Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

HAALBAARHEIDSSTUDIE DUURZAME ALTERNATIEVEN POEDER ACTIEFKOOL VOOR PACAS



RAPPORT 2020 19

stowa

HAALBAARHEIDSSTUDIE DUURZAME ALTERNATIEVEN POEDER ACTIEFKOOL VOOR PACAS

RAPPORT 2020 19

ISBN 978.90.5773.886.9

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Amber Vergnes (Tauw)

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 Clervering-Loeffen (SWECO)
Cora Uijterlinde (STOWA)
Mirabella Mulder (Mirabella Mulder Waste Water Management)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2020-19
ISBN 978.90.5773.886.9

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

Er zijn kansrijke duurzame alternatieven voor Poeder Aktief Kool uit steenkool/bruinkool. Aanvullend laboratoriumonderzoek is echter nog noodzakelijk om de praktische haalbaarheid te testen.

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 micro verontreinigingen. Het innovatieprogramma is onderverdeeld in vijf verschillende thema's, waaronder het thema 'Actief-Poederkool'.

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

Op basis van interviews met marktpartijen en experts en literatuuronderzoek zijn duurzame PAK's geïnventariseerd waarna een shortlist is opgesteld met de negen meest kansrijke duurzame PAK's.
Belangrijke kenmerken van de duurzame PAK's zijn nog niet bekend, zoals het verwijderingsrendement op micro verontreinigingen en de benodigde dosering.

Op basis van het laboratoriumonderzoek kan vervolgens beoordeeld worden hoe de prestaties van duurzame PAK's zich verhouden tot de referentie PAK en kunnen conclusies getrokken worden over de kosten en duurzaamheid van duurzame PAK's. Deze resultaten dienen vervolgens in de praktijk getoetst te worden met full scale testen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

HAALBAARHEIDSSTUDIE DUURZAME ALTERNATIEVEN POEDER ACTIEFKOOL VOOR PACAS

INHOUD

TEN GELEIDE
DE STOWA IN HET KORT

1 INLEIDING 1
1.1 Aanleiding 1
1.2 Doel 2
1.3 Leeswijzer 2

2 METHODE 3

3 ACTIEF KOOL EN HET PACAS PROCES 4
3.1 Inleiding 4
3.2 Wat is actiefkool 4
3.3 Productie- en activeringsproces actiefkool 5
3.4 Fysische eigenschappen actiefkool 5
3.5 PACAS proces 6
3.6 Duurzaamheid 7

4 BESCHIKBARE POEDER ACTIEF KOLEN UIT HERNIEUWBARE GRONDSTOFFEN 9
4.1 Inleiding 9
4.2 Commercieel beschikbare poederkolen op basis van hernieuwbare grondstoffen 9
4.2.1 Longlist: overzicht beschikbare kolen en bijbehorende kosten 9
4.2.2 Verwijdering microverontreinigingen 10
4.2.3 CO_2-footprint 13
4.2.4 Vermindering ecotoxiciteit 16
4.2.5 Score duurzame-PAK's in vergelijking met referentiekool PACAS 16
4.3 Niet commercieel beschikbare duurzame-PAK's 16
4.3.1 Inleiding 16
4.3.2 Empyrion project 17
4.3.3 Pilot test in Baden Baden 17
4.3.4 Zeefgoed 18
4.3.5 Hergebruik beladen kool uit drinkwatersector 18
4.3.6 Industrieel gebruikte PAK 18
4.3.7 PYREG 18

5		SHORTLIST: KANSRIJKE DUURZAME-PAK'S	19
	5.1	Inleiding	19
	5.2	Van longlist naar shortlist	19
6		DOORVERTALING NAAR DE PRAKTIJK	23
	6.1	Inleiding	23
	6.2	Technology Readiness Level	23
	6.3	Dimensioneringsgrondslagen	24
	6.4	Inpassing in Nederlandse zuivering praktijk	24
	6.5	Kosten	25
		6.5.1 Uitgangspunten	25
		6.5.2 Jaarlijkse kosten	25
7		LEEMTEN IN KENNIS EN DOORKIJK NAAR VERVOLGFASE(S)	28
8		CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	30
9		BIBLIOGRAFIE	31
BIJLAGE 1		LIJST GERAADPLEEGDE EXPERTS	32
BIJLAGE 2		OVERIGE EIGENSCHAPPEN ACTIEF KOOL	33
BIJLAGE 3		EIGENSCHAPPEN VAN DE COMMERCIEEL BESCHIKBARE KOLEN	34
BIJLAGE 4		RESULTATEN UIT HET EMPYRION I PROJECT	37
BIJLAGE 5		JAARLIJKSE KOSTEN BEREKENING	38

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

In het recent afgeronde PACAS-project (STOWA 2018-02) is op praktijkschaal de verwijdering van microverontreinigingen met behulp van poederkooldosering in het actiefslib systeem aangetoond. Geconcludeerd is dat PACAS (Powdered Activated Carbon in Activated Sludge, in het Nederlands: poederactiefkool in actiefslib) een kosteneffectieve techniek is, waarmee de concentratie microverontreinigingen en dus ook de toxicologische impact op het oppervlaktewater gereduceerd kan worden. Voor RWZI 's met een omvang van 100.000 i.e. bedragen de kosten 0,03-0,06 EUR/m^3. Deze zijn gering in vergelijking met andere bewezen technieken als granulair actiefkool filtratie (circa 0,26 EUR/m^3) en ozonisatie met biologische nabehandeling (0,17 EUR/m^3). In het PACAS-onderzoek zijn er echter ook enkele aandachtspunten naar voren gekomen die nader onderzocht moeten worden.

Een belangrijk aandachtspunt is de verduurzaming van de te gebruiken actieve kool. De poederactiefkool die geschikt is voor deze toepassing die nu wordt toegepast, is van fossiele oorsprong en levert daarmee door de CO_2-emissie een negatieve bijdrage aan het klimaat. Dit duurzaamheidsknelpunt komt ook naar voren in de rapportage "Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater" (STOWA, 2017-36). De CO_2footprint is een veelgebruikte maat voor duurzaamheid van verschillende actiefkool-toepassingen. De CO_2-footpint van PACAS, wordt voornamelijk bepaald door de fossiele herkomst van poederkool. PACAS brengt 122 g CO_2/m^3 behandeld afvalwater met zich mee. Bij de verdere implementatie van PACAS is het daarom van belang om de toepassing van duurzamere poederkoolsoorten te verkennen.

In het PYREG-project (STOWA, 2015-37) is een verkennend onderzoek uitgevoerd naar het carboniseren/pyrolyseren van zuiveringsslib en andere soorten biomassa. Gecarboniseerd zuiveringsslib bleek wegens het lage ligninegehalte niet geschikt voor goede adsorptie, maar bermmaaisel en snoeiafval bleken kansrijk. Recente experimenten van Waterschap Vallei en Veluwe laten zien dat bij het carboniseren van zeefgoed een kool ontstaat die na activatie een goed verwijderingsrendement oplevert voor medicijnresten. Deze producten zijn (in principe) breed beschikbaar en bieden dus kansen als alternatieve grondstof voor actiefkool in plaats van steenkool.

Verduurzaming van actiefkool is mogelijk door grondstoffen van niet-fossiele herkomst voor de productie van poederkool te gebruiken ('duurzame-PAK'). Hierbij kan worden gedacht aan hout, organische reststromen, duurzaam geproduceerde biomassa, mest, cellulose uit zeefgoed en zuiveringsslib. Daarnaast is ook het hergebruik van beladen granulair- en poederkool uit de drinkwaterbereiding een duurzaam alternatief.

1.2 DOEL

Deze haalbaarheidsstudie is een onderdeel van het innovatieprogramma microverontreinigingen uit afvalwater. Het doel van deze studie is om de beschikbaarheid en kenmerken van duurzame-PAK te verkennen. Hiertoe is het nodig om de tot nu toe beschikbare kennis te bundelen en te achterhalen welke duurzame poederkolen op dit moment beschikbaar zijn. In dit rapport wordt een lijst met duurzame alternatieven voor actiefkool uit steenkool opgesteld (longlist). Het gaat om PAK's uit hernieuwbare bronnen (duurzame PAK's), daarbij wordt onder meer gekeken naar het verwijderingsrendement en de kosten van de kolen. Op basis van grondstof, de kosten en informatie over het verwijderingsrendement is vervolgens een shortlist opgesteld met duurzame PAK's. Deze duurzame PAK's kunnen in een eventuele vervolg studie in een afvalwatermatrix getest worden op lab (fase 2) en/of pilot (fase 3) schaal.

1.3 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 beschrijft de in dit onderzoek gebruikte methode. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 achtergrondinformatie over actiefkool en het PACAS proces. Wat is actiefkool? Hoe wordt het geproduceerd en wat zijn de fysische eigenschappen van de kool? En wat bepaalt de duurzaamheid? Daarna beschrijft hoofdstuk 4 welke duurzame-PAK's beschikbaar zijn en is op basis van beschikbare informatie een longlist opgesteld. Aan de hand van een multi criteria analyse is de longlist is in hoofdstuk 5 terug gebracht tot een shortlist. In hoofdstuk 6 volgt een doorvertaling naar de praktijk waarna in hoofdstuk 7 de leemten in kennis en een doorkijk naar de vervolgfase(s) volgen. Ten slotte worden in hoofdstuk 8 conclusies getrokken.

2 METHODE

In deze haalbaarheidsstudie zijn op basis van literatuuronderzoek en expert interviews commercieel beschikbare duurzame-PAK's geïnventariseerd en vergeleken met de kool die bij PACAS is toegepast.

Allereerst is een inventarisatie uitgevoerd naar nationale en internationale experts op het gebied van actiefkool en duurzame koolsoorten. Het gaat hierbij om kennisinstituten, actiefkoolproducenten en bedrijven die ervaring hebben met duurzame PAK's. Specifiek in relatie tot de verwijdering van microverontreinigingen. Deze experts zijn telefonisch geïnterviewd. In Bijlage 1 is een lijst opgenomen met de geraadpleegde experts. Daarnaast is een literatuuronderzoek uitgevoerd.

Op basis van de interviews en het literatuuronderzoek is een achtergrond hoofdstuk opgesteld. Hierin wordt beschreven wat actiefkool is, hoe het geproduceerd wordt, wat de fysische eigenschappen van de kool zijn en welke aspecten invloed hebben op de duurzaamheid van de kool. Op basis van interviews met leveranciers is vastgesteld welke kolen uit hernieuwbare bronnen op dit moment (commercieel) beschikbaar zijn. Deze duurzame PAK's zijn opgenomen in een longlist. Voor deze kolen is getracht zoveel mogelijk informatie in kaart te brengen.

De beschikbare kolen zijn getoetst op de criteria uit het recent verschenen document: Richtlijnen haalbaarheidsstudie onderzoeksprogramma microverontreinigingen uit afvalwater (23 april 2019, Mirabella Mulder). Duurzame-PAK wordt hiertoe vergeleken met het PACAS concept op basis van actiefkool uit steenkool op de aspecten:

- CO_2-footprint
- Kosten
- Verwijdering van microverontreinigingen op basis van gidsstoffen Ministerie I&W
- Vermindering ecotoxicologische risico's voor lozing van rwzi-effluent in het watermilieu

Uit de longlist met beschikbare kolen is een selectie gemaakt van de meest kansrijke duurzame-PAK's (shortlist) waarbij zowel commercieel beschikbare als niet-commercieel beschikbare duurzame PAK's geselecteerd zijn. Deze niet-commercieel beschikbare PAK's zijn geproduceerd uit lokaal beschikbare organische reststromen zoals snoeiafval.

Er zijn een aantal leemten in kennis geïdentificeerd, deze staan beschreven in hoofdstuk 7. Daarnaast is er in dit hoofdstuk een doorkijk naar de vervolgfase(s) gegeven.

3

ACTIEF KOOL EN HET PACAS PROCES

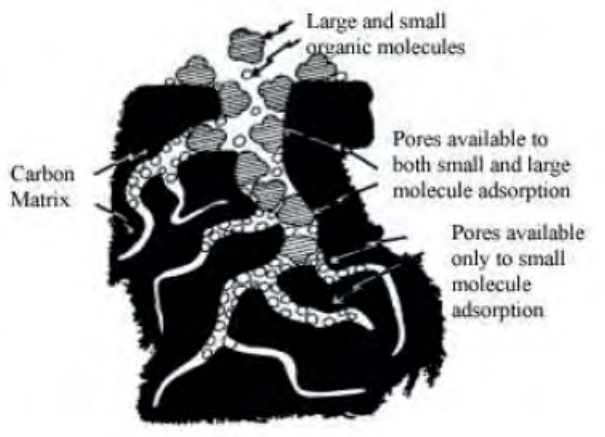
3.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk gaat nader in op het gebruik van actiefkool voor de verwijdering van microverontreinigingen. Daarbij wordt ook het PACAS proces nader toegelicht. Eerst wordt beschreven wat actiefkool is in paragraaf 3.2. Vervolgens beschrijft paragraaf 3.3 het productie en activeringsproces van actiefkool. Daarna worden de fysische eigenschappen van actiefkool besproken in paragraaf 3.4 en gaat paragraaf 3.5 nader in op het PACAS proces. Ten slotte wordt in paragraaf 3.6 ingegaan op de duurzaamheid. De informatie in dit hoofdstuk is gebaseerd op literatuuronderzoek en expertinterviews.

3.2 WAT IS ACTIEFKOOL

Actiefkool is (verkoold) koolstofrijk materiaal wat een bewerkingsstap heeft ondergaan. Via een chemische of thermische bewerkingsstap wordt het verkoolde materiaal geactiveerd waardoor er een groot aantal zeer fijne poriën in de kool ontstaan. De kool heeft hierdoor een groot specifiek oppervlak waaraan stoffen kunnen adsorberen. In Figuur 3.1 is een schematische weergave te zien van de adsorptie aan actieve kool.

FIGUUR 3.1 **SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN ADSORPTIE AAN ACTIEFKOOL. DEZE WEERGAVE BETREFT GRANULAIR ACTIEF KOOL TER ILLUSTRATIE. BRON: (STOWA, 2015)**



Actiefkool kan gemaakt worden uit fossiele bronnen zoals steenkool maar ook uit allerlei organische (rest)stromen zoals hout, kokosnoot schillen, pitten en pindadoppen. Bij het gebruik van niet fossiele kolen wordt het product eerst verkoold voordat het geactiveerd wordt. Afhankelijk van de grondstof en de mate van activatie ontstaat een bepaalde poriestructuur. Afhankelijk van de poriegrootte en de poriegrootteverdeling is de kool geschikt om bepaalde moleculen in meer of mindere mate te adsorberen. Poeder actiefkool is vermalen granulair actief kool en heeft daardoor een andere structuur dan granulair actief kool.

