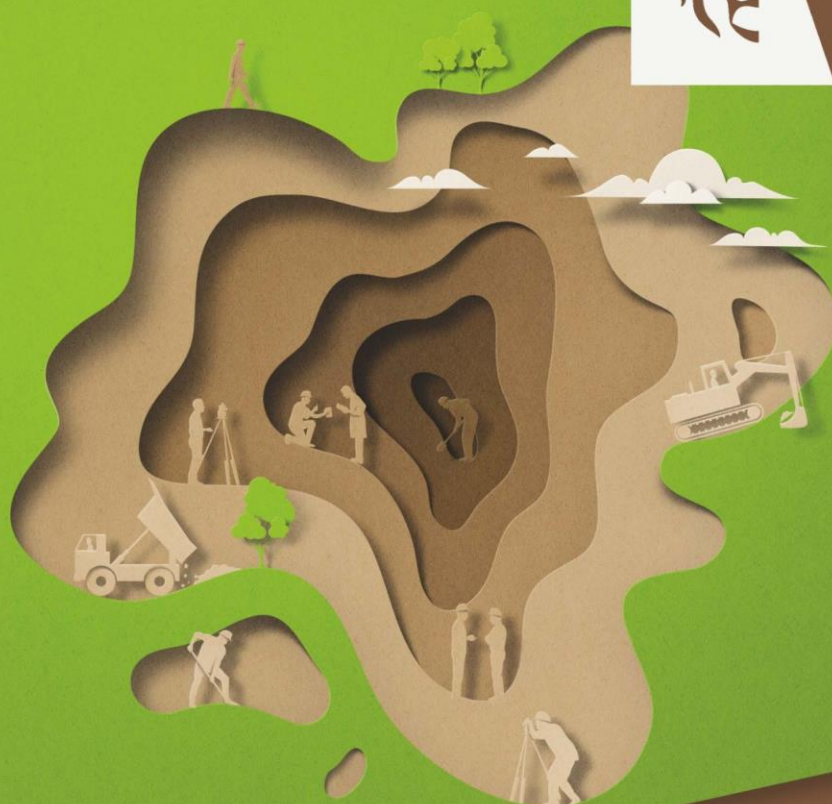




Vlaanderen
is bodembewust



GRONDREINIGING PFAS

BEKNOPT LITERATUURSTUDIE EN MARKTBEVRAGING GRONDREINIGING

SAMEN MAKEN WE
MORGEN MOOIER

OVAM

WWW.OVAM.BE

Beknopte literatuurstudie en marktbevraging
grondreiniging
publicatiedatum: 25.10.2021

DOCUMENTBESCHRIJVING

- 1 *Expertadvies PFAS – Beknopte literatuurstudie en marktbevraging grondreiniging*
- 2 *Verantwoordelijke Uitgever:*
OVAM
- 3 *Wettelijk Depot nummer:* 2016
- 4 *Trefwoorden:*
PFAS, fluorcomponenten, grondreiniging
- 5 *Samenvatting:*
Deze studie omvat een beknopte literatuurstudie en marktbevraging van de reiniging van PFAS houdende gronden in Vlaanderen en omliggende regio's. De studie is een "state of the art" van de grondverwerking door fysicochemische behandeling, door thermische desorptie met naverbranding in de gasfase en door het storten
- 6 *Aantal bladzijden:* 42
- 7 *Aantal tabellen en figuren:* /
- 8 *Datum publicatie:*
2021
- 9 *Prijs*:* /
- 10 *Begeleidingsgroep en/of auteur:*
Dirk Van Look (RSK), Richard Lookman (RSK), Baue Boonen (RSK), Karen Van Geert (Arcadis), Samuel Van Herreweghe (Witteveen + Bos), Patriek Casier (OVAM)
- 11 *Contactpersonen:*
Patriek Casier (OVAM)
- 12 *Andere titels over dit onderwerp:* /

