenning Pyrolyse/Carbonisatie zuiveringsslib en andere biomassa stromen, STOWA 2015-37*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2017). *Van Zeefgoed naar asfalt, VAZENA. STOWA 2017-19*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2018). *PACAS poederkooldosering in actiefslib voor verwijdering van microverontreinigingen. Onderzoek naar effectiviteit en efficiëntie op rwzi Papendrecht*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2019). *Influent fijnzeven in rwzi's*. Amersfoort: STOWA.
- STOWA. (2020). *Haalbaarheidsstudie duurzame alternatieven poeder actiefkool voor PACAS STOWA 2020-19*. Amersfoort: STOWA.
- Teresa Miranda, A. E. (2008). *Combustion Analysis of Different Olive Residues*. *Int J Mol Sci.*, 512-525.
- TU Delft. (2016). *Meer waarde uit de reststromen: Toekomstverkenning van mogelijkheden recycling reststromen uit voeding- en genotsmiddelen industrie*. Delft: TU Delft.
- WiseNederland. (2020, 2 26). *WisNederland, biomassa dossier*. Opgehaald van <https://wisenederland.nl/groene-stroom/dossier-biomassa-standalone>

## BIJLAGE 1

## LABORATORIUM TESTEN

## MATERIALEN EN METHODEN

## EFFLUENT

Voor de testen is effluent van RWZI Horstermeer gebruikt. Er was ongeveer 22 L nodig, en hiervoor zijn 24-uursdebietsproportionele monsters van 22-1-20 (4L), 25-1-20 (9L), 26-1-20 (9L) samengevoegd. Er is bemonsterd tijdens droogweeraanvoer. De testen zijn ingezet op 27-1-20 en 29-1-20. Gedurende de tijd tussen aanlevering en start van de testen is het effluent bij 4°C bewaard. Het effluent is gekarakteriseerd op de concentratie microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaat-gidsstoffen) en DOC (Tabel 8.1). Uit deze analyse volgt dat alle microverontreinigingen boven de rapportagegrens (RG) zijn aangetroffen.

TABEL 8.1 RESULTATEN VAN DE ANALYSES AAN HET EFFLUENT. VETGEDRUKTE STOFFEN ZIJN DE HUIDIGE 11 GIDSSTOFFEN, DE ANDERE STOFFEN ZIJN DE KANDIDAAT-GIDSSTOFFEN

Parameter	Eenheid	Effluent (t=0) (gemid. van 2 metingen)
DOC	mg/l	9,6
<i>Microverontreinigingen</i>		
<b>1,2,3-benzotriazool</b>	µg/l	4,75
<b>som 4- en 5-methybenzotriazool</b>	µg/l	1,05
amisulpride	µg/l	0,08
azitromycine	µg/l	0,56
candesartan	µg/l	0,26
<b>carbamazepine</b>	µg/l	0,48
citalopram	µg/l	0,16
<b>claritromycine</b>	µg/l	0,13
<b>diclofenac</b>	µg/l	0,75
furosemide	µg/l	2,50
gabapentine	µg/l	2,25
<b>hydrochloorthiazide</b>	µg/l	2,20
irbesartan	µg/l	3,45
<b>metoprolol</b>	µg/l	1,65
<b>propranolol</b>	µg/l	0,08
<b>sotalol</b>	µg/l	1,35
<b>sulfamethoxazol</b>	µg/l	0,36
<b>trimethoprim</b>	µg/l	0,15
venlafaxine	µg/l	0,41

## POEDERKOLEN

De poederkolen zijn aangeleverd door TAUW. In Tabel 8.2 zijn de poederkolen weergegeven. Twee kolen waren echter niet in poedervorm aangeleverd. Het Pyreg kool was granulair en het geactiveerde zeefgoed bestond voornamelijk uit brokstukjes. Om de vergelijking met de andere kolen zo eerlijk mogelijk te houden zijn deze twee kolen vermalen met een vijzel en vervolgens gezeefd door een 200 µm zeef<sup>4</sup>, om eventueel grotere deeltjes er nog uit te halen (zie ook de foto's in figuur 8.1).

TABEL 8.2

DE GESELECTEERDE POEDERKOLEN

Nr.	Poederkool
1	Chemviron Carbon Pulsorb WP235 (=PACAS referentiekool)
2	Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 µm
3	CarboTech PAK C 1000 C
4	Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300
5	Chemviron Acticarbon 2SW
6	Desotec Organosorb 200-1 WB
7	Jacobi Aquasorb G9
8	Oxbow OxPure SR #1407
9	Pyreg
10	Geactiveerd zeefgoed Wilp

FIGUUR 8.1

FOTO'S VAN PYREG (BOVEN) EN GEACTIVEERD ZEEFgoed (ONDER) VOOR EN NA VERMALEN



## UITVOERING SORPTIETESTEN

De poederkolen zijn getest bij 1 poederkooldosering: 20 mg/l. Deze dosering is in overleg met opdrachtgever vastgesteld. De relatief hoge concentratie is gekozen omdat voor (tenminste) een aantal kolen een lager rendement werd verwacht dan de referentiekool. Met deze hogere dosering kan naast de vergelijking met de referentiekool ook alvast worden bepaald of het rendement alsnog wel voldoende hoog kan zijn in het geval van toepassing van de PACAS-technologie of nageschakelde poederkooldosering op de RWZI.

4 Volgens richtlijnen van ASTM kunnen deeltjes die door een 80-mesh zeef (=177µm) komen geclassificeerd worden als poeder actiefkool (<https://www.astm.org/Standards/D5158.htm>).