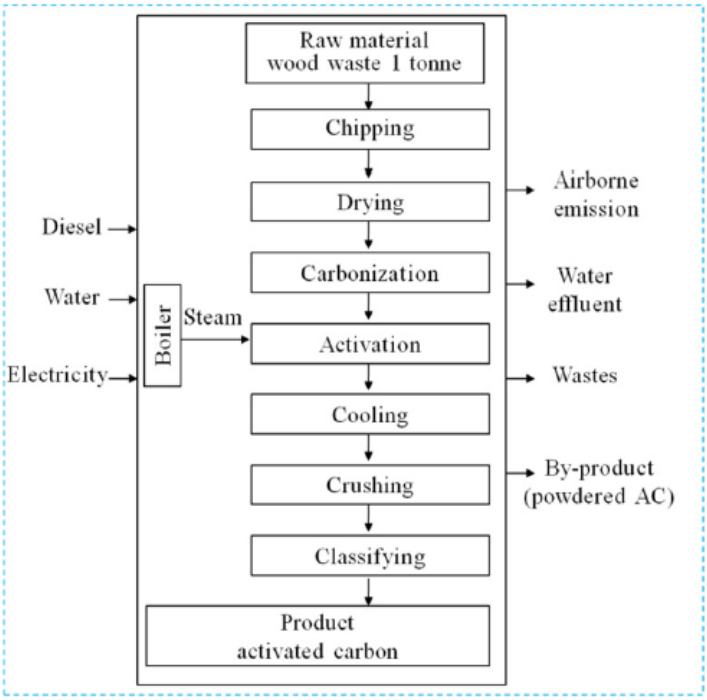
3.3 PRODUCTIE- EN ACTIVERINGSPROCES ACTIEFKOOL

Om actiefkool te maken moeten er eerst grondstoffen gewonnen worden. Zoals door het mijnen van steenkool, kappen van hout of het ophalen van kokosnootschillen of houtresten. Na voorbehandeling worden de organische (rest)stromen verkoold, waarna ze geactiveerd worden. Steenkool wordt na voorbehandeling direct geactiveerd.

Er zijn verschillende manieren om kool te activeren. Dit kan zowel met stoom en hitte als op chemische wijze. De manier van activeren heeft effect op de eigenschappen en kwaliteit van de kool. Bij activeren met stoom wordt de kool onder een hoge temperatuur (800°C) met stoom in een roterende oven geactiveerd. Hierdoor verdampen of breken alle geadsorbeerde componenten. Daarnaast reageren gedeeltes van de kool weg door vergassing, hierdoor ontstaan poriën. Bij chemische activatie vindt dit proces plaats door het impregneren met zuur, doorgaans fosforzuur. Chemische activatie resulteert doorgaans in een verder geactiveerde kool en is meestal duurder (bron: interview Cabot).

Een schematische weergave van het productieproces voor actiefkool uit hout is opgenomen in Figuur 3.2.

FIGUUR 3.2 **SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET PRODUCTIEPROCES VAN ACTIEFKOOL OP BASIS VAN HOUTAFVAL VOOR GRANULAIR- EN POEDER ACTIEKOOL. BRON: (MI HYUNG KIM, 2019)**



3.4 FYSISCHE EIGENSCHAPPEN ACTIEFKOOL

Er zijn allerlei fysische eigenschappen van poedervormige actieve kool die van belang zijn voor het gebruik op de RWZI. Zoals bijvoorbeeld watergehalte, dichtheid, asgehalte, deeltjesgrootte verdeling en de zuiverheid. Tabel 3.1 beschrijft deze eigenschappen en waarom ze van belang zijn.

TABEL 3.1 FYSISCHE EIGENSCHAPPEN POEDERVORMIGE ACTIEVE KOOL VAN BELANG VOOR RWZI-GEBRUIK, (A. MEIER, 2019).

Fysische eigenschap	Relevantie voor de gebruiker
Watergehalte	Maximaal 10% - relevant voor de werkelijke acceptatiehoeveelheid bij aflevering en voor de bepaling van de specifieke dosis in massa per volume van afvalwater.
Asgehalte	Aandeel van het product zonder adsorptievermogen. Belangrijk voor de specifieke dosis, geeft indicatie van aandeel reactiveringsproduct
Vermijden van onzuiverheden	Bijvoorbeeld resten van verpakkingen of schroeven, belangrijk voor het verwerken van de PAK's en de opslag van de PAK's.
Deeltjesgrootteverdeling	Belang voor het type en de efficiëntie van PAK-scheiding met minimaal PAK-slip; kleine PAK-deeltjes laden sneller, Ze vlokken echter minder goed en zijn daarom moeilijker te scheiden. Voor membraanprocessen is zeer fijne PAK mogelijk
Bulkdichtheid	Belangrijk voor opslag; een hoge dichtheid PAK gebruikt minder volume in de silo.
Zuiverheid	Als alleen verse steenkool gewenst is, zijn er specificaties in de Norm EN 12915.

Naast de eigenschappen beschreven in Tabel 3.1 zijn er een aantal technische eigenschappen aan de hand waarvan leveranciers hun kolen beschrijven in de zogenaamde technical data sheets. Welke eigenschappen genoemd worden verschillen per leverancier en kool. In Bijlage 2 zijn een aantal van deze begrippen verder uitgelicht.

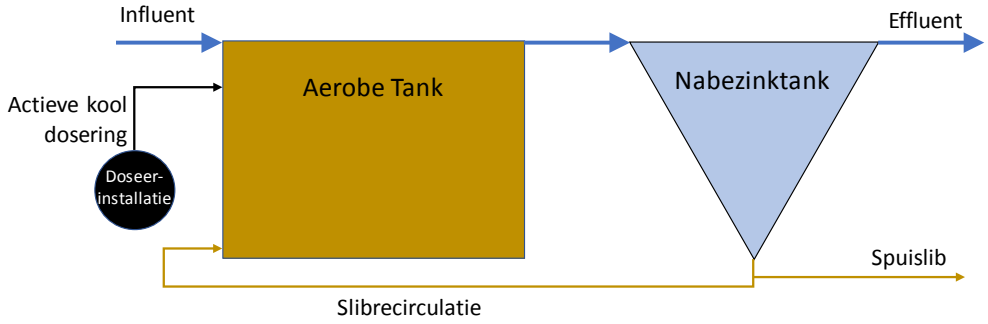
Voor het gebruik van actiefkool in de RWZI is het van belang dat de kool effectief microverontreinigingen kan verwijderen. Helaas kan dit niet worden afgeleid aan de hand van de fysisch-chemische eigenschappen (bron: Interview EAWAG). Om het verwijderingsrendement te bepalen zullen de kolen getest moeten worden. Het is daarbij van belang om in een afvalwater matrix te testen. Aangezien in deze complexe matrix allerlei componenten aanwezig kunnen zijn die mogelijk de werking van de kool kunnen verstoren. Een voorbeeld hiervan is de blokkade van poriën door grote organische moleculen. Daarom kan het rendement van de kool pas met zekerheid bepaald worden na het testen in de praktijk.

Lab testen kunnen een goede indicatie geven van het in de praktijk te behalen rendement. Er zijn labtesten gedaan waarbij eerst gekeken is naar DOC verwijdering en de zogenaamde "SAK 254 nm reductie". Bij de SAK 254nm reductie wordt gekeken naar de afname van adsorptiecapaciteit. Dit blijkt een indicatie te geven van de verwijdering van microverontreinigingen. (A. Meier, 2019) Labtesten zijn dus noodzakelijk alvorens over te gaan naar het testen op pilot schaal.

3.5 PACAS PROCES

Het PACAS proces (poeder actiefkool in de actief slibsysteem), staat uitvoerig beschreven in de STOWA rapportage: (STOWA, 2018). Bij het PACAS proces wordt er poeder actiefkool gedoseerd in de actief-slibtank. Via bezinking in de nabezinktank(s) komt de kool via spuislib in de sliblijn terecht waarbij een deel van de kool via het spuislib verwijderd wordt. Het proces is schematisch weergegeven in Figuur 3.3.

FIGUUR 3.3 PROCESSCHEMA PACAS PROCES INGEPAST OP EEN EENVOUDIGE RWZI



Natuurlijk kunnen duurzame-PAK's ook in andere processen dan het PACAS proces worden ingezet. Zo is het ook mogelijk om PAK in een nageschakelde tank te doseren. Dit heeft als voordeel dat er minder PAK nodig is. Echter vraagt dit een grotere investering vanwege de extra tank en het scheiden van het aktiefkool en het behandelde water. In deze haalbaarheidsstudie is verder uit gegaan van het PACAS proces.

3.6 DUURZAAMHEID

In het PACAS project is de duurzaamheid van PACAS besproken aan de hand van zowel de CO_2-footprint als de GER score (Gross Energy Requirement). De CO_2-footprint van PACAS met steenkool is gesteld op 13 kg CO_2 per persoon per jaar. De GER-score kwam uit op 0,39 GJp/i.e.

In de onderliggende studie zullen de duurzame kolen worden vergeleken op basis van CO_2-footprint en wordt uitgegaan van een referentie situatie voor de CO_2-footprint van PACAS met steenkool van 122 gCO_2/m^3 behandeld rioolwater (Mulder, 2019).

Er zijn verschillende factoren die invloed hebben op de uiteindelijke CO_2-footprint van het PACAS proces:

- De grondstof
- Het productieproces en de activatie methode
- Het transport
-

Eén van de factoren is de grondstof waarvan de kool gemaakt is. De grondstof vertegenwoordigt een primaire energiewaarde met een daarbij behorende CO_2-footprint. Als er gebruik gemaakt wordt van rest- of afvalstromen kan de CO_2-footprint voor de grondstof op 0 gesteld worden, omdat er geen extra energie is gebruikt om de grondstof te winnen. In sommige gevallen kan zelfs gesproken worden van vermeden energie omdat bij het verwerken van een afvalstroom mogelijk ook energie nodig is.

Daarnaast draagt het productieproces van de actieve kool ook bij aan de CO_2-footprint. De verkoling en activatie van kool is een energie intensief proces.

Transport is ook een factor die invloed heeft op de uiteindelijke CO_2-footprint van de kool. Afhankelijk van de locatie van de grondstoffenwinning en -productie zijn er aanzienlijke transportafstanden gemoeid met de totale productie van actiefkool. Echter blijkt dit slechts een klein aandeel van de totale footprint te zijn, <10% (Hofman-Caris, 2019)

Voor verschillende grondstoffen die gebruikt kunnen worden voor de productie van duurzame-PAK zijn in Tabel 3.2 de GER-waardes opgenomen (RVO, 2018) met als referentie de GER waarde van steenkool. Hieruit blijkt dat de GER-waarde van actiefkool uit tropisch hardhout vergelijkbaar is met die van steenkool en dat de GER-waarden van Europees naald en loofhout hoger ligt. Een belangrijk verschil is dat in het geval van hout het grootste gedeelte van de GER-waarde hernieuwbaar is (geen fossiele grondstof) terwijl bij steenkool het grootste gedeelte niet hernieuwbaar is. De keuze van de grondstof is dus een belangrijke input factor om de duurzaamheid van actiefkool te verbeteren.

TABEL 3.2: **RESULTATEN VOOR HOUTCHIPS EN STEENKOOL BRON: (RVO, 2018)**

Grondstof	GER-waarde (MJ/kg)	GER, niet-hernieuwbaar (MJ/kg)	GER, hernieuwbaar (MJ/kg)
Tropisch hardhout	32,9	2	31 *
Europees naaldhout	47,7	3	45
Europees loofhout	38,7	3	36
Steenkool	32,6	32,1	0,5

* Wat de GER waarde betreft scoort tropisch hardhout goed maar omdat er aan tropisch hardhout andere milieubezwaren en sociale bezwaren kleven wordt actief kool uit hardhout in deze studie niet meegenomen als duurzame koolvervanger.

In (STOWA, 2012-06) zijn de GER-waarden in kaart gebracht voor (geregenereerde) actiefkool uit steenkool. De GER-waarde voor niet geregenereerde kool is 164,3 MJ/kg versus 43,1 MJ/kg voor geregenereerde kool. Voor de productie van een kilo actiefkool zijn meerdere kilo's grondstof nodig omdat een aanzienlijk deel van de grondstof tijdens het pyrolyse proces omgezet wordt in gas. In STOWA (STOWA, 2012-06) wordt bijvoorbeeld als uitgangspunt gehanteerd dat 3 kg steenkool netto resulteert in 1 kg actief kool. Daarnaast is voor de activatie van actief kool externe energie nodig in de vorm van warmte (stoom) of chemicaliën. De GER waarden van een kilo actief kool is daarom aanzienlijk hoger dan van de grondstof waar het van gemaakt wordt. Regeneratie is alleen mogelijk bij granulair actief kool en hier moet altijd 10% verse kool aan toegevoegd worden. Regeneratie van poederkool is niet mogelijk.

4

BESCHIKBARE POEDER ACTIEF KOLEN UIT HERNIEUWBARE GRONDSTOFFEN

4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is de beschikbaarheid van (commercieel) beschikbare duurzame-PAK's geïnventariseerd. De informatie is gebaseerd op expert interviews en literatuuronderzoek. In paragraaf 4.2 volgt een inventarisatie van de commercieel beschikbare duurzame PAK's.
Naast commercieel beschikbare kolen zijn er ook een aantal niet commercieel beschikbare kolen naar voren gekomen uit de expertinterviews en het literatuuronderzoek. Deze kolen worden in paragraaf 4.3 van dit hoofdstuk besproken.

4.2 COMMERCIEEL BESCHIKBARE POEDERKOLEN OP BASIS VAN HERNIEUWBARE GRONDSTOFFEN

4.2.1 LONGLIST: OVERZICHT BESCHIKBARE KOLEN EN BIJBEHORENDE KOSTEN

Er is bij verschillende koolleveranciers nagegaan welke duurzame-PAK's zij beschikbaar hebben, die (mogelijk) geschikt zijn om microverontreinigingen uit afvalwater te verwijderen. De resultaten van deze inventarisatie zijn samengevat in Tabel 4.1. Naast de naam van de kool zijn ook de leverancier, de indicatieve kosten en de grondstof weergegeven. Daarnaast is in de tabel aangegeven of er al testen bekend zijn waarbij het verwijderingsrendement van de kolen bepaald is. De referentiekool is ook weergegeven in de tabel. Uitgebreidere technische gegevens van de kolen staan vermeld in Bijlage 3.