INHOUD

1	INLEIDING.....	6
1.1	Opdrachtschrijving	6
1.2	Werkwijze	6
2	Beknopte Literatuurstudie	8
2.1	Behandelingstechnieken voor de vaste bodemfase	8
2.1.1	Inleiding	8
2.1.2	Fysicochemisch reinigen	9
2.1.3	Thermische desorptie met verbranding van de gasfase	9
2.1.4	Sorptie en stabilisatie	10
2.1.5	Fytoremediatie	12
2.2	Behandelingstechnieken voor de waterfase	14
2.2.1	Inleiding	14
2.2.2	Sorptie op actief kool	14
2.2.3	Ion-uitwisselingsharsen	14
2.2.4	Flocculatietechnieken	15
2.2.5	Andere behandelingstechnieken	15
3	Grondreiniging in Vlaanderen	18
3.1	Inleiding	18
3.2	Fysicochemische grondreiniging	19
3.2.1	Beschrijving van de techniek	19
3.2.2	Behandelbaarheid in functie van samenstelling	19
3.2.3	Fysicochemische reiniging van PFAS-houdende grond	19
3.2.4	Besluit	23
3.3	Thermische grondreiniging	24
3.4	Storten	25
4	Grondreiniging in Nederland	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Fysicochemische grondreiniging	27
4.2.1	Beschrijving van de techniek	27
4.2.2	Fysicochemische reiniging van PFAS-houdende grond	27
4.2.3	Besluit	30
4.3	Thermische grondreiniging	31
4.3.1	ATM	31
4.3.2	Theo Pouw	34
4.4	Storten	34
5	Grondreiniging in Duitsland	37
5.1	Fysicochemische grondreiniging	37
5.2	Thermische grondreiniging	37
6	Samenvatting en Besluit	38
	Bijlage 1 referenties.....	41

TABELLENLIJST

Tabel 1.1: Geraadpleegde partijen/stakeholder	7
Tabel 3.1: Kostenstructuur fysicochemische grondreiniging in Vlaanderen	24
Tabel 4.1: Kostenstructuur fysicochemische grondreiniging in Nederland	30
Tabel 4.2: Acceptatiecriteria voor thermische grondbehandeling bij ATM (andere dan PFAS)	33
Tabel 4.2: Randvoorwaarden niet-reinigbaarheidsverklaring in Nederland (Bodemplus, 2021b)	36

FIGURENLIJST

Figuur 2.1: 5 Opties voor de aanpak van met PFAS verontreinigde bodem (uit: Bolan et al, 2021a) ..	9
Figuur 2.2: Visualisatie van de fysisch-chemische interacties tussen PFAS en natuurlijke bodembestanddelen (uit: Mei et al., 2021)	10
Figuur 2.3: Opname en translocatie van PFAS door een plant in een PFAS-verontreinigde bodem (uit: Mei et al., 2021)	13
Figuur 2.4: Verspreiding van PFAS tussen bodem-plant- dier/mens en biologische afvalstoffen (uit: Bolan et al, 2021a)	13
Figuur 2.5: waterzuivering toegepast door HMVT voor een met PFAS verontreinigde grondwaterstroom	15

1 INLEIDING

1.1 OPDRACHTOMSCHRIJVING

Onderhavige studie betreft een studie van de op dit moment (internationaal) beschikbare reinigingsmogelijkheden en -technieken voor gronden (inclusief waterbehandeling) verontreinigd met PFAS (per- en poly-gefluoreerde alkylstoffen).

Meer bepaald wordt in dit rapport op vraag van de OVAM ingegaan op:

- Reinigingstechnieken met bewezen haalbaarheid minstens op pilotschaal of sterke geloofwaardigheid naar slaagkansen;
- Haalbaarheid van reinigingstechnieken op basis van de grondsamenstelling;
- Haalbaarheid van reinigingstechnieken op basis van de verontreinigingsconcentraties;
- Haalbaarheid van reinigingstechnieken op basis van te bereiken concentraties na reiniging;
- Opgave per techniek van de reinigingscapaciteit in Vlaanderen en de onmiddellijk aanpalende grensregio's.

De nadruk van de studie ligt op de mogelijkheden van off-site reiniging van PFAS-houdende gronden. Daar bij deze grondreiniging eveneens (proces)waterbehandeling een belangrijk onderdeel vormt, wordt eveneens aandacht aan de waterbehandelingstechnieken besteed.

Gezien in West-Europa op dit ogenblik relatief weinig saneringen met PFAS-houdende gronden zijn voltooid, is deze studie bij uitstek een momentopname.

1.2 WERKWIJZE

Bij de uitvoering van deze opdracht werd enerzijds door middel van rechtstreekse bevestigingen bij relevante marktpelers/specialisten gepolst naar de reeds beschikbare ervaring op dit vlak, in binnen- en buitenland. Tevens werd een beperkte literatuurstudie uitgevoerd, met focus op de meest recente (review)publicaties over uitgevoerde (piloot)saneringen en saneringstechnieken voor grond- en waterreiniging.

Omdat de studie specifiek voor de Vlaamse situatie is bedoeld, werden met name Vlaamse en Nederlandse stakeholders (zie Tabel 1.1) voor deze opdracht benaderd en/of geïnterviewd. Voor de literatuurstudie werd een beperkte screening uitgevoerd van de meest recente beschikbare wetenschappelijke informatie, met vertrekpunt de website van de ITRC, waarvan de belangrijkste items werden samengevat. Gezien werd vastgesteld dat het wetenschappelijk onderzoek m.b.t. de sanering van PFAS recent in een enorme stroomversnelling is gekomen, zich uitend in een exponentieel groeiend aantal wetenschappelijke publicaties in dit domein, werd de literatuurstudie in dit rapport beperkt tot hoofdzakelijk review-artikels, aangevuld met enkele andere relevante documenten. Opgemerkt wordt dat de literatuurstudie bewust beknopt werd gehouden; een volledig overzicht van alle wetenschappelijk beschikbare informatie maakt geen deel uit van onderhavige opdracht.