De testen zijn in triplo uitgevoerd in 0,5 L Schott flessen. In elke fles is 0,5 L RWZI effluent afgewogen en vervolgens is 10 mg PAK toegevoegd. Na het afwegen van de kool zijn de flessen weggezet bij kamertemperatuur in een end-over-end shaker. De temperatuur was gemiddeld 23°C. Na 24 uur zijn de flessen van de shaker gehaald. De inhoud is gefiltreerd om de PAK te verwijderen en vervolgens is van elke fles een monster genomen voor analyse van microverontreinigingen en DOC. Er is een blanco met alleen RWZI effluent (zonder poederkool) meegenomen (in triplo) om te controleren of de waargenomen veranderingen in concentratie het gevolg zijn geweest van de toevoeging van de poederkool en niet van andere processen, zoals abiotische of biologische afbraak. De testen zijn uitgevoerd in twee series. De blanco's zijn over de twee series verdeeld, en voor aanvang van elke serie is een RWZI effluent monster genomen voor analyse van microverontreinigingen en DOC.

## ANALYSES

### *Microverontreinigingen*

De microverontreinigingen zijn geanalyseerd door Aqualysis (analysepakket 'lcms-gidsstoffen').

### *DOC*

De DOC is geanalyseerd met Shimadzu TNM-L ROHS TOC-L (NPOC methode) na filtratie van het monster over een 0.45 µm filter.

## VERWERKING MEETGEGEVENS

Voor elke testfles is het verwijderingsrendement uitgerekend, en daarna het gemiddelde van de triplo's. Ook is de bijbehorende standaarddeviatie tussen de triplo's uitgerekend. Indien een resultaat onder de rapportagegrens (RG) was, is de Volkert-Bakker methode (STOWA 2013-W01) toegepast om een waarde te berekenen. Hiervoor is als meetreeks steeds het resultaat van de triplo's gebruikt (bijv. als binnen een triplo 2 waardes onder de RG waren en 1 erboven, dan wordt de waarde voor een stof onder de RG:  $1/3 \cdot RG$ ).

Voor de berekening van het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 19 stoffen voor een bepaalde kool is het gemiddelde rendement per stof genomen, en vervolgens is het gemiddelde berekend van de 19 stoffen.

## RESULTATEN

### MICROVERONTREINIGINGEN

De resultaten zijn weergegeven in onderstaande grafieken (Figuur 8.2 tot en met Figuur 810). Hierin worden de verwijderingsrendementen van elke stof per poederkool vergeleken met die van de referentiekool en de blanco. De grafieken staan op volgorde van de prestatie van de kolen. De gemeten concentraties zijn opgenomen in de bijlage.

### *Referentiekool*

De verwijderingsrendementen in de testen met de referentiekool zijn hoog, zoals ook verwacht werd bij een dosering van 20 mg/l. 14 stoffen zijn voor meer dan 90% verwijderd. De overige vijf stoffen zijn minder goed met actief kool te verwijderen. Twee stoffen (diclofenac en irbesartan) zijn wel voor meer dan 70% verwijderd, sulfamethoxazol voor 44%, candesartan voor 32% en gabapentine voor slechts 16%. De gemiddelde verwijdering van alle 19 stoffen was 86%.

*Duurzame kolen*

De 9 duurzame kolen kunnen in 3 groepen worden ingedeeld.

Voor de kolen Oxbow OxPure SR #1407, Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 µm en Chemviron Acticarbon 25W geldt dat de verwijderingsrendementen tenminste even hoog zijn in vergelijking met de referentiekool. Voor enkele stoffen is het rendement zelfs net iets hoger (ong. 10-20%-punt hoger). Dit geldt voor de stoffen candesartan en irbesartan bij alle drie de kolen. Voor Act&Sorb geldt dit ook voor sulfamethoxazol en bij Oxbow OxPure daarnaast ook voor diclofenac.

Voor Jacobi Aquasorb G9 geldt dat het rendement over het algemeen vergelijkbaar is met de referentiekool, alleen voor de twee stoffen furosemide en sulfamethoxazole ligt het rendement iets lager (ong. 20%-punt voor beide stoffen). Het gemiddelde rendement van alle stoffen komt op 84%. Een vergelijkbaar beeld is waargenomen voor Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300, waarbij voor de stoffen clarithromycine en sulfamethoxazol het rendement ongeveer 20%-punt lager ligt en voor candesartan en irbesartan 10%-punt lager. Gemiddeld genomen voor alle 19 stoffen is het rendement voor deze kool 82%.

Voor de overgebleven actief kolen is voor meer individuele stoffen een duidelijk lager rendement ( $\geq 10\%$ ) waargenomen vergeleken met de referentiekool. Het gemiddelde rendement van de 19 stoffen komt daarmee ook lager uit.