Uit Tabel 4.1 blijkt het volgende:

- De commercieel beschikbare duurzame kolen zijn met name gemaakt van hout of kokosnoot. Voor het product MAR-300 is niet gespecificeerd welke hernieuwbare grondstof gebruikt is. Het product van Act&Sorb is gemaakt uit afvalhout (mdf platen).
- De kosten van de duurzame-PAK's variëren tussen de 1.410-11.750 euro/ton. Er zijn meerdere kolen die een vergelijkbare prijs hebben als de referentiekool Pulsorb WP 235.
- Het valt verder op dat slechts voor een aantal kolen verwijderingsrendementen bekend zijn van microverontreinigingen uit afvalwater.

TABEL 4.1 **LONGLIST: COMMERCIEEL BESCHIKBARE PAK'S GEMAAKT UIT HERNIEUWBAAR MATERIAAL EN DE REFERENTIEKOOL**

Naam kool	Leverancier	Indicative kosten euro/ton	Grondstof kool	Verwijderingsrendementen microverontreinigingen getest?	Activatie methode
Referentie: Pulsorb WP 235	Chemviron	1.950*	Steenkool blend		stoom
Act & sorb product**	Act& sorb	>2.000	MDF afvalhout	√	stoom
PAK C 1000 C	Carbotech	1.410	kokosnoot schillen	√	stoom
MAR-300	Carbon Activated Europe	8.000	hernieuwbaar, onbekend	√	stoom
WOS-PL1000	Carbon Activated Europe	7.750	hout		stoom
WHP-11	Carbon Activated Europe	11.750	hout		chemisch
Acticarbone 2SW	Chemviron	5.100	marine dennen hout		stoom
Acticarbone ENO H	Chemviron	7.250	marine dennen hout		chemisch
C-PURE®	Desotec	4.250	hout		chemisch
C-pure 200-7	Desotec		hout		chemisch
Organosorb 200-1 WB	Desotec	1.940	hout		stoom
Aquasorb G9	Jacobi carbon	2.500	hout	√	?
AquaSorb TM XP-W	Jacobi carbon	Niet bekend	gereactiveerde steenkool (deels)		?
Oxpure 325W-10	Oxbow	vertrouwelijk	hout		stoom
Oxpure 325W-12	Oxbow	vertrouwelijk	hout		stoom
Oxpure 325W-9	Oxbow	vertrouwelijk	hout		stoom
Pyreg kool	Pyreg	Niet bekend			stoom

* Indicatieve prijs opgave van de leverancier. In dit onderzoek wordt overigens verder uitgegaan van een kostprijs van poederkool op basis van steenkool van 2.000 euro/ton o.b.v. de richtlijnen die de STOWA en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gesteld hebben, zie ook: (Mulder, 2019).

**Deze kool is nog niet volledig commercieel beschikbaar, naar verwachting is halverwege 2020 de eerste productie in werking, samples van de kool zijn al beschikbaar

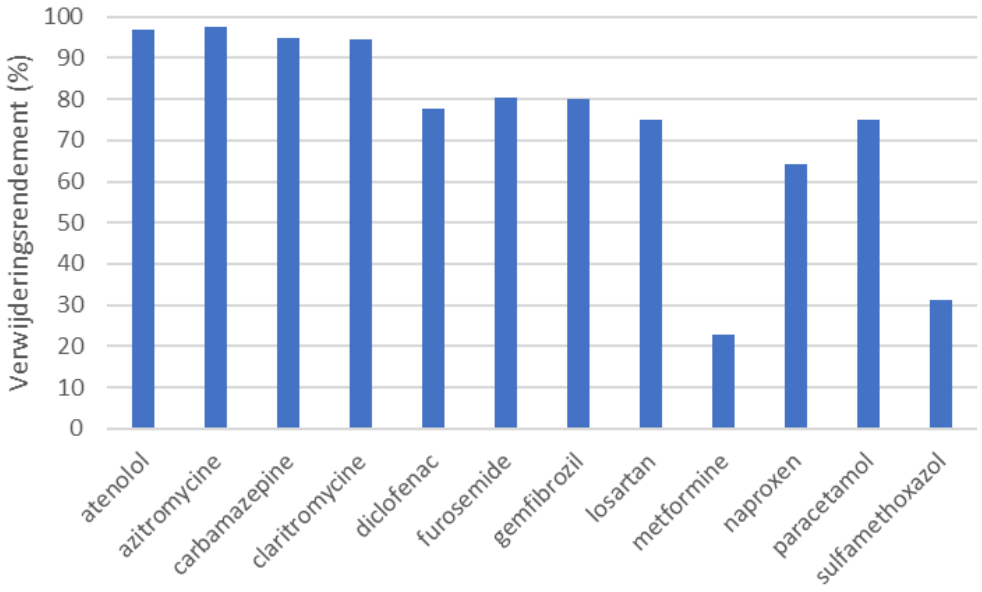
4.2.2 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

Om te beoordelen of duurzame PAK's geschikt zijn om PAK uit steenkool te vervangen dient het verwijderingsrendement op microverontreinigingen vastgesteld te worden. Het Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat heeft hiertoe 11 gidsstoffen vastgesteld:

- Benzotriazool
- Clarithromycine
- Carbamazepine
- Diclofenac
- Metoprolol
- Hydrochloorthiazade
- Mengsel van 4- en 5 methylbenzotriazool
- Propranolol
- Sotalol
- Sulfamethoxazol
- Trimethoprim

Voor de referentiesituatie van PACAS geldt dat er bij een dosering van 10 mg/l een verwijdering van 70-75% optreedt voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen. In het PACAS onderzoek is het verwijderingsrendement voor de gidsstoffen bepaald aan de hand van schudtesten. In Figuur 4.1 zijn de verwijderingsrendementen van schudtesten met de Pulsorb kool weergegeven (24-uurssamples van rwzi Papendrecht). Deze resultaten zijn niet gelijk aan de praktijk in de AT, maar wel goed bruikbaar om duurzame PAK's te vergelijken met de referentie PAK (Pulsorb).

FIGUUR 4.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MET PULSORB 235 IN EEN SCHUDTEST



Het verwijderingsrendement op micro verontreinigingen is nog niet voor veel verschillende PAK's vastgesteld. Tabel 4.1 laat zien dat er slechts voor 5 van de beschikbare duurzame PAK's verwijderingsrendementen beschikbaar zijn. Hierdoor is het voor veel kolen nog niet mogelijk om te bepalen of zij vergelijkbare verwijderingsrendementen kunnen behalen als de referentiekool. Voor de volgende kolen zijn testen uitgevoerd om het verwijderingsrendement op micro verontreinigingen te bepalen.

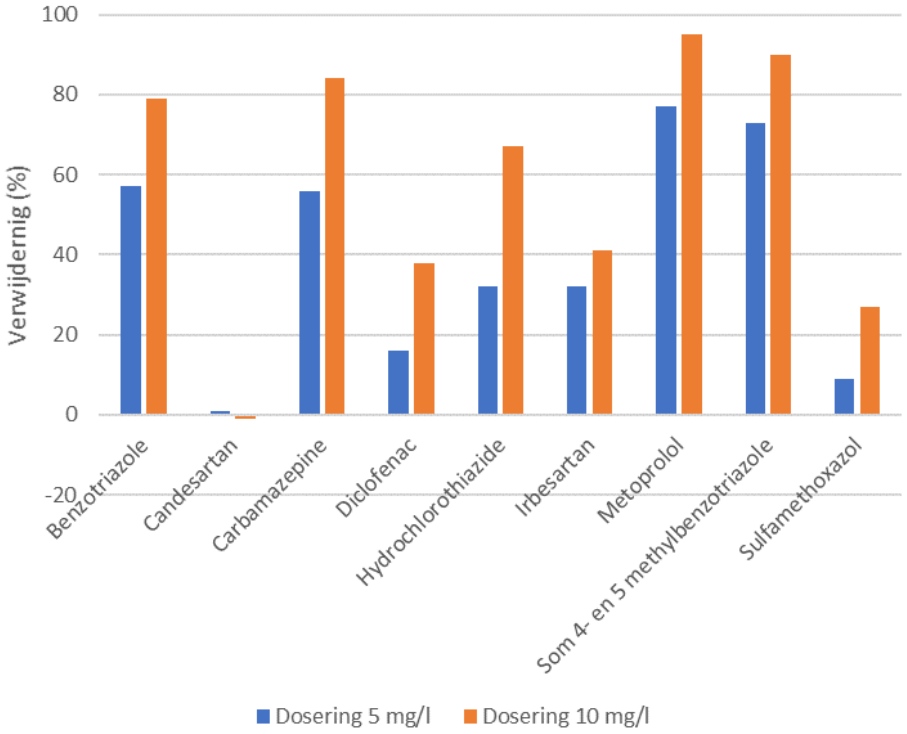
- Carbon Activated Europe; MAR-300
- Jacobi Carbon; Aquasorb G9
- Act& sorb product
- Carbotech; PAK C 1000 C

De uitgevoerde testen en hun resultaten worden navolgend besproken. Hierbij moet opgemerkt worden dat resultaten behaald in schudtesten niet 1 op 1 door vertaald kunnen worden naar rendementen in de praktijk. In de praktijk vallen de rendementen lager uit (STOWA, 2018).

MAR-300

Op basis van een laboratorium schudtest met de MAR-300 zijn de verwijderingsrendementen behaald die weergegeven zijn in Figuur 4.2. De testen zijn uitgevoerd op afvalwater van de nabezinktank van een biologische zuivering in Stuttgart-Mühlhausen. De figuur laat zien dat voor een aantal stoffen zoals metoprolol, carbamazepine, benzotriazole en de som van 4- en 5 methylbenzotriazole een verwijderingsrendement van 70-95 % wordt behaald bij een dosis van 10 mg/l. Stoffen als diclofenac, sulfamethoxazol en irbesartan worden voor 25-40% verwijderd bij een dosering van 10 mg/l. De verwijderingsrendementen van MAR-300 vallen wat lager uit dan de referentiekool (Pulsorb 235) waarbij Carbamazepine voor circa 95% verwijderd werd en diclofenac voor 80%. Sulfamethoxazol wordt bij beide PAK's met een gelijk rendement verwijderd (±30%).

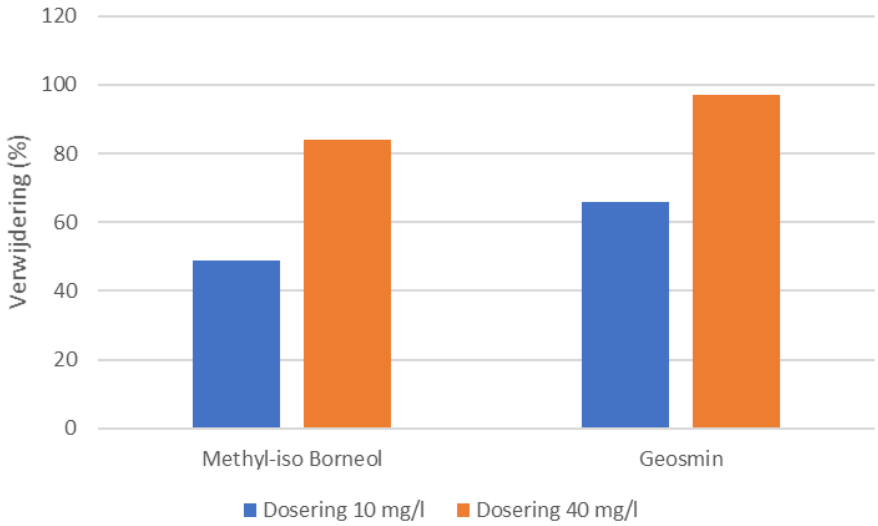
FIGUUR 4.2 RESULTATEN SCHUDTEST MET DE MAR-300. DE TEST IS UITGEVOERD DOOR HET MICROPOLLUTANTS COMPETENCE CENTRE IN BADEN-WÜRTTEMBERG, BRON: (A. RÖSSLER, 2018)



AQUASORB G9

In Figuur 4.3 zijn de resultaten weergegeven van een test met de kool Aquasorb G9 door Jacobi Carbons. Het zijn resultaten van een schudtest waarbij de verwijdering van twee stoffen in drinkwater is onderzocht. Deze twee stoffen vallen niet onder de 11 gidsstoffen.

FIGUUR 4.3 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DE AQUASORB G9 IN EEN SCHUDTEST OP DRINKWATER. INFLUENTCONCENTRATIES: METHYL-ISO BORNEOL 127 NG/L, GEOSMIN 187 NG/L. (BRON: TECHNICAL DATA SHEET JACOBI CARBONS)



ACT&SORB

Het product van Act &Sorb is getest op labschaal in een gestandaardiseerd water. De resultaten zijn vergeleken met de resultaten van een steenkool variant die gebruikt wordt voor de verwijdering van microverontreinigingen. De exacte getallen konden niet gedeeld worden. Echter gaf de leverancier aan dat vergeleken met de steenkool variant diclofenac, ibuprofen en mecoprop beter werden verwijderd door de hernieuwbare kool (bron: Interview Act &Sorb).

PAK C 1000 C

Het Fraunhofer instituut heeft een schudtest uitgevoerd met de PAK C 1000 C van Carbotech. In deze schudtest is de verwijdering van diclofenac (gidsstof) onderzocht. Gede-ioniseerd water werd gespiked met diclofenac. De initiële diclofenac concentratie bedroeg 60 mg/l en de PAK dosering 250 mg/l. Na een half uur was meer dan 99% van de diclofenac verwijderd en na 24 uur resteerde niets van de diclofenac.

CONCLUSIES

Een voorwaarde voor de inzet van duurzame kolen is dat ze inzetbaar zijn voor het doel om microverontreinigingen te verwijderen. De eerste testresultaten van de MAR-300, het Act&Sorb product en PAK C 1000 C zijn positief, maar het aantal testen is beperkt en ze zijn deels door de leverancier zelf uitgevoerd. De testen geven een indicatie dat het mogelijk is om met actiefkool uit hernieuwbare bronnen goede verwijderingsrendementen te behalen voor microverontreinigingen in afvalwater. Om te bepalen welke verwijderingsrendementen behaald kunnen worden zullen uitvoerigere en onafhankelijke testen gedaan moeten worden. Daarbij is het van belang om op een afvalwatermatrix te testen en de PACAS referentiekool mee nemen (Pulsorb 235).