Tabel 1.1: Geraadpleegde partijen/stakeholder

Partij	Contactpersonen	Contactgegevens	Datum
Afvalzorg	Martin Van Bostelen	m.vanBostelen@afvalzorg.nl	29/07/2021
HMVT	Paul Verhaagen, Wouter Neutel	paul.verhaagen@hmvn.nl wouter.neutel@hmvn.nl	03/08/2021
NVPG	Jaap Ven der Bom	j.vdbom@nvpg.nl	03/08/2021
DEME/GRC Kallo	Dirk Ponnet, Philippe Goossens	ponnet.dirk@deme-group.com goossens.philippe@grckallo.be	03/08/2021
RSK Nederland	Gertjan Loeffen	gloeffen@rskgroup.nl	04/08/2021
ATM	Rob Van Zundert	rob.v.zundert@renewi.com	05/08/2021
Jansen Recycling	Marianne Kleingeld	mkleingeld@ajansenbv.com	09/08/2021
Bioterra	Wouter Vermin	wouter.vermin@bioterra.be	09/08/2021
Grondbank	Andy Heurckmans	andy.heurckmans@grondbank.be	17/08/2021
Envisan	Annick Van Hyfte Pieterjan Waeyaert Ivo Pallemans	annick.vanhylte@envisan.com pieterjan.waeyaert@envisan.com ivo.pallemans@envisan.com	18/08/2021
Suez	Erik Sweevers Pietro Perseo	erik.sweevers@suez.com pietro.perseo@suez.com	19/08/2021
Grondwijzer vzw	Timothy Geerts	timothy.geerts@grondwijzer.be	19/08/2021
RSK England (CoE*)	Lucy Thomas	lthomas@rsk.co.uk	24/08/2021
RSK Alenco (Germany)	Michael Schubert Axel Hammel	mschubert@rskgroup.de ahammel@rskgroup.de	02/09/2021
Theo Pouw	Eric Vogelzang	evogelzang@theopouw.nl	03/09/2021
OVB**	Dirk Ponnet	ponnet.dirk@deme-group.com	14/09/2021
ARE Deutzen gmbH	Jürgen Thiel	juergen.thiel@are-deutzen.de	17/09/2021
Desotec	Aron Libert	aron.libert@desotec.com	20/10/2021
Renewi	Benoit Singier	benoit.singier@renewi.com	21/10/2021

*Centre of Excellence; **OVB: Ondernemers Vereniging Bodemsaneerders

2 BEKNOPTE LITERATUURSTUDIE

In dit rapport werd in eerste instantie vertrokken van het overzicht van saneringsmogelijkheden dat wordt gegeven door het ITRC. Dit bevat een gedetailleerde beschrijving van de (in Amerika) beschikbare/gangbare/bewezen saneringstechnieken voor PFAS verontreinigde materialen (grond, slib, water...) (ITRC, 2021). In dat overzicht zijn ook technieken vermeld die nog volop in ontwikkeling zijn.

In het overzicht van de ITRC worden de beschikbare PFAS behandelingstechnieken ingedeeld naar mate van ontwikkelingsniveau en de mate waarin de techniek reeds (succesvol) werd toegepast, en tevens op basis van het huidige vertrouwen in de technologie op basis van “peer-reviewed” literatuur en “expert judgement” van de auteurs. Er bestaan daarnaast verschillende beloftevolle maar nog niet bewezen technologieën voor de behandeling van zowel water als vaste bestanddelen die zowel ex-situ (ontgraven, oppompen) als in-situ kunnen worden toegepast. De in de USA effectief uitgevoerde (proef)saneringen voor PFAS in de waterfase zijn volgens ITRC momenteel echter beperkt tot ex-situ technologieën of tot technologieën die de PFAS immobiliseren of overbrengen naar een ander medium, maar waarbij de PFAS stoffen zelf *niet worden vernietigd*.