Met CarboTec PAK C 1000 C ligt voor zes stoffen het verwijderingsrendement lager dan voor de referentiekool (20-40%-punt lager, met als uitschieter een verschil van 64%-punt voor clarithromycine). Gemiddeld genomen komt het rendement voor de 19 stoffen op 77%. Met Pyreg kool is voor acht stoffen het rendement lager dan voor de referentiekool (van 10 tot ruim 40%-punt). Gemiddeld genomen over alle stoffen komt het rendement op 75%, dus 11%-punt lager. Met Desotec Organosorb 200-1 WB is het rendement van 11 van de 19 stoffen lager (het verschil varieert van 10% tot ruim 60%-punt). Gemiddeld genomen over alle stoffen ligt het rendement 23%-punt lager, namelijk op 50%. Het laagste rendement is behaald met geactiveerd zeefgoed. Behalve voor propranolol, ligt het verwijderingsrendement voor alle stoffen lager (variërend van 10-90%-punt). Gemiddeld voor alle stoffen is het rendement 36%-punt lager. Voor propranolol is net als met de referentiekool een verwijdering van 100% behaald. Analyses door Cabot aan het geactiveerde zeefgoed laten zien dat dit kool een relatief hoog gehalte heeft en een laag specifiek oppervlak (48% as, en een specifiek oppervlak van 240 m<sup>2</sup>/g). Dit kan het lagere rendement verklaren.

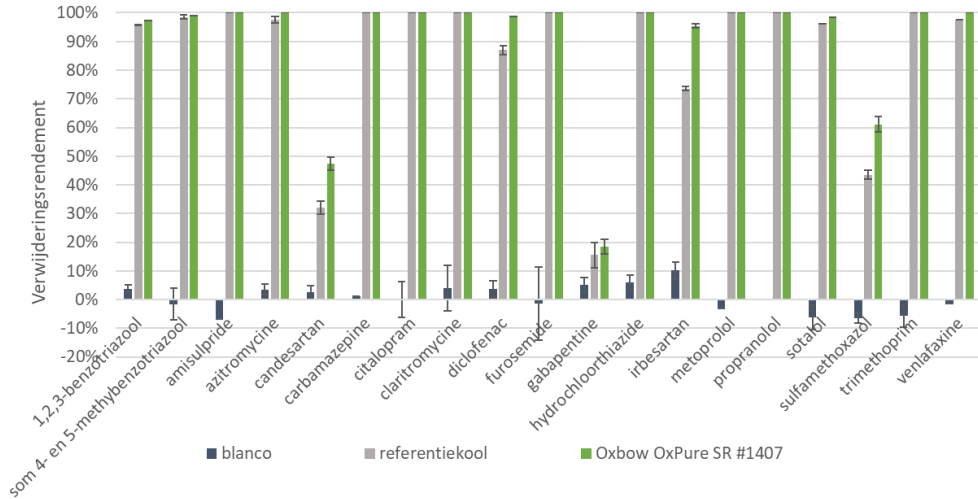
Over het algemeen volgt uit de resultaten dat er met name verschillen zijn tussen kolen voor stoffen die matig tot redelijk goed aan poederkool sorberen. Voor gabapentine geldt dat het met alle kolen zeer slecht wordt verwijderd, en dat er dus vrijwel geen verschil is tussen de kolen. Daarnaast zijn er microverontreinigingen met een hoge affiniteit voor actief kool. Deze worden met veel kolen voor meer dan 90% verwijderd bij 20 mg PAK/l, zoals: benzotriazol, som 4- en 5methylbenzotriazol, amisulpride, citalopram, metoprolol en propranolol.

*Blanco*

Met de blanco bepaling is gecontroleerd of er geen andere verwijdering van de microverontreinigingen dan sorptie aan actief kool plaats heeft gevonden (bijv. biologische afbraak). Uit de resultaten volgt dat er geen tot zeer weinig afname heeft plaatsgevonden in de blanco's. De gemiddelde verwijdering van de 19 stoffen in de blanco's is 0% (dus geen afname), en is maximaal 10%, in het geval van irbesartan (figuur 8.1).