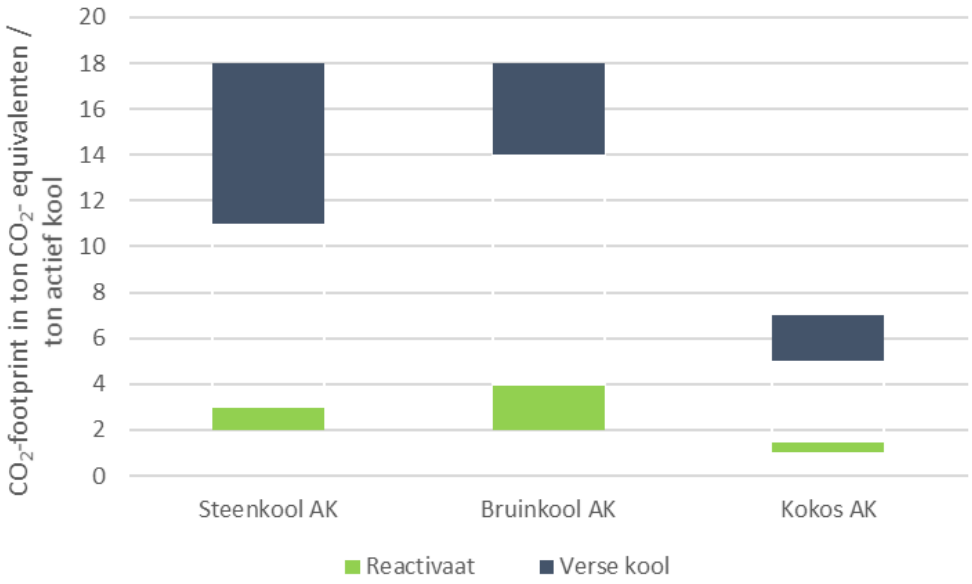
4.2.3 CO_2-FOOTPRINT

Deze paragraaf beschrijft de CO_2-footprint van duurzame-PAK's in vergelijking met PAK's uit fossiele bronnen. De informatie in deze paragraaf is zowel afkomstig van literatuur als interviews met experts.

Producenten van actiefkool geven niet altijd openheid over de CO_2-footprint van actiefkool. Op basis van een Duits-Zwitsers onderzoek (A. Meier, 2019) waaraan diverse actiefkool producenten hebben deelgenomen is een globale inschatting gemaakt van het primair fossiel energieverbruik en de CO_2-footprint van kolen op basis van steenkool, bruinkool en kokosnootschil. Zowel de CO_2-footprint van de grondstoffen als die van het productie-/activatieproces zijn meegenomen. Figuur 4.4 geeft de resultaten van dit onderzoek weer. De exacte waarden zijn opgenomen in Tabel 4.2.

In Figuur 4.4 en Tabel 4.2 is te zien dat de CO_2-footprint van kokos actiefkool op basis van verse grondstoffen een stuk lager is vergeleken met de CO_2-footprint van actiefkool op basis van verse steenkool of bruinkool. Ook blijkt dat de CO_2-footprint van de gereactiveerde kolen een stuk lager uitvalt dan de verse kolen. Wat verder opvalt is dat geregenereerde steen- of bruinkool een lagere CO_2-footprint heeft dan een verse kokoskool. Het verbruikte poederkool in het PACAS proces wordt echter afgevoerd via het slib waardoor het niet geregenereerd kan worden. Er kan overigens wel poederkool gemaakt worden uit geregenereerde granulaire actiefkool uit de drinkwaterindustrie. Bij het regeneratie proces ontstaat er namelijk een deel poedervormig kool dat niet meer als granulaat ingezet kan worden. Echter is dit een bijproduct en is daarom de beschikbaarheid voor grootschalig gebruik onzeker.

FIGUUR 4.4 BANDBREEDTE CO_2-FOOTPRINT VOOR VERSE EN GEREACTIVEERDE ACTIEFKOOL VOOR VERSCHILLENDE GRONDSTOFFEN, BRON: (DWA-ARBEITSGRUPPE KA-8.6, 2016)



TABEL 4.2 BANDBREEDTE PRIMAIR FOSSIEL ENERGIEVERBRUIK EN CO_2-FOOTPRINT VOOR VERSE EN GEREACTIVEERDE ACTIEFKOOL VOOR VERSCHILLENDE GRONDSTOFFEN, BRON: (DWA-ARBEITSGRUPPE KA-8.6, 2016)

Grondstof		Primair fossiel energieverbruik (GJ/t Actiefkool)	CO_2-footprint (t CO_2/ ton actiefkool)
Steenkool	Vers	109 - 124	11 - 18
	Gereactiveerd	17 - 29	2 - 3
Bruinkool	Vers	152 - 184	14 - 18
	Gereactiveerd	20 - 37	2 - 4
Kokosnootschil	Vers	28 - 51	5 - 7
	Gereactiveerd	9 - 14	1

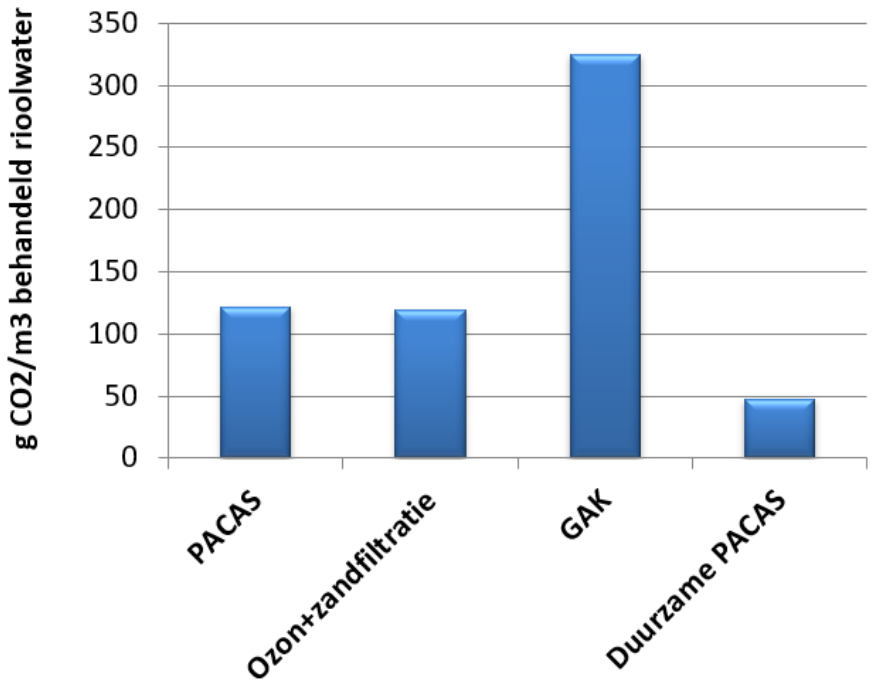
Er zijn diverse LCA (Life Cycle Analysis) studies beschikbaar waarin de productie van actiefkool uit allerlei organische reststromen wordt beschouwd. Omdat de gehanteerde systeemgrenzen verschillen en het onbekend is in hoeverre dit aansluit bij de commercieel beschikbare kolen, kunnen de resultaten van deze studies niet direct vergeleken worden met de data van commercieel beschikbare kolen. Echter geven de onderzoeken wel een indicatie van de CO_2-footprint van actiefkool op basis van steenkool en hernieuwbare grondstoffen. Uit de LCA analyse in (Mi Hyung Kim, 2019) volgt dat de actiefkool productie uit Indonesisch afval hout slechts 0,0104 kg CO_2-equivalent per kilo actiefkool oplevert en actiefkool op basis van kokosnootschil 1,15 kg CO_2-equivalent. Dit is aanzienlijk minder dan op basis van steenkool met 8,4-11,0 kg CO_2-equivalent.

CO_2-FOOTPRINT CONFORM MODEL "CO_2-FOOTPRINT RWZI'S MICRO'S 100.000 I.E."

Op basis van het door de STOWA aangeleverde model "CO_2-footprint rwzi's micro's 100.000 i.e." is de CO_2-footprint berekend van PACAS op basis van duurzame kool. Uitgangspunt voor de berekening zijn de getallen zoals opgenomen in Tabel 4.2 omdat dit onafhankelijk vastgestelde getallen betreffen, inclusief activatie van de kool (DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6, 2016). Hieruit volgt dat de CO_2-footprint van duurzame kool ongeveer 41% bedraagt van die van actiefkool uit steenkool (6 t.o.v. 14,5 kg CO_2/kg actief kool). De overige factoren zoals dosering zijn gelijk gehouden met de uitgangspunten in het PACAS rapport. Figuur 4.5 geeft de output van dit model weer. Hierin veroorzaakt PACAS met actiefkool op basis van fossiele grond-

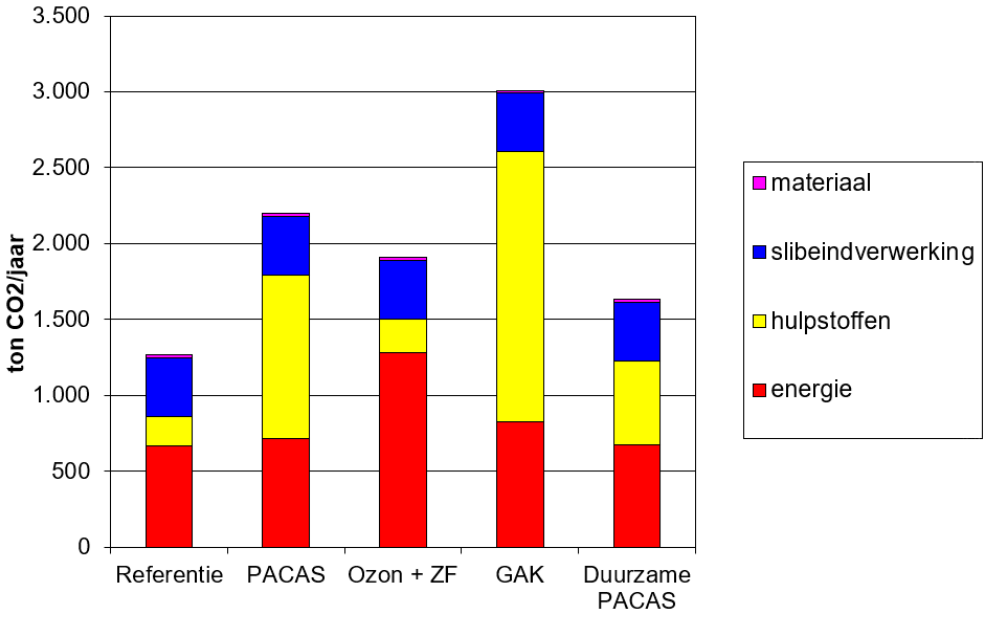
stoffen 116 gCO_2/m^3 behandeld afvalwater en duurzame PACAS 48 gCO_2/m^3 behandeld afvalwater. Er kan naar verwachting dus 59% CO_2 uitstoot bespaard woorden door het gebruik van duurzame-PAK's. Daarmee komt de uitstoot van PACAS op basis van duurzame kool op 48 kg CO_2/m^3 behandeld afvalwater.

FIGUUR 4.5 CO_2-FOOTPRINT VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN CONFORM MODEL "CO_2-FOOTPRINT RWZI'S MICRO'S 100.000 I.E ."



Als we in Figuur 4.6 kijken naar de CO_2-footprint van de totale rwzi dan resulteert PACAS op basis van duurzame kool 1.631 ton CO_2/jaar. Uitgaande van de 41% emissie ten opzichte van actiefkool op basis van steenkool. Dit is aanzienlijk minder dan de 2.198 ton CO_2/jaar voor de conventionele PACAS methode.

FIGUUR 4.6 CO_2-FOOTPRINT VOOR DE TOTALE RWZI CONFORM MODEL "CO_2-FOOTPRINT RWZI'S MICRO'S 100.000 I.E ."



CONCLUSIES

Uit literatuuronderzoek en gesprekken met leveranciers volgt dat hernieuwbare grondstoffen de CO_2-footprint van actiefkool met minstens de helft kunnen reduceren. De leveranciers van (duurzame-)PAK's hebben weinig tot geen informatie over de CO_2-footprint zodat de footprint per kool momenteel nog niet vast te stellen is.

4.2.4 VERMINDERING ECOTOXICITEIT

Uit de literatuur is bekend dat PACAS de ecotoxiciteit van het effluent vermindert (STOWA, 2018). Het is waarschijnlijk dat de kolen die een vergelijkbaar verwijderingsrendement geven voor microverontreinigingen, ook als ze gemaakt zijn uit hernieuwbare grondstoffen, een zelfde effect hebben op de ecotoxiciteit. Aangezien de kolen nog niet in de praktijk getest zijn, zal nader onderzoek dit moeten uitwijzen.

4.2.5 SCORE DUURZAME-PAK'S IN VERGELIJKING MET REFERENTIEKOOL PACAS

Op basis van de voorgaande resultaten in paragraaf 4.2 is in Tabel 4.3 de score van duurzame kool vergeleken met het referentie PACAS proces op de aspecten CO_2-footprint, kosten, verwijdering van microverontreinigingen en vermindering ecotoxicologische risico's. Ondanks dat er in Tabel 4.1 duurdere kolen opgenomen zijn, is in Tabel 4.3 als maximum een prijs van 4.000 euro per ton gehanteerd wat twee keer zo duur is als de referentie PACAS kool. Het is niet aannemelijk dat kolen die meer kosten dan 4.000 euro per ton in aanmerking komen voor het PACAS proces, tenzij een veel lagere dosering mogelijk is. De kosten voor de verwijdering van micro verontreinigingen zullen hierdoor erg oplopen.

TABEL 4.3 **SCORE VAN DUURZAME-PAK VERGELEKEN MET PACAS O.B.V. STEENKOOL OP DE ASPECTEN CO_2-FOOTPRINT, KOSTEN, VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN EN VERMINDERING ECOTOXICOLOGISCHE RISICO'S**

Aspect	Eenheid	Score PACAS	Score duurzame kool
CO_2-footprint	g CO_2/ m^3	116	48
Kosten	€/ m^3	0,05	0,04-0,08*
Verwijdering van microverontreinigingen o.b.v. gidsstoffen Ministerie I&W	%	70-75%	***
Vermindering van ecotoxicologische risico's voor lozing van rwzi-effluent in het watermilieu	-	65%**	***

* Bij koolprijzen van 1.400-4.000 euro/ton en een gelijke dosering als PACAS; volledige berekening in paragraaf 6.5.