De reeds bewezen technieken worden door ITRC ingedeeld in twee groepen:

1. Behandelingstechnieken voor de vaste bodemfase
2. Behandelingstechnieken voor de (grond)waterfase

2.1 BEHANDELINGSTECHNIEKEN VOOR DE VASTE BODEMFASE

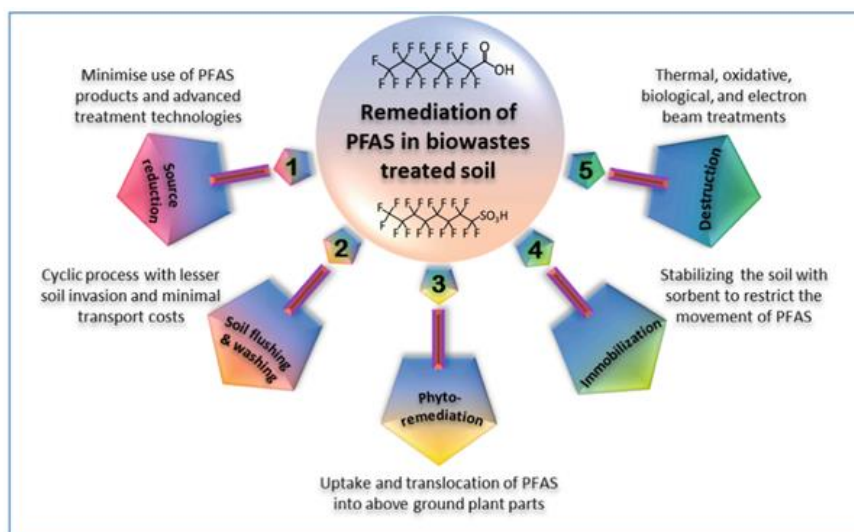
2.1.1 Inleiding

De samenvatting van het ITRC-overzicht geeft een overzicht van beloftevolle saneringstechnologieën, zoals grondwassen (verder fysicochemische grondreiniging genoemd). Off-site thermische desorptie met verbranding van de gasfase is een gekende behandelingstechniek waarbij PFAS stoffen worden vernietigd. Biologische saneringstechnieken voor PFAS destructie zijn weinig belovend. Tot op heden zijn er immers geen (micro)organismen bekend die PFAS volledig kunnen mineraliseren (ITRC, 2021).

In sommige gevallen kan het noodzakelijk zijn om op korte termijn acties te ondernemen gericht op het verminderen van het verspreidingsrisico van de PFAS (via stabilisatietechnieken zoals het toedienen van immobiliserende agentia). De optie “civieltechnische beheersing” (het plaatsen van boven- en onderafdichtingen) kan ook worden overwogen in specifieke gevallen, maar wordt hier verder buiten beschouwing gelaten omdat dit geen behandelingstechniek betreft maar loutere (in-situ) isolatie.

Verder wordt fytoremediatie vermeld. Deze techniek zou toepasbaar kunnen zijn indien de randvoorwaarden voor de sanering gunstig zijn. N.B. bij fytoremediatie worden de PFAS door de plant opgenomen; niet afgebroken.

Een overzicht van deze grondbehandelingstechnieken voor het vaste deel van de aarde wordt in figuur 2.1 (Bolan et al, 2021a) weergegeven.



Figuur 2.1: 5 Opties voor de aanpak van met PFAS verontreinigde bodem (uit: Bolan et al, 2021a)

2.1.2 Fysicochemisch reinigen

Het principe van deze techniek is eenvoudig: de verontreinigde grond wordt ontgraven en fysicochemisch (FC) in een vaste of mobiele installatie gereinigd (Goovaerts L., et al., 2006).

Na FC kan de gereinigde zandfractie nuttig worden hergebruikt; de slib/organische fractie met de PFAS moet echter worden gestort of verder behandeld.

In België en Nederland wordt off-site fysicochemische reiniging op grote schaal toegepast (zie hoofdstukparagraaf 3)

2.1.3 Thermische desorptie met verbranding van de gasfase

De verontreinigde grond wordt off-site opgewarmd in een roterende trommel die wordt verhit tot een temperatuur waarbij de PFAS vervluchtigen. De damp wordt vervolgens verbrand in een verbrandingskamer ('incinerator'). De rookgassen worden vervolgens gekoeld en gewassen alvorens te worden geloosd in de atmosfeer. De verbrandingsassen kunnen worden gestort, al dan niet na behandeling, als aan de acceptatievoorwaarden van de stortplaats wordt voldaan. Vliegassen kunnen in de cementindustrie worden verwerkt.