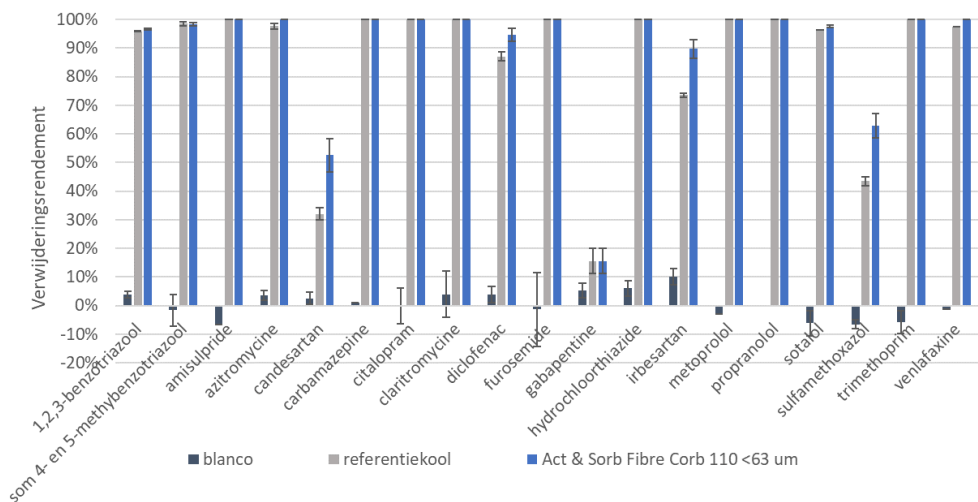
FIGUUR 8.2

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET OXBOW OXPURE SR #1407



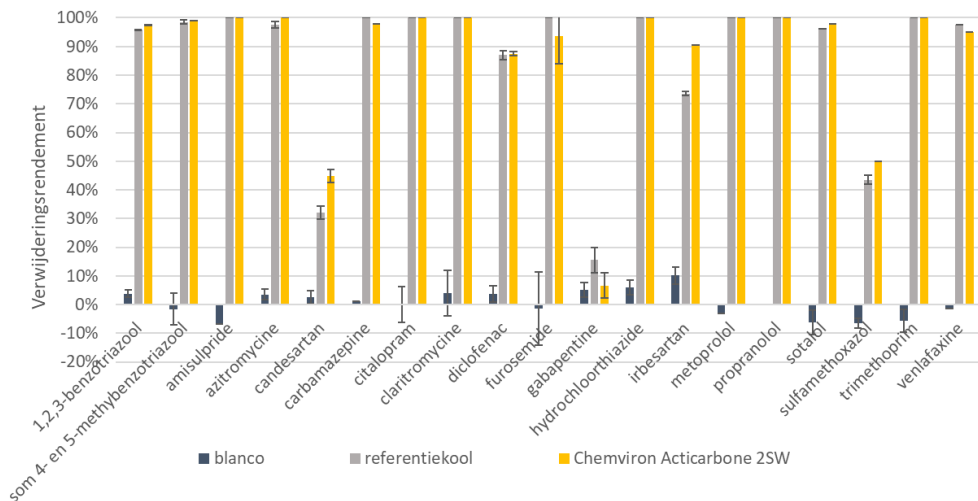
FIGUUR 8.3

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET ACT&SORB FIBRECARB® 110 <63 M



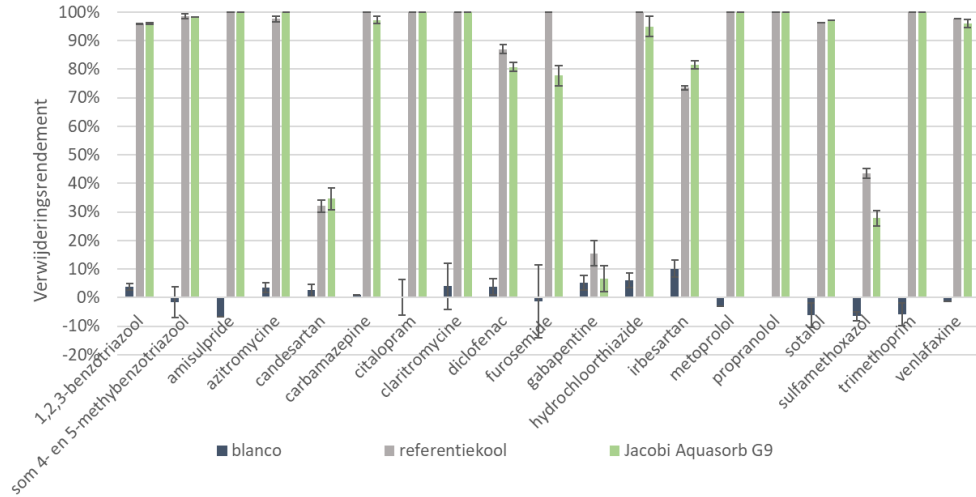
FIGUUR 8.4

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET CHEMVIRON ACTICARBONE 25W



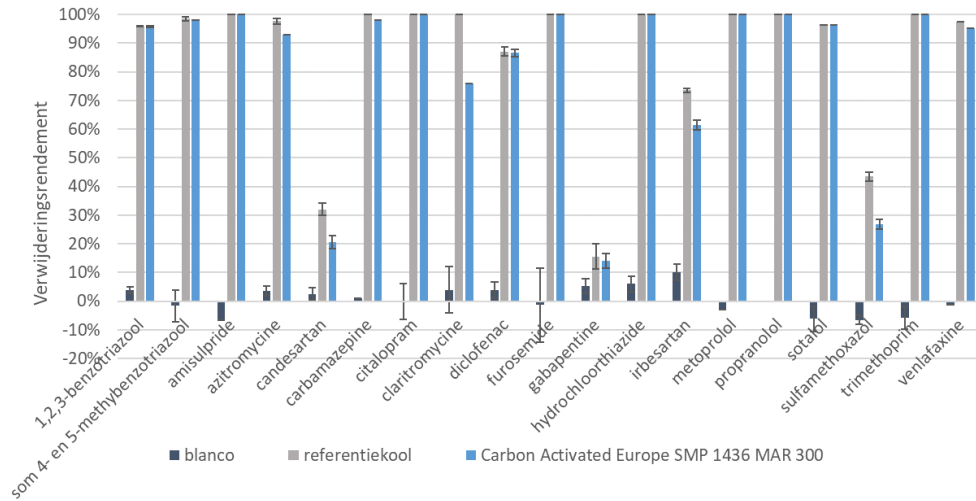
FIGUUR 8.5

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET JACOBI AQUASORB G9



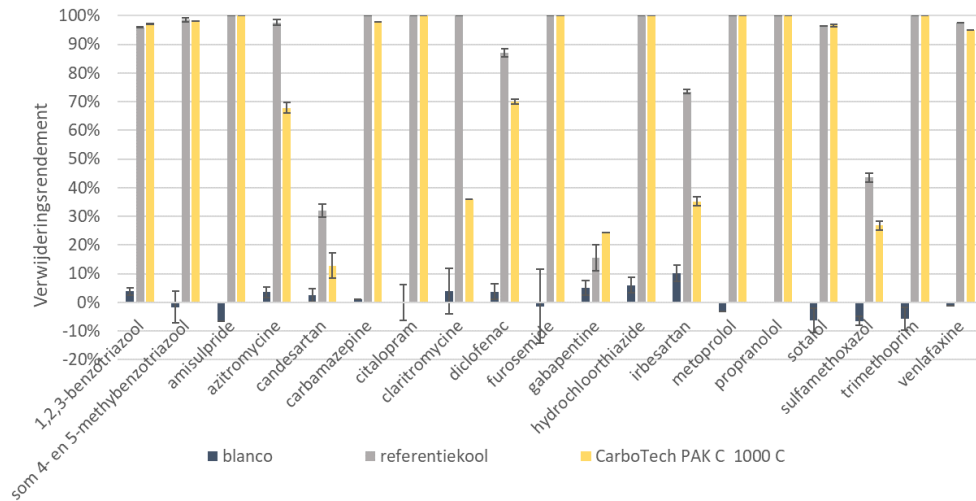
FIGUUR 8.6

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET CARBON ACTIVATED EUROPE SMP 1436 MAR 300