** o.b.v. (STOWA, 2018)

***nader te bepalen, naar verwachting gelijk aan huidige PACAS proces

Op basis van Tabel 4.3 kan geconcludeerd worden dat duurzame-PAK's een kansrijk alternatief kunnen zijn voor PAK uit steenkool. Voorwaarde hiervoor is dat het verwijderingsrendement op microverontreinigingen en de vermindering van de ecotoxicologische risico's vergelijkbaar zijn met PAK uit steenkool, waaruit de dosering en kosten worden afgeleid Dit dient in een vervolgfase te worden vastgesteld.

4.3 NIET COMMERCIEEL BESCHIKBARE DUURZAME-PAK'S

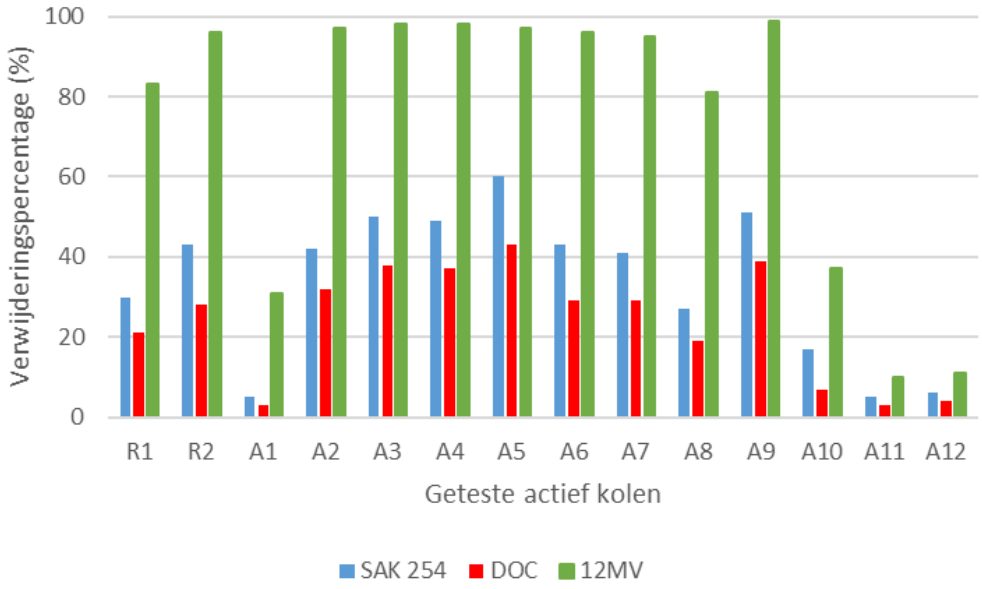
4.3.1 INLEIDING

Naast informatie over de commercieel beschikbare kool is in dit onderzoek ook informatie beschikbaar gekomen over verschillende (nog) niet commercieel beschikbare duurzame kolen. Omdat deze kolen qua duurzaamheid en kosten mogelijk veel perspectief bieden, zijn de resultaten opgenomen in deze rapportage.

4.3.2 EMPYRION PROJECT

In Zwitserland is binnen het Empyrion I project uit verschillende soorten biomassa actiefkool geproduceerd. Onder andere op basis van afval hout en rwzi slib. Deze kolen zijn op labschaal getest op de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. De resultaten zijn opgenomen in Figuur 4.7. Hieruit bleek dat een aantal kolen gebaseerd op restbeukenhout een betere verwijdering hadden dan de twee referentie kolen (de Donau Carbon Carbopal AP(R1) en de Norit SAE SUPER ((R2)). De kolen op basis van rwzi slib presteerde minder goed. In Bijlage 4 staan de geproduceerde kolen uitgebreider beschreven (Activatie % en BET- oppervlakte).

FIGUUR 4.7 VERWIJDERINGSPERCENTAGE VAN 12 VERSCHILLENDE KOLEN GETEST BINNEN HET EMPYRION I PROJECT. R1 EN R2 REFERENTIEKOLEN. A1-A4 O.B.V. BEUKENHOUT, A5 O.B.V. PLANTEN, A6 O.B.V. VUUR- EN SPARRENHOUT, A7 O.B.V. HOUTRESTEN UIT DE COMPOSTERING, A8 O.B.V. SCHORS VAN ZACHTHOUT, A9 O.B.V. GEMENGD HOUT. A10 O.B.V.HOUT & ZUIVERINGSSLIB, A11 O.B.V. ZUIVERINGSSLIB, A12 O.B.V. SLIB. BRON: (HAGEMANN, THOMAS D. BUCHELI*, & HANS-PETER SCHMIDT, 2019)



Binnen het Empyrion II project (momenteel in uitvoering) worden kolen op basis van afvalhout en rwzi slib op pilot schaal getest op een rwzi. Hoewel de kolen op basis van rwzi slib minder goed presteerden wordt er nu getest of zij in combinatie met op hout gebaseerde kool een goede prestatie kunnen leveren. Dit project gaat uit van een zo laag mogelijke CO_2-footprint door actiefkool productie op locatie met gebruik van lokale afval- en rest stromen. (bron: Interview Empyrion project)

4.3.3 PILOT TEST IN BADEN BADEN

In Duitsland wordt er op dit moment een pilot uitgevoerd waarbij verschillende biomassa reststromen worden omgezet in actiefkool. Normaal gesproken kost het geld om deze producten te verwerken of af te zetten, nu wordt er een waardevol product van gemaakt. Met behulp van een installatie van het bedrijf PYREG wordt de biomassastroom verkoold en geactiveerd. De actiefkool wordt gebruikt op de RWZI van Baden-Baden om microverontreinigingen te verwijderen. De eerste resultaten laten een verwijdering van 40-80% zien in vergelijking met een standaard actiefkool, terwijl de specifieke oppervlakte een stuk lager was. (bron: Interview PYREG). Over deze pilot zijn verder nog geen gegevens beschikbaar.

Er worden op dit moment proeven gedaan waarbij verschillende kolen geproduceerd worden uit onder andere mest en groenafval. De resultaten van dosering van deze kool in de rwzi worden zomer 2019 bekend.

4.3.4 ZEEFGOED

Waterschap Vallei &Veluwe gaat een pilotproef uitvoeren waarbij zeefgoed omgezet wordt in actief kool. Hierbij wordt cellulose (WC papier e.d.) met nieuwe technieken uit het afvalwater van de RWZI gezeefd aan het begin van het zuiveringsproces. Deze cellulose wordt gedroogd in een droger en daarna in een pyrolyse installatie (flashpyrolyse) omgezet in biochar, pyrolyseolie, pyrolyse-/ synthesegas en een vetzure fractie (azijnzuur). Biochar kan met stoom worden omgezet in actief kool, dat binnen het zuiveringsproces kan worden ingezet om medicijnresten uit het afvalwater te halen. Het pyrolysegas wordt verbrandt in een pyrolysegas(co) brander. De afgassen van deze brander worden ingezet om de cellulose te drogen. Dit project is nog in de opstartfase en er zijn dus nog geen pilot resultaten beschikbaar. Er zijn al wel lab testen uitgevoerd waarin zeefgoed opgewerkt is tot actiefkool.

4.3.5 HERGEBRUIK BELADEN KOOL UIT DRINKWATERSECTOR

Er wordt op dit moment onderzoek gedaan naar het hergebruiken van beladen kool uit de drinkwatersector om microverontreinigingen uit afvalwater te verwijderen. Dit onderzoek loopt nog en er zijn nog geen resultaten beschikbaar. Aandachtspunt bij deze kool is de beschikbaarheid, naar verwachting is deze niet toereikend om alle waterschappen van voldoende kool te voorzien voor PACAS.

4.3.6 INDUSTRIEEL GEBRUIKTE PAK

Een andere mogelijkheid om gebruikte PAK in te zetten in afvalwater, is het gebruik van beladen actief kool uit de industrie. Hierbij kan gedacht worden aan kool uit de levensmiddelen industrie, waar dit bijvoorbeeld wordt gebruikt voor het ontkleuren van voedingsmiddelen. Hier zijn waarschijnlijk grote hoeveelheden beschikbaar. Het is nog onbekend of deze reststromen geschikt zijn voor gebruik in de afvalwaterzuivering.

4.3.7 PYREG

PYREG heeft een installatie ontwikkeld waarmee verschillende reststromen gecarboniseerd en geactiveerd kunnen worden. Met deze installatie kunnen lokaal beschikbare organische (rest)stromen omgezet worden in actief kool. Er zijn reeds testen uitgevoerd met zuiveringsslib en houtafval. Dit biedt dus een mogelijkheid om lokaal beschikbare organische reststoffen om te zetten in een waardevol product.

5

SHORTLIST: KANSRIJKE DUURZAME-PAK'S

5.1 INLEIDING

Om de haalbaarheid van duurzame-PAK's vast te stellen dient in een laboratorium onderzoek het verwijderingsrendement van duurzame PAK's op de 11 indicatorstoffen te worden bepaald. Met het oog op een eventueel laboratorium onderzoek is in dit hoofdstuk de longlist met duurzame-PAK's terug gebracht tot een shortlist met de meest kansrijke duurzame-PAK's.

In paragraaf 5.2 is aan de hand van een multi criteria analyse een selectie gemaakt van meest kansrijke kolen.

5.2 VAN LONGLIST NAAR SHORTLIST

Om te komen tot een shortlist zijn in Tabel 5.2 de duurzame PAK's uit paragraaf 4.2.1 (longlist) beoordeeld aan de hand van de MCA criteria:

- Kosten
- Grondstof
- Herkomst grondstof
- Verwijderingsrendement
- Activatie methode
- Bereidheid van de leverancier om CO_2-footprint gegevens aan te leveren.

De criteria "Kosten", "Herkomst grondstof", "Verwijderingsrendement" en "Activatie methode" zijn kwalitatief beoordeeld met een −, 0 of +.

KOSTEN

Voor het waterschap is het van belang dat de kosten niet te hoog zijn. Te zien is dat de kosten van de geselecteerde kolen sterk uiteen lopen (zie Tabel 4.1). Omdat duurdere kolen in de praktijk echter goedkoper uit kunnen vallen als er veel minder van gedoseerd hoeft te worden zijn zowel goedkope als dure kolen meegenomen. Vanwege het ontbreken van verwijderingsrendementen en de daaraan gerelateerde doseringen worden de kolen voor dit aspect puur beoordeeld op de prijs per ton. Een prijs onder de 2.000 euro/ton resulteert in een +, bij 2.000-4.500 euro/ton een 0 en bij >4.500 euro/ton een -.

GRONDSTOF

Omdat de soort grondstof impact heeft op de bruikbaarheid en effectiviteit van de kool is er voor gekozen om verschillende soorten grondstoffen mee te nemen in de shortlist. De grondstoffen van de geselecteerde kolen lopen uiteen van kokosnootschil en diverse houtsoorten tot MDF-afvalhout en gereactiveerde steenkool. Het type grondstof bepaalt ook de duurzaamheid van een kool, zo is Europees afvalhout duurzamer dan Chinees hout van een plantage en ook kokosnootschillen zijn een duurzame bron omdat het een restproduct betreft.

HERKOMST GRONDSTOF

De herkomst van de grondstof is een aspect dat is meegenomen in de afweging bij het selecteren van de kolen. In verband met duurzaamheid is het wenselijk om afval- of restproducten te gebruiken. Daarnaast is het van belang of het hout afkomstig is van (duurzaam beheerde) plantages of dat er bos voor gekapt is. Ook is het van belang of het een lokale grondstof betreft of dat deze van ver aangevoerd dient te worden. Een PAK uit een duurzame reststroom scoort het beste (+),hout van een plantage buiten Europa scoort een 0 en een fossiele grondstof scoort het minst goed (-). Een verse grondstof uit een lokaal land zoals plantagehout uit Frankrijk scoort een + omdat het transport beperkt is en de plantages bewezen duurzaam zijn.

VERWIJDERINGSRENDEMENT

Als er al testen zijn gedaan met de kool waaruit kansrijke resultaten zijn gekomen is dit een pré en scoren de kolen een +, anders een 0.

ACTIVATIEMETHODE

De activatie methode is van belang omdat chemisch geactiveerde kolen extra veiligheidsmaatregelen vereisen bij toepassing in de praktijk. In verband met stofexplosiegevaar is het nodig om goed naar de ATEX-zonering te kijken en de daarbij behorende maatregelen te treffen. Chemisch geactiveerde koolsoorten brengen een extra uitdaging met zich mee omdat ze een lage zelfontbrandingstemperatuur hebben, waardoor meer veiligheidsmaatregelen nodig zijn, bijvoorbeeld werken met een inerte atmosfeer in de silo. De extra maatregelen brengen extra kosten en risico's met zich mee. Daarom hebben stoom geactiveerde kolen de voorkeur en scoren zij een +. Mede ook omdat de milieu-impact van stoom geactiveerde kolen naar verwachting lager is dan van chemisch geactiveerde kolen. Chemisch geactiveerde kolen scoren een -.

BEREIDHEID LEVERANCIER TOT OPENHEID IN CO_2-FOOTPRINT GEGEVENS

Wat tot slot is meegenomen in het selecteren van de kolen voor de shortlist, is de bereidheid van leveranciers om gegevens over de CO_2 footprint aan te leveren. Aangezien dit een vereiste is om de duurzaamheid van de kolen te kunnen kwantificeren.

SELECTIE KOLEN VOOR SHORTLIST

In Tabel 5.1 is de longlist met de bijbehorende scores per aspect. De kolen in het rood zijn niet opgenomen in de shortlist (de toelichting op de selectie van de shortlist volgt onder Tabel 5.1). In deze tabel wordt niet nader ingegaan op het aspect "Bereidheid leverancier tot openheid in CO_2-footprint gegevens". Bij alle leveranciers is extra navraag gedaan, de leveranciers waren bereid extra gegevens op te zoeken, echter bleek dat de CO_2-footprint in de meeste gevallen niet bekend was. Voor een aantal kolen zijn wel gegevens verstrekt, maar vanwege concurrentiegevoeligheid zijn deze niet in deze publicatie opgenomen.