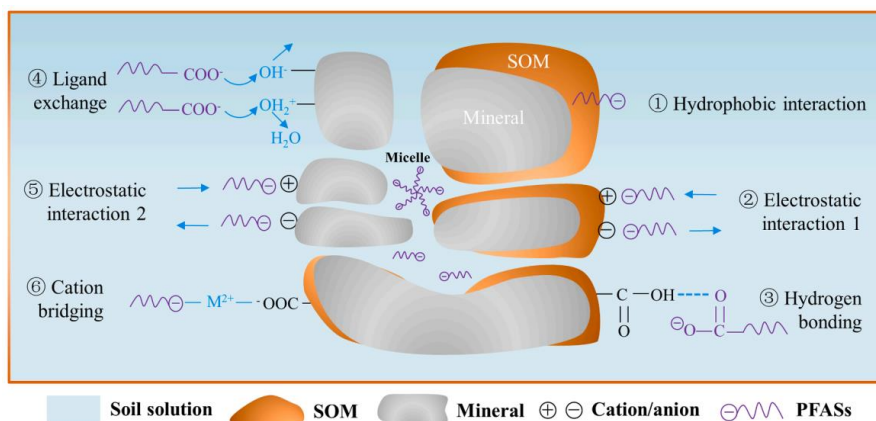
De technologie is bewezen en kan zowel worden toegepast op vaste als op vloeibare PFAS-verontreinigde materialen. Het is één van de weinige gekende technieken die in staat is de PFAS daadwerkelijk te *vernietigen* in plaats van te *verplaatsen naar een ander milieucompartiment*. Verbranding van gehalogeneerde organische verbindingen gebeurt door moleculaire decompositie en radicalaire reacties. Er zijn hogere temperaturen nodig om gefluoreerde koolwaterstoffen te doen uiteenvallen dan voor gechloreerde koolwaterstoffen. Met name het breken van C-F bindingen vergt veel energie. De moeilijkst afbreekbare gefluoreerde koolwaterstof is CF₄. Daarvoor is een temperatuur vereist van meer dan 1400°C. Deze stof dient dus zeker te worden gemonitord in de geloosde rookgassen bij thermische sanering van PFAS-verontreinigde grond (EPA, 2020).

Bij toepassing van deze techniek moet ook voldoende aandacht worden besteed aan eventuele co-polluenten in de grond (bvb asbest, zwavel, zware metalen...). De vliegassen kunnen een potentieel risico voor het milieu vormen. Hoewel de meeste organische stoffen zullen zijn vernietigd/vervlogen, geldt dit niet voor de anorganische stoffen.

De vereiste temperatuur voor de vernietiging van de PFAS is, zoals hierboven vermeld, hoog: >1200-1400 °C. Thermische reiniging van PFAS houdende grond vergt dus zeer veel energie. Er zou bovendien slechts gedeeltelijke afbraak kunnen optreden, met potentiële uitstoot van PFAS in de atmosfeer. Ook de CO₂-uitstoot is zeer aanzienlijk, niet enkel door het rechtstreeks energieverbruik voor de verhitting van de grond en verbranding van de gasfase, maar ook door de omzetting van de van nature in de bodem aanwezige organische stof naar CO₂ tijdens het proces.

2.1.4 Sorptie en stabilisatie

Principe: er worden toeslagstoffen ingemengd in de verontreinigde bodem/slib die de mobiliteit (uitloogbaarheid) van de PFAS doen dalen. PFAS adsorberende materialen zijn bij voorbeeld actief kool, biochar, bepaalde alumino-silicaten... De toepassing ervan kan zowel in-situ gebeuren (grondmixing) als ex-situ (na ontgraving). De immobilisatie gebeurt enerzijds door elektrostatische binding tussen de negatief geladen functionele groep van de PFAS molecule, en de positieve lading op het oppervlak van het sorptiemiddel en anderzijds door hydrofobe interacties tussen het sorptiemiddel en de fluor-koolstofketen van de PFAS molecule. Dit is in principe een “versterking” van de natuurlijke adsorptiemogelijkheden van PFAS in een bodem (figuur 2.2; SOM = “soil organic matter”, oftewel organische stof). ITRC vermeldt als reeds toegepaste immobilisatiemiddelen: actief kool en een mengsel van aluminium hydroxide en kaolinit. Ook amorf/microkristallijn ijzer (ferrihydriet) zou in principe PFAS moeten adsorberen omdat het net als aluminiumhydroxide, anionen kan binden.



Figuur 2.2: Visualisatie van de fysisch-chemische interacties tussen PFAS en natuurlijke bodembestanddelen (uit: Mei et al., 2021)

McGregor R. (2020) beschrijven de resultaten van zes piloottesten waarin de in-situ saneringsmogelijkheden van PFAS werden onderzocht door de injectie van reagentia. Deze betroffen 2 verschillende oxidatiemiddelen (waterstofperoxide en natriumpersulfaat) enerzijds, en 4 types adsorbentia, namelijk actief kool in poedervorm, colloïdaal actief kool, ionuitwisselingshars en biochar. De oxidatiemiddelen hadden geen positief (remediërend)

effect; in tegendeel: zij leken de PFAS eerder te mobiliseren. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de oxidatiemiddelen de natuurlijke organische stof in de bodem vernietigen, en zo de aan deze organische stof geadsorbeerde PFAS vrijstellen. De uitgeteste adsorptiemiddelen hadden echter wél een duidelijk concentratieverlagend effect van PFAS in de aquifer.