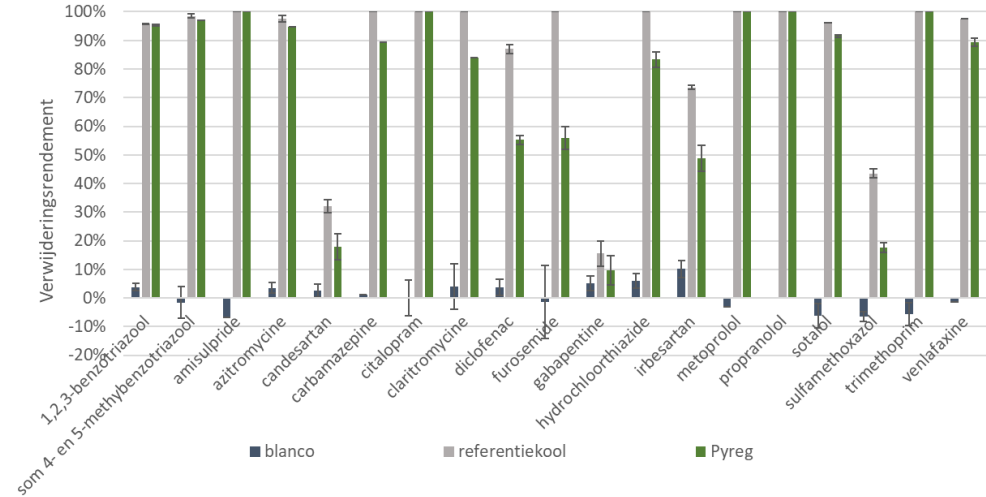
FIGUUR 8.7

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET CARBOTEC PAK C 1000 C



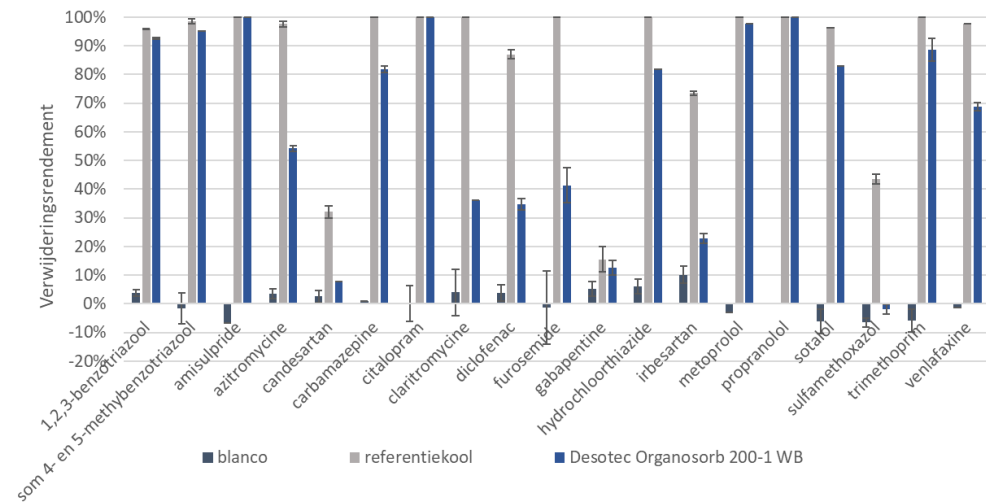
FIGUUR 8.8

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET PYREG KOOL



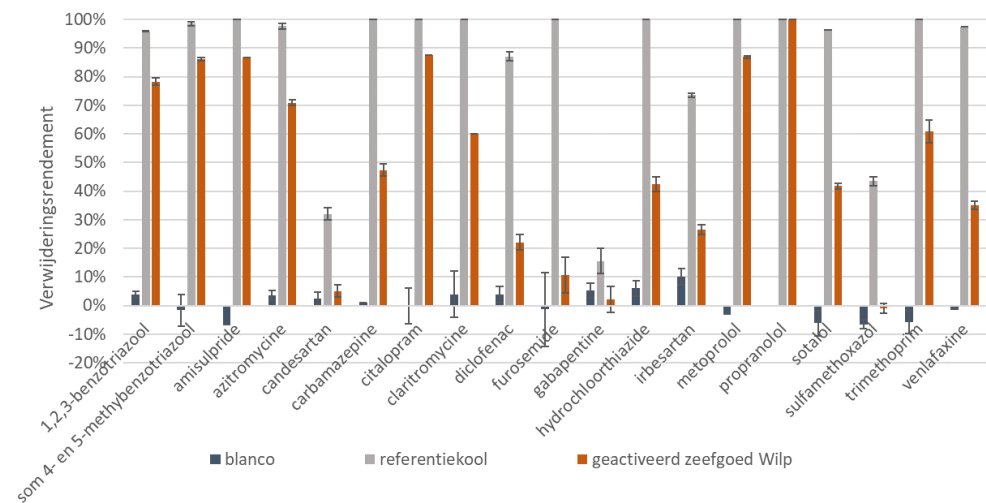
FIGUUR 8.9

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET DESOTEC ORGANOSORB 200-1 WB