TABEL 5.1 LONGLIST MET BEOORDELING DUURZAME PAK'S

Naam kool	Leverancier	Grondstof	Indicatieve kosten	Herkomst	Verwijderings rendement	Activatie methode	Totaalscore
Referentie: Pulsorb WP 235	Chemviron	Steenkool blend	0	-	+	+	1
Act & sorb product**	Act& sorb	MDF afvalhout	+	+	+	+	4
PAK C 1000 C	Carbotech	kokosnoot schillen	+	+	+	+	4
MAR-300	Carbon Activated Europe	hernieuwbaar, onbekend	-	0	+	+	1
WOS-PL1000	Carbon Activated Europe	hout	-	0	0	+	0
WHP-11	Carbon Activated Europe	hout	-	0	0	-	-2
Acticarbone 2SW	Chemviron	marine dennen hout	0	+	0	+	1
Acticarbone ENO H	Chemviron	marine dennen hout	0	+	0	-	-1
C-PURE®	Desotec	hout	0	0	0	-	-1
C-pure 200-7	Desotec	hout	0	0	0	-	-1
Organosorb 200-1 WB	Desotec	hout	+	0	0	+	2
Aquasorb G9	Jacobi carbon	hout	0	+	+	+	3
AquaSorb TM XP-W	Jacobi carbon	gereactiveerde steenkool (deels)	+	-	0	+	1
Oxpure 325W-10	Oxbow	hout	?	0	0	+	1
Oxpure 325W-12	Oxbow	hout	?	0	0	+	1
Oxpure 325W-9	Oxbow	hout	?	0	0	+	1
Pyreg kool *	Pyreg	variaties	?	+	0	+	2
Zeefgoed kool **	Waterschappen	Afvalwater	?	+	0	+	2

*op decentrale schaal omzetten van afvalstromen zoals snoeiafval in actief kool met een Pyreg installatie

**zeefgoed uit afvalwater is potentieel geschikt als grondstof voor actiefkool productie

Op basis van Tabel 5.1 is een shortlist opgesteld. Hierbij is niet uitsluitend de totaalscore leidend geweest. Alle kolen die op chemische wijze zijn geactiveerd zijn afgevallen. Daarnaast is er gekeken naar onderscheid tussen de kolen, voor de kolen van Carbon Activated en Oxbow stonden er 2-3 vergelijkbare kolen op de lijst. Hieruit is per leverancier 1 kool geselecteerd. Bij Carbon Activated is dit de MAR-300, omdat deze al in labtesten heeft laten zien een aantal van de gidsstoffen te kunnen verwijderen.

Voor de kolen van Oxbow geld ook dat de herkomst een "–" beoordeling had. Er stond daarnaast een kool op de longlist van Jacobi Carbon die deels uit gereactiveerde steenkool bestond, aangezien dit minder duurzaam is, is deze ook afgevallen. Daarnaast is er een kool van Desotec afgevallen die op vrijwel alle aspecten een "–" of "0" scoorde.

De uiteindelijke shortlist is weergegeven in Tabel 5.2 en bevat een variatie aan grondstoffen, reststromen, leveranciers en prijzen. De verschillende duurzame PAK's zijn duidelijk onderscheidend waardoor het meerwaarde biedt om deze kolen te testen en onderling te vergelijken.

TABEL 5.2 **SHORTLIST DUURZAME-PAK'S**

Naam kool	Leverancier	Indicative kosten Euro/ton	Grondstof kool	Verwijderings rendement testen uitgevoerd	Totaalscore
Referentie: Pulsorb WP 235	*Chemviron*	*1.950**	*Steenkool blend*		*1*
Act & sorb product**	Act& sorb	<2.000	MDF afvalhout	√	4
PAK C 1000 C	Carbo tech	1.410	kokosnootschil	√	4
MAR-300	Carbon Activated Europe	8.000	hernieuwbaar	√	1
Acticarbone 2SW	Chemviron	5.100	marine dennen hout		1
Organosorb 200-1 WB	Desotec	1.940	hout		2
Aquasorb G9	Jacobi carbon	2.500	hout	√	3
Oxpure 325W-10	Oxbow	vertrouwelijk	hout		1
Pyreg kool	Pyreg	ntb	Variaties		2
Zeefgoed kool	Waterschappen	ntb	zeefgoed		2

* Indicatieve prijs opgave van de leverancier. In dit onderzoek wordt overigens verder uitgegaan van een kostprijs van PAK op basis van steenkool van 2.000 euro/ton o.b.v. de richtlijnen die de STOWA en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gesteld hebben, zie ook: (Mulder, 2019).
** Deze kool is nog niet volledig commercieel beschikbaar, naar verwachting is halverwege 2020 de eerste productie in werking, samples van de kool zijn al beschikbaar

6

DOORVERTALING NAAR DE PRAKTIJK

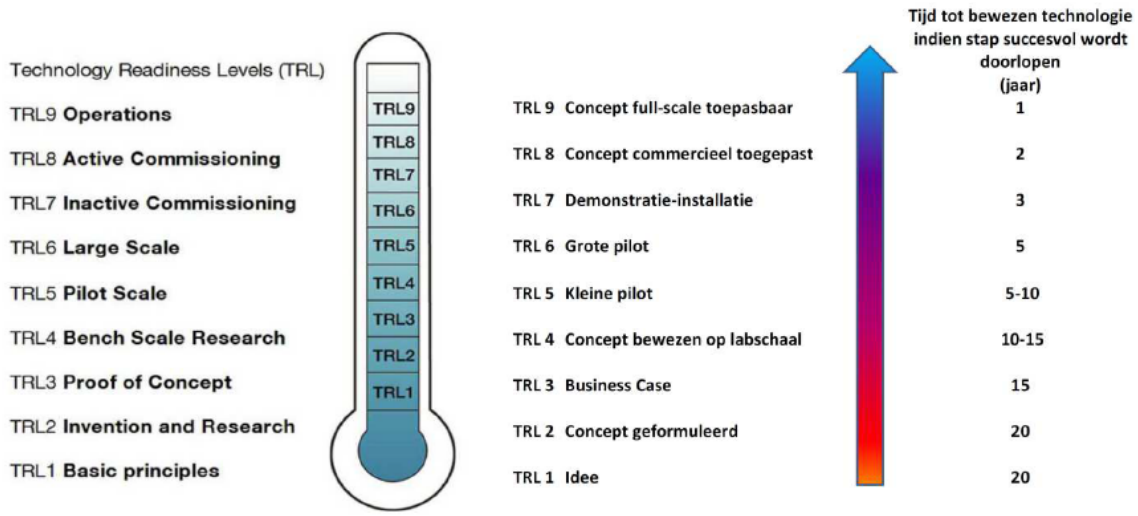
6.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is op basis van de resultaten van hoofdstuk 4 een doorvertaling naar de praktijk gemaakt. Daarbij komen de volgende aspecten aan bod: Technology Readiness Level, dimensioneringsgrondslagen, inpassing in de Nederlands praktijk en de kosten.

6.2 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

De toepasbaarheid van een technologie wordt mede bepaald door de zogenaamde technology readiness level (TRL). De TRL geeft aan in welk stadium van ontwikkeling de technologie zich bevindt. Bij een TRL van 1 gaat het nog om een idee en bij een TRL van 9 is het concept full-scale toepasbaar. Figuur 6.1 geeft de verschillende TRLs weer.

FIGUUR 6.1 TECHNOLOGY READINESS LEVELS, BRON: (MULDER, 2019)



Het PACAS proces is in Nederland getest op pilotschaal en draait op enkele zuiveringen in Zwitserland full-scale en heeft daarmee een TRL van 7/8.

Voor PACAS met hernieuwbare kool is het technology readiness level tussen de 3-5. Voor de meeste duurzame kolen is het verwijderingsrendement nog onbekend waardoor er laboratoriumonderzoek nodig is. Vervolgens kunnen de duurzame kolen met een goed verwijderingsrendement getest worden op pilotschaal. Aangezien het PACAS proces zelf al op een TRL van 7 zit, kan PACAS met hernieuwbare kool binnen afzienbare tijd van TRL 3-5 naar TRL 7 ontwikkelen.

6.3 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

Voor het PACAS proces gelden de volgende dimensioneringsgrondslagen:

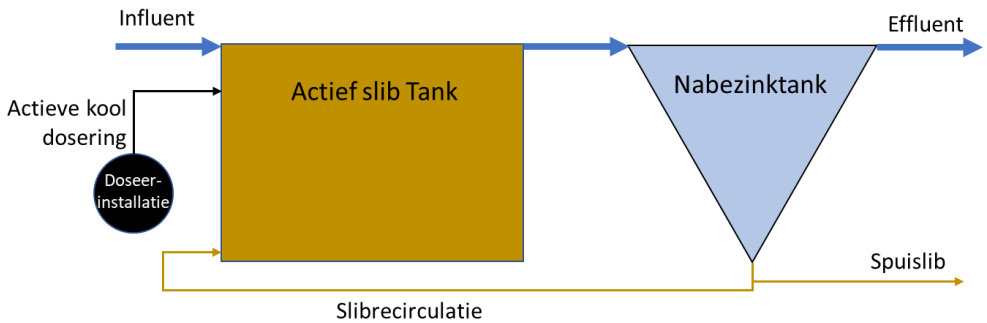
- Dosering PAC: 15 mg/l
- Ruimte voor doseerinstallatie is minstens 5x5 meter voor een grote silo van 80 m^3
- Doseerlocatie: in de actief slib tank
- Volautomatisch proces
- Behandeld deel van het afvalwater: Totaal afvalwaterdebiet, bij meer dan 2 maal DWA treedt er een regeling in werking waardoor de dosering niet verder omhoog gaat. Hierdoor kan er 15% kool bespaard worden op jaar basis.
- Effect op slibproductie: Als bij toepassing van het PACAS proces het slibgehalte toeneemt om het totale actiefslibvolume gelijk te houden neemt de slibproductie toe. In (STOWA, 2018) is berekend dat een dosering van 25 mg/l op de RWZI Papendrecht een 16% stijging van het spuislib tot gevolg zou hebben. Echter kan er ook voor gekozen worden om het slibgehalte gelijk te houden als de effluent eisen dit toelaten (de effluent kwaliteit verslechtert mogelijk bij een lager aandeel actief slib). Daarnaast heeft het toepassen van actiefkool een positief effect op de slibontwatering, waardoor er minder polymeer gedoseerd hoeft te worden. Tijdens de PACAS testen is er een 0,5-1,5% hoger drogestofgehalte behaald. Door de betere ontwaterbaarheid van het slib stijgt de totale hoeveelheid slibkoek niet tot nauwelijks. De dosering van poederkool een risico voor de verbrandingswaarde van ontwaterd slib en mogelijk ook voor de acceptatie door slibeindverwerkers. Op dit moment loopt hier vanuit de STOWA een onderzoek naar.

6.4 INPASSING IN NEDERLANDSE ZUIVERING PRAKTIJK

Uit eerder onderzoek is gebleken dat de PACAS methode geen negatief effect heeft op de effluentwaarden voor CZV, stikstof en zwevende stof. Voor fosfaat verwijdering lijkt zelfs een positief effect op te treden. Daarnaast verbetert de dosering van PAK de bezinkbaarheid en ontwaterbaarheid van actiefslib. (STOWA, 2018) Uit vervolg onderzoek zou moeten blijken of dit effect net zo sterk is voor kool uit niet fossiele bronnen.

Het PACAS principe is schematisch weergegeven in een processchema in Figuur 6.2. In principe hoeft er voor deze technologie alleen een PAK doseerinstallatie op de zuivering geplaatst te worden. Het PAK zal via de slibafvoer de zuivering verlaten. De benodigde oppervlakte van de doseerinstallatie voor een RWZI is ongeveer 25 m^2. De inspanningen van het personeel zijn bij deze technologie minimaal. Bij poederkool geactiveerd met chemicaliën zijn er aanvullende veiligheidsmaatregelen nodig.

FIGUUR 6.2 PROCESSCHEMA PACAS OP EEN EENVOUDIGE RWZI



Uit het PACAS onderzoek op de RWZI Papendrecht blijkt dat de PACAS methode voor de meeste RWZI's in Nederland toepasbaar is (STOWA, 2018). Hierbij is het belangrijk dat de RWZI niet volbelast is en het slibgehalte met 10-15% verhoogd kan worden om dezelfde hoeveelheid biologisch slib te kunnen handhaven. Daarbij moet ook gecontroleerd worden of de capaciteit van de nabezinktanks groot genoeg is. Aangezien er aanwijzingen zijn dat de bezinkbaarheid van het slib verbetert, hoeft er geen rekening gehouden te worden met een hogere SVI.

Het is ook mogelijk om het drogestofgehalte niet te verhogen, dan zal de slibbelasting toenemen. In dit geval moet er gekeken worden of de vereiste effluentkwaliteit gehaald kan worden. Daarnaast moet de slibeindverwerker geen bezwaar hebben tegen een zeker aandeel actiefkool in het slib.

6.5 KOSTEN

6.5.1 UITGANGSPUNTEN

De kosten voor PACAS met duurzame-PAK zijn in deze paragraaf vergeleken met de kosten voor het PACAS proces zoals vastgesteld in (STOWA, 2018). Het PACAS proces met PAK op basis van steenkool geldt dus als referentie. Ten opzichte van de referentievariant zijn de meer- of minderkosten van duurzame-PAK bepaald. Omdat de doseerinstallatie en bedrijfsvoering naar verwachting gelijk zijn aan het PACAS proces zijn de meer- of minderkosten voornamelijk afhankelijk van de prijs van de kool en de benodigde dosering om tot het gewenste verwijderingsrendement te komen.