Sorengard et al. (2021) voerden een pilootproef uit op 6 ton met PFAS verontreinigde grond, waarbij 15% cement en 0,2 % GAC werd ingewerkt. Zowel de behandelde partij grond als de oorspronkelijke grond zonder toeslagstof werd gedurende 6 jaar beregend (gesimuleerde neerslag) en PFAS bepaald in de uitgeloopte waterfase. In de behandelde partij was er > 97 % minder uitloging van PFHxA, PFOA, PFHxS en PFOS, maar slechts 3% minder uitloging van de PFAS met korte-ketenlengte (o.a. PFPeA). Met aangepaste receptuur kan e.e.a. mogelijk verbeterd worden. Er kan ook geëxperimenteerd worden met andere toeslagstoffen, bij voorbeeld **biochars** in plaats van actief kool.

Sormo et al. (2021) voegden **geactiveerde biochars** (geproduceerd uit afvalhout) toe aan grond met een hoog PFAS gehalte (1200–3800 µg/kg), in doses van 0; 0,1; 0,5; 1 en 5%. Bij de hoogste dosering werd de uitloogbaarheid van de PFAS met 98 tot zelfs 100% gereduceerd. Indien de verontreinigde bodems van nature veel organische stof bevatten, was de reductie in uitloogbaarheid bij toediening van biochar echter minder hoog. Dit is vermoedelijk een gevolg van PFAS-sorptie aan (mobiele) humuszuren en/of verstopping van de biocharporiën door humus(zuren). Niet-geactiveerde biochars zijn minder geschikt dan geactiveerde biochars. Hoe hoger de activatie-temperatuur, hoe sterker de biochar de PFAS adsorbeert, bleek uit de studie. PFAS met langere ketens adsorberen sowieso sterker aan biochars dan de kortere-keten PFAS. De werking van biochars is specifiek en dus afhankelijk van het uitgangproduct. Biochars op basis van cacaoschillen hebben andere specifieke adsorptie-eigenschappen dan biochars op basis van bvb berkensnippers. De natuurlijke poriegrootte speelt daarbij een rol.

We kunnen concluderen dat immobilisatietechnieken nuttig kunnen zijn en relatief snel, eenvoudig en goedkoop kunnen worden toegepast om de uitloogbaarheid van PFAS in verontreinigde gronden te reduceren. Echter, het belangrijkste nadeel is dat de PFAS aanwezig blijven aan de oorspronkelijke concentratie (in het vaste deel van de aarde). De evolutie van de uitloogbaarheid in de tijd moet door testen aangetoond kunnen worden en onder de mogelijke diverse terreinomstandigheden worden bevestigd. Ten slotte kan opgemerkt worden dat het toedienen van toeslagstoffen ook leidt tot enige verlaging van de PFAS concentraties door verdunning. De mate van verdunning is uiteraard evenredig aan de massa van de toeslagstof per massa-eenheid te behandelen bodem.

2.1.5 Fytoremediatie

Gobelius, et al. (2017) onderzochten de opname van 26 verschillende PFAS stoffen in planten op een brandweer-oefensite van de luchthaven van Stockholm. PFAS concentraties waren 16 - 160 µg/kg ds in de grond en 1,2 - 34 µg/L in het grondwater. Er werden stalen genomen van verschillende lokale plantensoorten en van verschillende plantendelen (wortels, stam/kern, takken, bladeren/naalden).

De PFAS-gehalten in de planten waren erg variabel met de hoogste PFAS concentraties aanwezig in de bladeren (berk) en naalden (spar) van bomen (tot 97 µg/kg en 94 µg/kg, resp.). Eénjarige kruiden en struiken vertoonden lagere PFAS gehalten, namelijk 7 à 23 µg/kg. De bioconcentratiefactoren (tussen plant en bodem) waren het grootst in de bladeren, met een grootste PFAS accumulatie per boom van 11 mg (som PFAS) voor berk en 1,8 mg voor spar. Dit maakt fytoremediatie met bladverliezende bomen, waarbij de PFAS-aangerijkte bladeren worden verzameld en verwerkt, een mogelijke bodemsaneringstechniek. De auteurs schatten dat het mogelijk is op deze wijze per jaar 1,4 g PFAS per hectare te verwijderen.