FIGUUR 8.10

VERWIJDERING VAN DE MICROVERONTREINIGINGEN MET GEACTIVEERD ZEEFGOED





In Tabel 8.1 is het gemiddelde rendement per poederkool weergegeven over alle 19 geanalyseerde stoffen (gidsstoffen en kandidaat-gidsstoffen), en voor alleen de 11 gidsstoffen afzonderlijk. Ook is hierin het aantal stoffen aangegeven waarvan het rendement lager is ten opzichte van de referentie. Wat hierin opvalt is dat voor alle kolen, op één kool na, het verwijderingsrendement tenminste 70% is bij een dosering van 20 mg/l. En voor vier duurzame kolen is dit zelfs 90% of hoger. Hoewel de verwijdering van microverontreinigingen voor sommige kolen wel lager is dan de referentie, kan dus alsnog wel een aanzienlijk rendement worden behaald. Voor het geactiveerde zeefgoed ligt dit anders. Hiermee wordt geen 70% verwijdering behaald. Het rendement van de 11 gidsstoffen 57%.

Deze rendementen zijn gemeten in sorptietesten op labschaal met effluent van RWZI Horstermeer. Bij toepassing van het PACAS-concept zal in de praktijk de poederkool worden gedoseerd in het actief slib systeem. Dit kan de verwijdering beïnvloeden: er is dan waarschijnlijk meer poederkool nodig om hetzelfde rendement te behalen.

TABEL 8.1 GEMIDDELDE VERWIJDERING VAN DE 19 GIDSSTOFFEN PER POEDERKOOL BIJ EEN DOSERING VAN 20 MG PAK/L

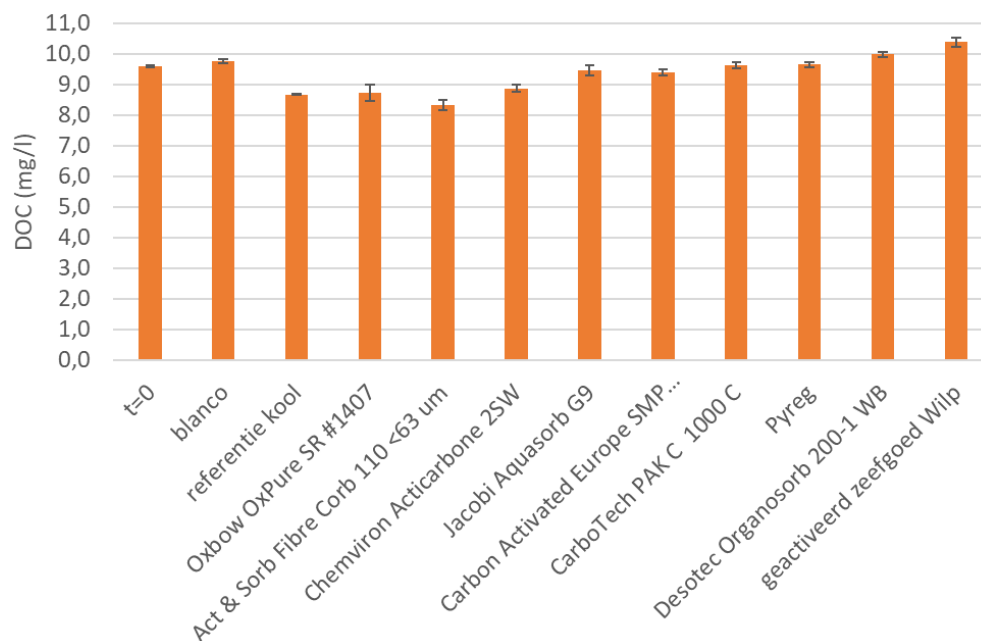
Nr.	Poederkool	Gemiddelde rendement over alle 19 stoffen (gidsstoffen en kandidaatstoffen)	Gemiddelde rendement over de 11 gidsstoffen	# stoffen $\geq$ 10% lager rendement t.o.v. referentie
0	Blanco zonder poederkool	0%	0%	
1	Referentie	86%	93%	
2	Act&Sorb FibreCarb® 110 <63 um	90%	95%	0
3	CarboTech PAK C 1000 C	77%	84%	6
4	Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300	82%	89%	4
5	Chemviron Acticarbon 2SW	87%	94%	0
6	Desotec Organosorb 200-1 WB	63%	72%	12
7	Jacobi Aquasorb G9	84%	90%	2
8	Oxbow OxPure SR #1407	90%	96%	0
9	Pyreg	75%	83%	8
10	geactiveerd zeefgoed Wilp	50%	57%	18

## DOC

Naast de microverontreinigingen is ook de DOC concentratie van de monsters bepaald. De DOC concentratie is bij aanvang 9,6 mg/l en in de blanco is deze na 24 uur met 9,8 mg/l vrijwel gelijk gebleven. Voor de meeste testen met poederkool is de DOC concentratie na afloop van de test lager dan in de blanco, hoewel de absolute verschillen klein zijn. In de referentiekool was de DOC concentratie afgenomen naar 8,7 mg/l. Voor de meeste andere kolen lag de DOC ook rond deze waarde of iets hoger, maar lager dan de blanco. Dit geldt niet voor Desotech Organosorb 2001- WB en het geactiveerde zeefgoed. Voor deze twee kolen was de DOC licht toegenomen naar 10,0 en 10,4 respectievelijk. Het beeld dat met de DOC afname wordt verkregen komt overeen met de resultaten van de microverontreinigingen: de kolen die de hoogste verwijdering in microverontreinigingen laten zien, laten ook een grotere afname in DOC zien.