De uitgangspunten die zijn gehanteerd voor het bepalen van de meer-/minderkosten zijn navolgend beschreven:

- Annuïtaire afschrijving:
  - 30 jaar Civiel
  - 15 jaar WBT en E
  - 5 jaar PA
  - 2,5% rente
- Onderhoudskosten
  - 0,5 % van bouwkosten voor civiel
  - 3% van bouwkosten voor W/E/PA
- Personeelskosten: € 50.000 per fte per jaar
- Inzet van 3 uur per week voor een rwzi van 100.000 i.e. (STOWA, 2018)
- Elektriciteit: € 0,10/kWh
- Polymeer: € 3,–/kg ingekocht product
- PAK op basis van fossiele grondstof: € 2,0 /kg (referentie PAK)
- PAK dosering van 20 mg/l[1]
- Slibverwerking: € 600 per ton ds (slibindikking, slibontwatering en
- slibeindverwerking incl. transport)

6.5.2 JAARLIJKSE KOSTEN

Op dit moment is nog niet bekend welk type duurzame-PAK het meest geschikt is en wat de optimale dosering is. De jaarlijkse kosten van duurzame-PAK zijn echter sterk afhankelijk van het type PAK en de benodigde dosering. De jaarlijkse kosten van duurzame-PAK zijn in deze

1 Om de kosten berekening vergelijkbaar te houden met het PACAS onderzoek is hier uitgegaan van 20 mg/l.

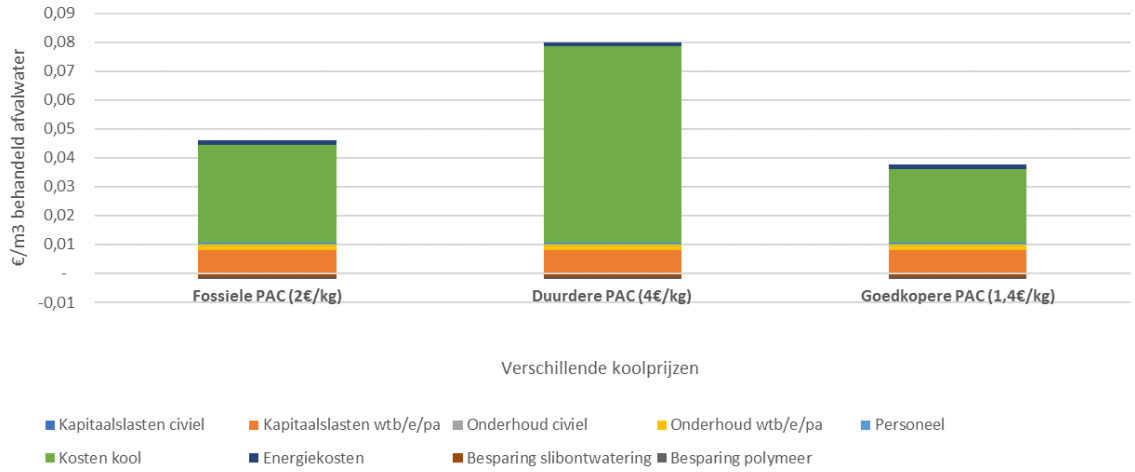
paragraaf daarom als gevoeligheidsanalyse uitgewerkt waarbij de volgende gevoeligheden zijn gedefinieerd:

- PAK prijs
- PAK dosering

PAK PRIJS

In Figuur 6.3 zijn de jaarlijkse kosten voor het referentie PACAS proces (fossiele PAK) opgenomen alsmede voor PACAS met duurzame-PAK. Omdat er verschillende prijzen zijn voor de kolen en de prijs van de duurzame-PAK een grote invloed heeft op de totale jaarlijkse kosten zijn er twee varianten uitgewerkt. De volledige jaarlijkse kosten berekening is opgenomen in Bijlage 4.

FIGUUR 6.3 JAARLIJKSE KOSTEN (IN EURO PER BEHANDELDE M^3) VAN PACAS O.B.V. VERSCHILLENDE KOOLPRIJZEN, FOSSIELE PAK PRIJS €2,- PER KILO, 2X DUURDERE PAK €4,0 PER KILO, GOEDKOPER PAK €1,4 PER KILO

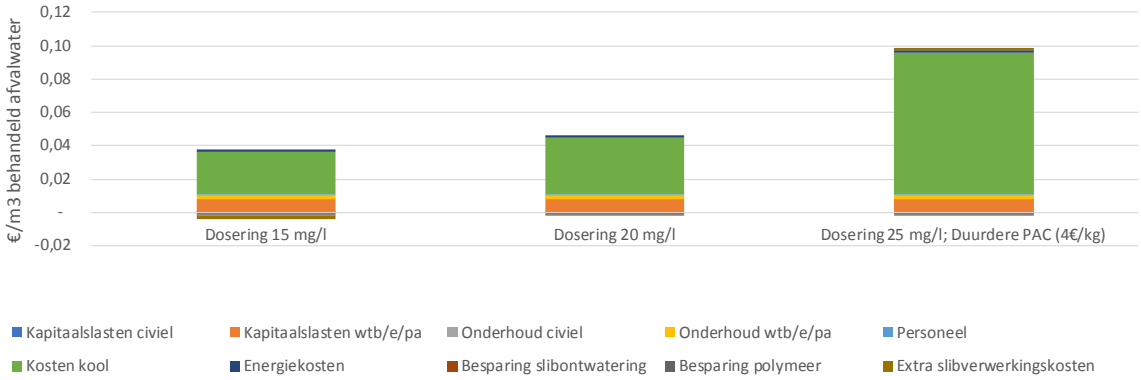


In Figuur 6.3 is te zien dat een verdubbeling van de PAK prijs bijna leidt tot een verdubbeling van de totale kosten per m^3 behandeld afvalwater (8 cent per m^3 in plaats van 4,5 cent per m^3). Een goedkopere PAK leidt juist tot een reductie van de kosten tot onder de 4 cent per m^3 behandeld afvalwater.

PAK DOSERING

Op basis van de expert interviews en literatuur is niet vast te stellen of het verwijderingsrendement van duurzame-PAK's gelijk is aan PAK op basis van steenkool. Via een gevoeligheidsanalyse is inzichtelijk gemaakt wat het effect is van een wijziging van de dosering. In Figuur 6.4 zijn de resultaten hiervan weergegeven. Voor het scenario waarbij 25 mg/l gedoseerd wordt is een worst case benadering aangehouden waarbij uit gegaan is van een twee keer hogere koolprijs (4 euro per kilo in plaats van 2 euro per kilo). De combinatie van een hogere dosering en een verdubbeling van de koolprijs leidt logischerwijs tot een kostenstijging per m^3 behandeld afvalwater. Een hogere kooldosering leidt ook tot een toename van de slibverwerkingskosten. Het is echter ook denkbaar dat de slibontwatering verder verbetert bij een hogere PAK dosering waardoor het totale effect op slibverwerkingskosten niet vast te stellen is. Vergeleken met de extra kosten voor de koolaanschaf zijn de kosten voor de slibverwerking echter gering.

FIGUUR 6.4 KOSTEN (IN EURO/ BEHANDELD M³) VAN PACAS O.B.V. VERSCHILLENDE DOSEERHOEVEELHEDEN EN VERSCHILLENDE PRIJZEN



In Figuur 6.3 is te zien dat de worst case benadering (combinatie van een dure kool en een dosering van 25 mg/l) resulteert in een prijs van circa 10 cent per m^3 tegenover 4,5 cent per m^3 bij een dosering van 20 mg/l. Bij een dosering van 15 mg/l bedraagt de prijs minder dan 4 cent per m^3, mits het verwijderingsrendement even goed is als de referentiekool.

Andere technieken om medicijnresten te verwijderen zijn ozonisatie en granulair actief kool. Voor deze technieken wordt nu uitgegaan van 0,17-0,26 €/m^3 behandeld afvalwater (Mulder, 2019). Dus zelfs als de kosten voor PACAS stijgen bij gebruik van een duurzamere kool zouden de kosten nog steeds lager kunnen zijn dan bij gebruik van alternatieve technieken.

7

LEEMTEN IN KENNIS EN DOORKIJK NAAR VERVOLGFASE(S)

Uit dit haalbaarheidsonderzoek zijn verschillende leemten in kennis naar voren gekomen. In dit hoofdstuk worden deze leemten in kennis beschreven en wordt ingegaan op hoe zij in de vervolgfase(s) geadresseerd kunnen worden.

VERWIJDERINGSRENDEMENT DUURZAME KOLEN EN EFFECT OP ECOTOXICITEIT

Het verwijderingsrendement op micro verontreinigingen is voor de meeste duurzame kolen nog niet getest. Voor de kolen waarmee al testen gedaan zijn, is niet op alle gidsstoffen getest. Het is daarom van belang om in een vervolgfase de verwijderingsrendementen van de kolen te testen. Om representatieve resultaten te verkrijgen is het van belang om te testen op een afvalwater matrix. In een vervolgfase zou er eerst een brede screening gedaan kunnen worden door middel van een schudtest op labschaal. Afhankelijk van de resultaten kunnen één of meerdere kolen daarna op praktijkschaal getest worden op de rwzi.

Via labtesten of een pilot onderzoek kan ook de ecotoxiciteit van het effluent op het ontvangende water worden vastgesteld (biologische effectmonitoring rwzi effluent) en worden vergeleken met PAK op basis van steenkool.

EFFECT OP RWZI

De effecten op de rwzi hangen samen met de dosering. Alleen een test op praktijkschaal kan inzicht geven in het effect van de duurzame kolen op het actief slib proces, de sliblijn en de slibproductie. Daarmee kan geverifieerd worden of dit vergelijkbaar is met het effect van actiefkool op basis van steenkool.

CO_2-FOOTPRINT

Er is weinig informatie beschikbaar over de CO_2-footprints van commercieel verkrijgbaar actiefkool. Producenten hebben weinig informatie over de oorsprong van het actiefkool, het productieproces en het resulterende energieverbruik. Het staat echter vast dat het gebruik van hernieuwbare grondstoffen een significante CO_2- reductie oplevert in vergelijking met actiefkool uit steenkool.

KOSTEN EN DOSERING

De kosten voor hernieuwbare actief kolen liggen zowel hoger als lager dan actiefkool op basis van steenkool. Het is nog niet bekend of waterschappen bereid zijn extra te betalen voor een kool met een lagere CO_2-footprint. De vraag welke prijs aanvaardbaar is voor een duurzame kool moet nog beantwoord worden. Om dit te kunnen bepalen is het eveneens van belang om te weten wat het verwijderingsrendement van de kool is en de daaraan gerelateerde dosering. Als er een lagere dosis nodig is van een duurdere kool zou dit kunnen betekenen dat de totale

kosten niet hoger uitvallen. Mogelijk kan de gereduceerde CO_2-footprint bij het gebruik van duurzame PAK's in de toekomst een kosten reductie opleveren als er een CO_2-heffing wordt doorgevoerd.

8

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

CONCLUSIES

Uit een inventarisatie bij 10 leveranciers van actiefkool is gebleken dat er 16 commercieel beschikbare duurzame poederactiefkolen (duurzame-PAK's) beschikbaar zijn. Op basis van de longlist is een shortlist met de 9 meest kansrijke duurzame PAK's opgesteld.

De kosten van de duurzame-PAK's in de longlist lopen uiteen van € 1,40 tot € 11,75 per kilo. Er zijn meerdere duurzame PAK's die een vergelijkbare prijs hebben als PAK uit steenkool à € 2,- per kilo.

Duurzame-PAK's worden geproduceerd uit afvalhout, hout van plantages (Europees en niet-Europees), kokosnoot schillen en andere duurzame grondstoffen zoals zeefgoed, snoeiafval en kool uit de drinkwater- en levensmiddenindustrie.

Duurzame-PAK's hebben een lagere CO_2 uitstoot dan PAK op basis van steenkool. Op basis van literatuuronderzoek en gesprekken met experts is de CO_2 uitstoot 59% lager.

Er is onvoldoende inzicht in de verwijderingsrendementen op micro verontreinigingen en de benodigde doseringen van duurzame-PAK's

Het PACAS proces is in Nederland getest op full scale en draait op enkele zuiveringen in Duitsland en Zwitserland full-scale en heeft daarmee een TRL van 7. Voor PACAS met hernieuwbare kool is het technology readiness level tussen de 3-5. Aangezien het PACAS proces zelf al op een TRL van 7 zit, kan PACAS met hernieuwbare kool binnen 5 jaar van TRL 3-5 naar TRL 7 ontwikkelen.

Al met al kan op basis van dit haalbaarheidsonderzoek geconcludeerd worden dat het zinvol is om in een vervolgfase PACAS met duurzame-PAK te onderzoeken. Het PACAS concept is bewezen, betaalbaar, op veel zuiveringen toepasbaar en door het gebruik van duurzame-PAK kan een grote reductie van de CO_2-footprint behaald worden.

AANBEVELINGEN

De verwijderingsrendementen op de 11 gidsstoffen en bijbehorende doseringen van duurzame-PAK's zijn niet bekend. Aanbevolen wordt om in een vervolgfase schudtesten uit te voeren. Uit het overzicht met 17 commercieel beschikbare duurzame PAK's (longlist) zijn hiertoe 9 duurzame PAK's geselecteerd (shortlist). Als referentie dienen schudtesten met PAK op basis van steenkool. Op dit moment wordt er door EAWAG een testprotocol ontwikkeld voor duurzame actief kolen, naar verwachting is deze binnenkort gereed. Dit zou in een vervolgfase als leidraad gebruikt kunnen worden voor de labtesten.

9

BIBLIOGRAFIE

A. Meier, M. B. (2019). Pulveraktifkohle-Welche Passt? Wahl, Beschaffung und Qualitätssicherung von PAK zur elimination von mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas*, 22-31.

A. Rößler, M. L. (2018). *Study with powder activated carbon of the Company Carbon Activated for review their suitability for the removal of organic micro-pollutants from municipal wastewater.* Micropolltants Competence Centre Baden-Württemberg, University of Stuttgart Institute for Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management.

DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6. (2016). Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung- Arbeitsbericht. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 1062-1067.

Hagemann, N., Thomas D. Bucheli*, A., & Hans-Peter Schmidt, I. I. (2019). Aktivkohle made in switzerland. *Aqua & Gas N1*, 32-38.

Hofman-Caris, R. (2019). Persoonlijke communicatie met.

Mi Hyung Kim, I. T. (2019). Analysis of environmental impact of activated carbon production from wood waste. *Environmental eng. res.*, 117-126.

Mulder, M. (2019, 4 23). Richtlijnen haalbaarheidsstudie innovatieprogramma microverontreingingen uit afvalwater. STOWA .

RVO. (2018). GER-waarden Database. *Ger-waarden en CO_2-lijst augustus 2018*.

STOWA. (2012-06). GER-waarden en milieu-impactscores prodcutie van hulpstoffen in de waterketen.

STOWA. (2015). *Verwijdering van microverontreinigingen uit effluenten van rwzi's, een vertaling van kennis en ervaring uit Duitsland en Zwitserland. 2015-17.*

STOWA. (2015-37). *Verkenning pyrolyse/ carbonisatie zuiveringsslib en andere biomassa stromen.* STOWA.

STOWA. (2017-36). *Verkenning technologische mogelijheden voor verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater.* STOWA.

STOWA. (2018). *PACAS- Poederkooldosering in actiefslib voor verwijdering van microverontreinigingen, 2018-02.* STOWA.