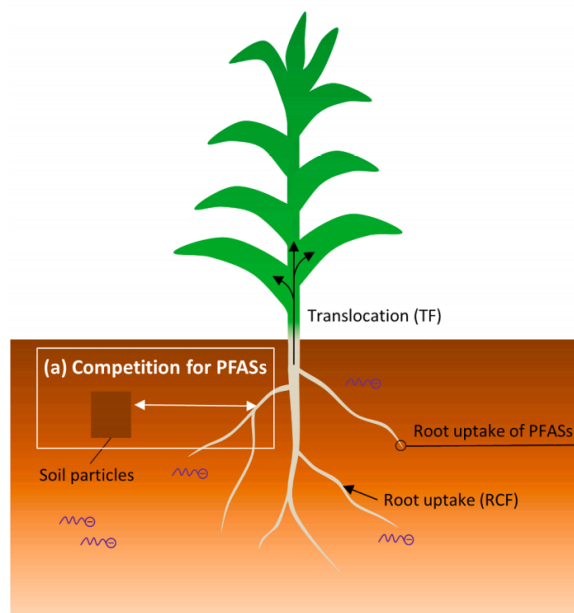
Mei et al. (2021) zagen in hun experimenten dat de translocatie van PFAS vanuit de bodem naar de bovengrondse plantendelen (figuur 2.3) sterk verband hield met de graad van hydrofobiciteit van de PFAS (hoe langer de ketens, dus hoe meer hydrofoob, hoe moeilijker de translocatie van de PFAS naar de bovengrondse plantendelen verloopt. Dit verband zagen ze niet in de worteldelen van de plant.

Nason et al. (2021) beschrijven de resultaten van een fytoremediatieproject voor een PFOS site (concentraties tot 150 µg/kg) door het telen van hennep. Ze zagen dat PFOS concentraties in de bodem daalden tijdens de groei van de hennep en dat de PFAS zich opstapelden in de planten. Dit was vooral het geval voor de PFAS met kortere ketens t.o.v. deze met langere ketens. De laatst genoemde sorberen sterker in de bodem en waren dus moeilijker opneembaar door de planten.

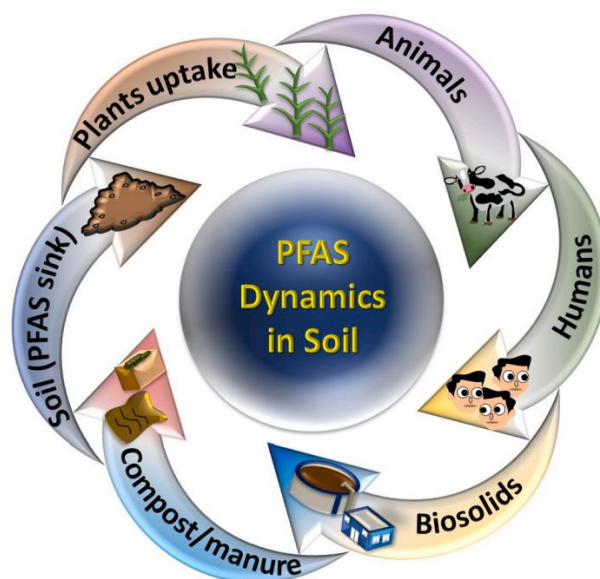
Wanneer PFAS opgenomen worden in planten kunnen deze via een kringloop uiteindelijk ook weer terugkeren naar de bodem (figuur 2.4). Bij gebruik van fytoremediatie moet dus een zorgvuldige massabalans opgemaakt worden en de PFAS-aangerijkte fracties afgevoerd ter verdere verwerking/behandeling/stort.

Deze saneringsmethode zou geschikt kunnen zijn voor landbouwgebieden die over grote oppervlakten 'licht' verontreinigd zijn met PFAS in de bovenlaag, boven de toepasselijke ontwerp bodemsaneringsnormen¹. Deze saneringstechniek is nog niet algemeen bewezen. Het is aangewezen de financiële en technisch haalbaarheid van deze techniek verder te onderzoeken vooraleer op grote schaal toe te passen.

¹ Ontwerp bodemsaneringsnormen voor landbouw als bestemming: 3.8 µg/kg ds PFOS en 4.3 µg/kg ds PFAS(OVAM, richtlijn PFAS-onderzoek, 5.03.2021)



Figuur 2.3: Opname en translocatie van PFAS door een plant in een PFAS-verontreinigde bodem (uit: Mei et al., 2021)



Figuur 2.4: Verspreiding van PFAS tussen bodem-plant- dier/mens en biologische afvalstoffen (uit: Bolan et al, 2021a)

2.2 BEHANDELINGSTECHNIEKEN VOOR DE WATERFASE

2.2.1 Inleiding

De behandelingstechnieken voor de waterfase kunnen in verschillende omstandigheden gebruikt worden. We vermelden enkele belangrijke toepassingen:

- behandeling van met PFAS verontreinigd drink- of grondwater;
- hydraulische beheersing van de PFAS verspreiding via het grondwater;
- reiniging van het proceswater van de fysicochemische grondreiniging. De reiniging van het proceswater verhoogt het rendement van de fysicochemische grondreiniging.

De belangrijkste waterzuiveringstechnieken zijn sorptie op actief kool en ion-uitwisselingsharsen. Er zijn diverse andere behandelingstechnieken die kunnen ingeschakeld worden als onderdeel van een waterbehandelingstrein.