FIGUUR 8.11

DE GEMIDDELDE DOC CONCENTRATIE OP T=0 EN NA 24 UUR VOOR DE TESTEN MET PAK EN DE BLANCO ZONDER PAK. DE STANDAARDDEVIATIE GEEFT DE SPREIDING TUSSEN DE TRIPLO'S WEER



## CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

### CONCLUSIE

Er zijn sorptietesten uitgevoerd met 9 geselecteerde duurzame poederkolen en 1 referentiekool, gebruikmakend van effluent van RWZI Horstermeer. Voor alle poederkolen was de toegepaste dosering 20 mg/l effluent. Alle 19 geanalyseerde microverontreinigingen (11 gidsstoffen en 8 kandidaat-gidsstoffen) zijn boven de rapportagegrens aangetroffen in het effluent en dus allen gebruikt om de efficiëntie van de poederkolen voor de verwijdering van microverontreinigingen te bepalen en te vergelijken met de referentiekool. De resultaten laten het volgende zien:

- Voor *Oxbow OxPure SR #1407*, *Act&Sorb FibreCarb<sup>®</sup> 110 <63 µm* en *Chemviron Acticarbon 2SW* was de verwijdering van alle stoffen tenminste net zo hoog als die van de referentiekool. Voor enkele stoffen geldt dat het verwijderingsrendement zelfs net iets hoger was dan voor de referentiekool. Deze kolen zijn dus tenminste net zo effectief in de verwijdering van deze 19 microverontreinigingen uit RWZI effluent als de referentiekool.
- Het gemiddelde verwijderingsrendement met de kolen *Jacobi Aquasorb G9* en *Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300* is met 84% en 82% respectievelijk iets lager dan die van de referentiekool (86%). Voor maximaal vier stoffen was er een verschil in verwijderingsrendement, maar dit verschil was niet groter dan 20%-punt. De effectiviteit van deze kolen is dus voor enkele stoffen iets lager, maar over het algemeen is het redelijk goed vergelijkbaar met de referentiekool.
- De verwijdering met de andere vier kolen is lager dan de referentiekool, met name voor bepaalde individuele stoffen. Voor *CarboTech PAK C 1000C* was het gemiddeld rendement van de 19 stoffen 77%, voor *Pyreg* kool was dit 75%, voor *Desotec Organosorb 200-1 WB* was dit 63% en het rendement met het *geactiveerde zeefgoed* was gemiddeld over de 19 stoffen 50%. De effectiviteit van deze kolen is dus duidelijk lager dan de referentiekool, de mate waarin verschilt per type kool.

**AANBEVELINGEN**

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Met de meest veelbelovende kolen een doseerreeks maken waarin het verwijderingsrendement bij verschillende doseringen wordt getest en vergeleken met de referentiekool (bijv. 5, 10, 15 mg/l).
- Praktijkonderzoek uitvoeren met een beperkt aantal kolen en doseringen om het verwijderingsrendement in de praktijk te bepalen.
- Onderzoeken of met de eigenschappen van de kolen, zoals specifiek oppervlak, deeltjes-grootteverdeling en as-gehalte, een verklaring te vinden is voor het verschil in prestatie op de verwijdering van microverontreinigingen. Van het geactiveerd zeefgoed zijn een aantal waardes reeds bekend, en deze kunnen de lagere effectiviteit wel verklaren.
- Het asgehalte van de kolen opvragen of bepalen, en voor de kolen die een hoog asgehalte hebben onderzoeken of er geen ongewenste stoffen oplossen in het water.
- Tijdens het inwegen van de kolen was opgevallen dat er (kleine) verschillen waren tussen de kolen, op het oog: de ene was wat lichter, en de andere compacter. Bij 1 kool was ook vermeld dat de deeltjes kleiner waren dan 63 µm. Een idee is om naar aanleiding hiervan te kijken of er verschil is in bezinksnelheid tussen de kolen, wat in het geval van toepassing van PACAS mogelijk relevant kan zijn.

**Bijlage: concentraties microverontreinigingen**

Concentraties microverontreinigingen in de sorptietesten. A, b en c zijn triplo's.