BIJLAGE 1

LIJST GERAADPLEEGDE EXPERTS

TABEL 9.1 GERAADPLEEGDE EXPERTS

Organisatie	Contactpersoon	Toelichting
Aquaminerals	Ronny Teune	
EAWAG aquatic research en micropoll	Marc Böhler	
Kompetenzzentrum B-W	Marie Launay	
Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW	Demet Antakyali en Ilka Gerke	Op dit moment niet beschikbaar in de rol van NRW
VSA-Plattform “Verfahrenstechnik Mikroveruntreinigungen” = Micropoll	Aline Meijer	
PYREG	Marcel Rensmann	
Mavitec	Michael Mcgolden	
Universiteit Kassel	Frank Hengsen	Allen mail contact, in later stadium beschikbaar voor interview
Ithaka insitituut/ Agroscope, EMPYRION project	Dr. Nikolas Hagemann	
Fraunhofer society	Ilka Gerke	
Waterschap Emschergenossenschaft/Lippeverband	Linh-con Pahn	
Activated Carbon Europe	Tjalling van Asbeck	
CABOT	Jantien Foekema en Helmert van Rheenen	
Carbotech	Jim Naylor	
Chemviron	Marc Sonneville	
Desotec	Jeroen van de Castele	
Jacobi Carbons	Jan van den Dikkenberg	
Oxbow activated carbon	Peter Campbell	
Eurocarb	Carsten Schledorn	
Brenntag	Marcel Breuker	
Act and Sorb	Kenny van Reppelen	
Carbonauten	Christoph Hiemer	

BIJLAGE 2

OVERIGE EIGENSCHAPPEN ACTIEF KOOL

RELEVANTE BEGRIPPEN ROND OM ACTIEFKOOL BRON; (A. MEIER, 2019)

Specifiek binnen oppervlak (BET)
Specifiek binnen oppervlak van een poreuze stof in m2/g.

Jodiumgetal
Een van de meest voorkomende parameters voor karakterisering van de adsorptiecapaciteit van geactiveerde koolstoffen. Het jodiumgetal geeft aan welke hoeveelheid jodium in oplossing per gram PAK kan worden geadsorbeerd [mg / g]. Omdat precies één jodiumatoom een adsorptieplaats inneemt, correleert het nummer met het binnenoppervlak.

Melassegetal
Dit is een maat voor de mate van verkleuring van een gestandaardiseerde oplossing.
Melassegetallen van verschillende actieve koolstoffen variëren enorm. Deze parameter geldt als maat voor de inhoud van macroporiën.

Methyleenblauw nummer
Hoeveelheid van de aromatische kleurstof methyleenblauw, die wordt geadsorbeerd door actief kool, dit geeft een indicatie over het aantal mesoporiën. Dit is tot nu toe weinig gestandaardiseerd.

Nitrobenzeen nummer
Er is vraag naar kolen waarbij 90% eliminatie van gemakkelijk adsorbeerbaar nitrobenzeen optreed.

Klopdichtheid
Quotiënt van de massa van een in bepaalde hoeveel gecomprimeerde bulk en zijn volume.

Poriegrootteverdeling
De gemiddelde diameter van de microporiën ligt tussen 0,2 en 1 nm, deze poriën dragen met ongeveer 95% aan het binnenoppervlak bij en is cruciaal voor adsorptie. Aanzienlijk lager is het aandeel van mesoporiën met ongeveer 5% en een diameter van rond 1 tot 25 nm. Ze staan centraal in de massatransport naar het binnenste van de actief kool kern. De macroporiën hebben geen betekenis voor het binnenoppervlak.

BIJLAGE 3

EIGENSCHAPPEN VAN DE COMMERCIEEL BESCHIKBARE KOLEN

TABEL 9.2 EIGENSCHAPPEN VAN DE COMMERCIEEL BESCHIKBARE KOLEN (1 VAN 3)

Productnaam	Producent	Bronmateriaal	Herkomst hout	Productie locatie
Referentie: Pulsorb WP 235	Chemviron	Steenkool blend		
PAK C 1000 C	Carbo tech	kokosnoot schillen		azië
C-PURE®	Desotec	hout		
MAR-300	Carbon Activated Europe	hernieuwbaar	vers hout, afhankelijk van beschikbaarheid welke soort	India
WOS-PL1000	Carbon Activated Europe	hout	vers hout, afhankelijk van beschikbaarheid welke soort	India
WHP-11	Carbon Activated Europe	hout	vers hout, afhankelijk van beschikbaarheid welke soort	India
Organosorb 200-1 WB	Desotec	hout	inheemse struik uit India, specifiek geteeld voor PAK productie	
C-pure 200-7	Desotec	hout	inheemse struik uit India, specifiek geteeld voor PAK productie	
Oxpure 325W-10	Oxbow	hout	china, lokaal hout	
Oxpure 325W-12	Oxbow	hout	china, lokaal hout	
Oxpure 325W-9	Oxbow	hout	china, lokaal hout	
Acticarbone 2SW	Chemviron	marine denne hout	Industrieel bos in Frankrijk “landes Forest”	
Acticarbone ENO H	Chemviron	marine denne hout	Industrieel bos in Frankrijk “landes Forest”	
Aquasorb G9	Jacobi carbon	hout	De grondstof is het bijproduct van de verwerking van vers hout, zoals zaagafval. Een volledige herkomst en certificering kan niet worden gegeven.	
AquaSorb TM XP-W	Jacobi carbon	deels gereactiveerde steenkool		
Act &sorb	Act& sorb	MDF afvalhout		

TABEL 9.3 EIGENSCHAPPEN VAN DE COMMERCIEEL BESCHIKBARE KOLEN (2 VAN 3)

Productnaam	Iodine (mg/g)	BET- oppervlaktegebied (m2/g)	Porie structuur	Methyleen blauw getal	bulkdichtheid losse verpakking (kg/m3)	maximale watergehalte (gew-%)
Referentie: Pulsorb WP 235	850				350	5
PAK C 1000 C	1000	1050	microporeus		420	8
C-PURE®						
Aktivkohle CWZ - 22	580					12
MAR-300	1020				300-400	10
WOS-PL1000	1000					5
WHP-11	1100		Macroporiën	240		10
Organosorb 200-1 WB	900	900		250	330	12
C-pure 200-7	950	1500				
Oxpure 325W-10	1000	ongeveer 1,1 * iodine nummer				5
Oxpure 325W-12	1150	ongeveer 1,1 * iodine nummer				5
Oxpure 325W-9	900	ongeveer 1,1 * iodine nummer				5
Acticarbone 2SW	925			>12 ml/100mg		5
Acticarbone ENO H	1175			22 ml/100 mg		
Aquasorb G9	950	1050	mesoporeus		250	5
AquaSorb TM XP-W	800	900	mesoporeus		325	5
Act &sorb	1000	1000	microporeus			

TABEL 9.4 EIGENSCHAPPEN VAN DE COMMERCIEEL BESCHIKBARE KOLEN (3 VAN 3)

Productnaam	Gemiddelde watergehalte (Gew-%)	Klopdichtheid (g/ml)	Gemiddeld asgehalte (%)	Maximum asgehalte (%)	Molasse nummer	Activatie methode
Referentie: Pulsorb WP 235						stoom
PAK C 1000 C			3			stoom
C-PURE®						chemisch
Aktivkohle CWZ - 22		0,3				
MAR-300	4		8	10		stoom
WOS-PL1000				10		stoom
WHP-11				6		chemisch
Organosorb 200-1 WB			8			stoom
C-pure 200-7					450	chemisch
Oxpure 325W-10		0,35	8			hoge temperatuur
Oxpure 325W-12		0,3				hoge temperatuur
Oxpure 325W-9		0,3	8			hoge temperatuur
Acticarbone 2SW				7	>160	stoom
Acticarbone ENO H	35-45			4	>450	chemisch geactiveerd met fosforzuur
Aquasorb G9		0,38		8		
AquaSorb TM XP-W		0,5		max 20 w/w%	max 350	
Act &sorb						stoom

BIJLAGE 4

RESULTATEN UIT HET EMPYRION I PROJECT

Resultaten uit het Empyrion I project. Bron: (Hagemann, Thomas D. Bucheli*, & Hans-Peter Schmidt, 2019)

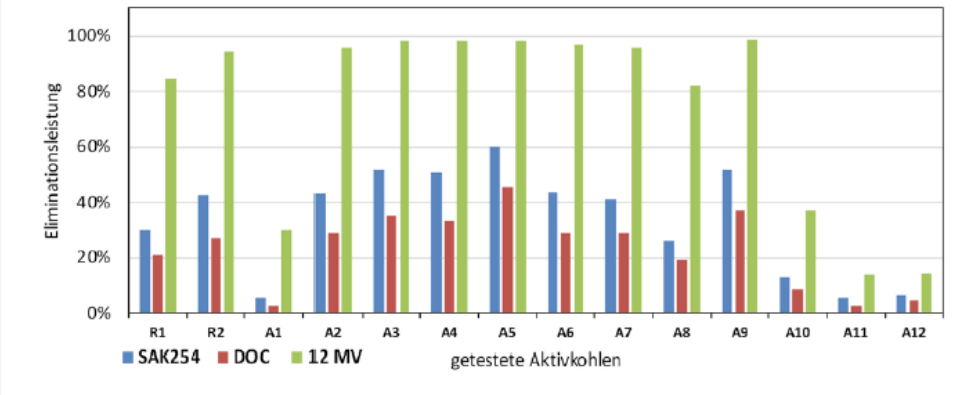


Fig. 3 Eliminationsleistungen der Aktivkohlen R1, R2, A 1–A 12 (siehe Tab. 1) in Bezug auf SAK 254, DOC und die in der Verordnung des UVEK gelisteten 12 Mikroverunreinigungen (12 MV). Die Versuche wurden in biologisch behandeltem Abwasser mit DOC = 4,9 mg/l und mit einer PAK-Dosierung von 2,8 g PAK/g DOC durchgeführt.

	Ausgangsmaterial	Gas zur Aktivierung	Potenzielle Oxidation[a]	Ertrag[b]	BET [m²/g]
R1	Donau Carbon Carbopal AP: vermutlich fossile Kohle			n/a	804
R2	Norit SAE Super: vermutlich Torf, Holz, ggf. fossile Kohle			n/a	912
A1	Buchenholz, pyrolysiert, nicht aktiviert		0%	15%	345
A2	Buchenholz	Dampf	50%	7%	780
A3	Buchenholz	Dampf	100%	3%[c]	913
A4	Buchenholz	Dampf, CO_2	100%	4%	899
A5	Pflanzenkohle (600 °C) aus Fichte und Tanne	Dampf	–50%	9%	741
A6	Fichten- und Tannenholz	Dampf	100%	6%	1235
A7	Holziges Siebüberkorn einer Kompostierung	Dampf	–50%	10%	945
A8	Borke/Rinde von Nadelhölzern	Dampf	50%	19%	549
A9	Mischholz/Holzhackschnitzel	Dampf	100%	10%	826
A10	Klärschlamm Herisau (enthält 13% Carbopal) mit Mischholz (Trockenmasseverhältnis 1:1,2)	Dampf	–50%	16%	190
A11	Klärschlamm Herisau (enthält 13% Carbopal)	Dampf	–50%	59%	106
A12	Faulschlamm Werdhölzli	Dampf	–50%	50%	65

[a] Die «potenzielle Oxidation» beschreibt das (molare) Verhältnis von Aktivierungsgas zum Kohlenstoffgehalt des Ausgangsmaterials; eine höhere potenzielle Oxidation generiert einen höheren Aktivierungsgrad.
[b] Der Ertrag wurde experimentell als Verhältnis von Aus- zu Eintrag an der PYREKA bestimmt.
[c] Bei hohen Aktivierungsgraden wird der Ertrag unterschätzt, da in der Versuchsanlage leider sehr feines Kohlepulver nicht vollständig vom Abgasstrom getrennt werden kann und damit zum Teil nicht im Kohleaustrag gesammelt wird, sondern mit dem Abgas nachverbrannt wird.

Tab. 1 Übersicht über die ausgewählten Aktivkohlen und den Massenertrag der Produktion.

BIJLAGE 5

JAARLIJKSE KOSTEN BEREKENING

TABEL 9.5 UITGANGSPUNTEN KOSTEN BEREKENING PACAS EN PACAS OP BASIS VAN DUURZAME KOOL

Parameter	Eenheid	PACAS o.b.v steenkool. (volgens : (STOWA, 2018))	PACAS o.b.v. duurzame poederkool
Capaciteit rwzi	i.e 150 g TZV	100.000	100.000
Dagdebiet	m3/d	20.800	21.000
Jaardebiet	m3/jaar	7.592.000	7.665.000
Uurdebiet	m3/h	1.326	875
Slibproductie biologisch	ton DS/j	1.295	1.295
Dagvracht PAK	kg PAC/d	416	420
Setpoint kooldosering	kg/m3	0,02	0,02
Hoeveelheid poederkool/jaar	ton	129	130
Slibproductie zonder PACAS	ton ontwaterd /jaar	5.628	5.628
Slibproductie met PACAS	ton ontwaterd /jaar	5.523	5.523
Slibproductie met PACAS	ton ds/jaar		1.380
Besparing PE-verbruik met PACAS kg	kg PE/ton ds	1	1
Kosten kool	euro/ton	2000	2000
Totale investering	€	800.000	800.000
Slibontwatering	€/ton ontwaterd	30	
Slibeindverwerking	€/ton ontwaterd	70	
Prijs polymeer	€/kg	3	3
Slibverwerkings kosten	euro/ton ds		600
E-verbruik	kWh/jaar	113.880	113.880
	€/kWh	0,1	0,1
	€/jaar	11.388	11.388

TABEL 9.6 JAARLASTEN PACAS MET DUURZAME POEDERKOOL

Parameter	Eenheid	PACAS o.b.v steenkool. (volgens : (STOWA, 2018))	PACAS o.b.v. duurzame poederkool
Kapitaalslasten civiel	€/jaar	2.464	2.464
Kapitaalslasten wtb/e/pa	€/jaar	59.969	59.969
Onderhoud civiel	€/jaar	156	156
Onderhoud wtb/e/pa	€/jaar	13.500	13.500
Personeel	€/jaar	7.200	4.800
Kosten kool	€/jaar	258.128	260.610
Energiekosten	€/jaar	11.388	11.388
Besparing slibontwatering	€/jaar	-10.545	-10.545
Besparing polymeer	€/jaar	-3.976	-3.976
Totaal	€/jaar	338.283	338.366
	€/m^3	0,045	0,044
	€/i.e.	3,38	3,38