	t=0			blanco			Chemviran Carbon Pulsorb WP235			Act & Sorb Fibre Carb 1 10 <63 µm			CarboTech PAK C 1000 C			Carbon Activated Europe SMP 1436 MAR 300		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1,2,3-benzotriazol	4,9	4,8	4,8	4,5	4,8	0,2	0,2	0,19	0,16	0,15	0,17	0,14	0,13	0,13	0,21	0,19	0,21	
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	1,1	1	1,1	1,1	1	0,02	<0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
amisulpride	0,08	0,1	0,08	0,08	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
azitromycine	0,57	0,6	0,53	0,54	0,55	0,02	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,18	0,19	0,17	0,04	0,04	0,04	0,04
candesartan	0,27	0,3	0,25	0,26	0,25	0,18	0,18	0,17	0,12	0,11	0,14	0,24	0,22	0,22	0,21	0,2	0,21	0,21
carbamazepine	0,48	0,5	0,47	0,47	0,47	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
citalopram	0,16	0,2	0,15	0,17	0,18	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
claritromycine	0,13	0,1	0,13	0,12	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03
diclofenac	0,78	0,7	0,7	0,74	0,71	0,09	0,11	0,09	0,03	0,03	0,06	0,23	0,22	0,22	0,11	0,1	0,09	0,09
furosemide	2,3	2,7	2,9	2,3	2,4	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
gabapentine	2,3	2,2	2,1	2,2	2,1	2	1,8	1,9	1,8	2	1,9	1,7	1,7	1,7	1,9	2	1,9	2
hydrochlorothiazide	2,2	2,2	2,1	2	2,1	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
irbesartan	3,6	3,3	3,2	3,1	3	0,91	0,94	0,89	0,29	0,29	0,49	2,3	2,2	2,2	1,4	1,3	1,3	1,3
metoprolol	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
propranolol	0,08	0,1	0,08	0,08	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
sotalol	1,3	1,4	1,5	1,4	1,4	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
sulfamethoxazol	0,36	0,4	0,38	0,39	0,38	0,21	0,2	0,2	0,13	0,12	0,15	0,26	0,27	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26
trimethoprim	0,14	0,2	0,16	0,15	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
venlafaxine	0,42	0,4	0,41	0,41	0,41	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Concentraties microverontreinigingen in de sorptietesten. A, b en c zijn triplo's (vervolg).

	Chemviran Aclicarbone 2SW			Desotec Organosorb 200-1 WB			Jacobi Aquasorb G9			Oxbow OxPure SR #1407			Pyreg			geactiveerd zeefgoed Wilp		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1,2,3-benzotriazol	0,12	0,13	0,12	0,35	0,37	0,34	0,18	0,19	0,2	0,13	0,13	0,13	0,22	0,21	0,23	1,1	1	1
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,14	0,15	0,15
amisulpride	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
azitromycine	<0,01	<0,01	<0,01	0,26	0,25	0,26	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,03	0,03	0,17	0,16	0,16
candesartan	0,14	0,15	0,14	0,24	0,24	0,24	0,16	0,18	0,17	0,14	0,13	0,14	0,2	0,22	0,22	0,25	0,25	0,24
carbamazepine	0,01	0,01	0,01	0,09	0,09	0,08	0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,05	0,05	0,26	0,25	0,24
citalopram	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,02
claritromycine	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	0,08	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
diclofenac	0,09	0,1	0,09	0,49	0,5	0,47	0,13	0,15	0,15	0,01	0,01	0,01	0,34	0,32	0,34	0,66	0,58	0,6
furosemide	<0,05	<0,05	0,44	1,6	1,3	1,5	0,51	0,66	0,5	<0,05	<0,05	<0,05	1	1,1	1,2	2,2	2,4	2,1
gabapentine	2,1	2	2,2	2	2	1,9	2	2,1	2,2	1,8	1,8	1,9	1,9	2,1	2,1	2,1	2,2	2,3
hydrochlorothiazide	<0,2	<0,2	<0,2	0,4	0,4	0,4	<0,2	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,4	0,3	0,4	1,3	1,3	1,2
irbesartan	0,33	0,33	0,33	2,7	2,6	2,7	0,58	0,67	0,67	0,18	0,13	0,16	1,6	1,8	1,9	2,5	2,6	2,5
metoprolol	<0,02	<0,02	<0,02	0,04	0,04	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,22	0,21	0,22
propranolol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
sotalol	0,03	0,03	0,03	0,23	0,23	0,23	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,11	0,11	0,12	0,78	0,8	0,78
sulfamethoxazol	0,18	0,18	0,18	0,37	0,37	0,36	0,26	0,25	0,27	0,15	0,13	0,14	0,3	0,3	0,29	0,36	0,36	0,37
trimethoprim	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	0,06	0,05
venlafaxine	0,02	0,02	0,02	0,13	0,13	0,12	0,01	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,04	0,04	0,27	0,26	0,26

## BIJLAGE 2

## LEVERANCIERSINFORMATIE

Leverancier	Reactie
Act&Sorb	Act&Sorb heeft extern een CO <sub>2</sub> -footprintanalyse laten uitvoeren en hiervan de resultaten gedeeld. Deze is toegevoegd aan de grafieken ter referentie. In deze berekening zijn echter niet alle stappen meegenomen die wel voor de andere PAK-soorten zijn meegenomen.
Carbotech	Geen verdere informatie beschikbaar.
Carbon Activated Europe	“Waarden zijn zo dicht bij de realiteit als mogelijk.” “Of de waarden juist zijn is niet eenvoudig aan te geven, omdat weer een andere rekenmethode is gebruikt. Het aantal kg CO <sub>2</sub> per ton actiefkool is een ordegrootte onjuist vergeleken met wat Chemviron of andere bedrijven berekenen. Het probleem met een LCA is dat er veel methodes zijn, maar geen standaarden.”
Chemviron	
Desotec	“Desotec heeft hier verder geen vragen meer over en is alvast benieuwd naar het eindresultaat.”
Jacobi carbon	Voorgelegd in organisatie (juli 2020), geen snel antwoord te verwachten.
Puragen	Geen verdere informatie beschikbaar, niet mogelijk om te reageren op berekende waarde. Pyreg heeft meermaals gereageerd op de uitgangspunten van de berekening. Hierbij zijn verschillende waarden aangegeven. De ordegrootte komt overeen met de waarden gehanteerd in dit rapport.
Pyreg	