2.2.2 Sorptie op actief kool

Een van de standaardmethoden die momenteel gebruikt worden om PFAS te verwijderen uit water is adsorptie op granulair actief kool (GAC). De totale omvang van gebruik van GAC is zeer groot.

Gebruik van GAC voor PFAS veroorzaakt echter een nieuwe afvalstroom, namelijk met PFAS beladen GAC (Baghirzade et al., 2021). Een ander groot nadeel is dat GAC voor PFAS zeer snel 'doorslaat', al bij beladingsgraden van ca. 0,1%. Vooral PFAS met korte ketenlengtes worden minder goed geadsorbeerd. Voor VOCI's is de adsorptiecapaciteit veel hoger, orde van grootte van 7 – 10%. Toch blijft het gebruik van actief kool als zuiveringstechniek voor PFAS belangrijk, zeker indien geoptimaliseerde regeneratietechnieken worden toegepast en een goede keuze wordt gemaakt in type actief kool. Zo heeft "goedkopere" actief kool op steenkoolbasis minder goede adsorptie-eigenschappen voor PFAS dan op kokos gebaseerde actief kool. Geregeneerde kool op basis van kokos is economisch een goed alternatief (Concawe, 2021). Echter het rendement (maximale belading) is steeds afhankelijk van het type PFAS. PFAS met korte ketenlengtes worden minder goed geadsorbeerd dan PFAS met langere ketenlengtes.

2.2.3 Ion-uitwisselingsharsen

PFAS kunnen goed worden verwijderd uit water met behulp van ion-uitwisselingsharsen (resins). De techniek kan ook gecombineerd worden met actief kool, omdat ion-uitwisseling meer effectief is voor korte-keten PFAS (die slecht verwijderd worden door actief kool). De opnamecapaciteit voor PFOA en PFOS ligt in de orde van grootte van 5 mmol/g voor commercieel beschikbare harsen zoals IRA 958 en IRA 67 (Dixit, et al., 2021). Een andere voorbeeld van veel toegepaste harsen voor PFAS is PFA694 van Purolite.

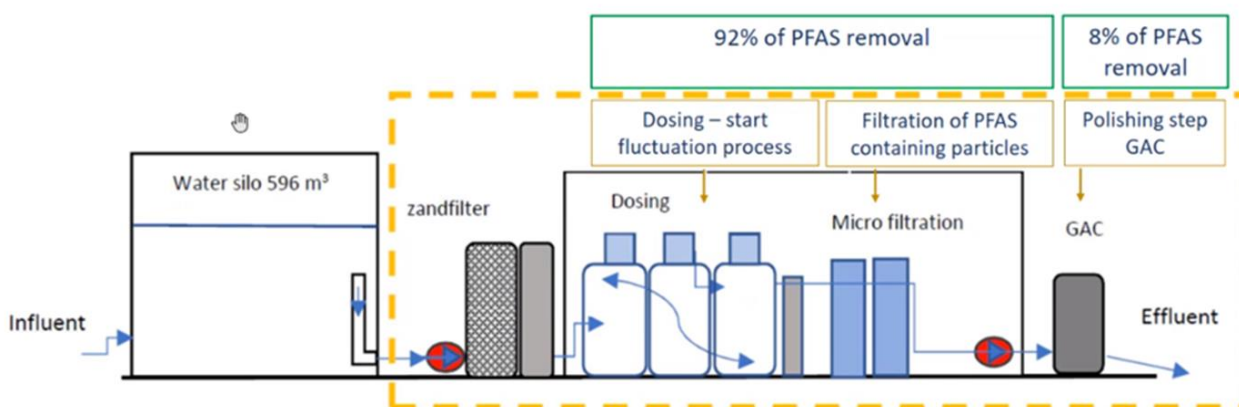
Zoals dit ook voor actief kool het geval is, wordt de opnamecapaciteit negatief beïnvloed indien naast PFAS, andere (sterker) sorberende stoffen in het water aanwezig zijn. Harsen op basis van polystyreen vertonen preferentiële verwijdering van PFAS t.o.v. natuurlijke organische stoffen (humuszuren e.d.). Bepaalde resins kunnen worden geregeneerd.

Ion-uitwisselingsharsen worden in behandelingscentra voor fysicochemische grondreiniging toegepast. We verwijzen naar het overleg met grondreinigers in Vlaanderen en Nederland (zie paragrafen 3.2.3 en 4.2.2). Zo gebruikt Jan De Nul (JDN) het ionuitwisselingshars Lewatit Monoplus M500 (mededeling JDN).

2.2.4 Flocculatietechnieken

Cornelsen et al. (2021) concluderen dat de bekende waterbehandelingstechnieken, met name het gebruik van adsorptiemiddelen of ionenwisselaars, vaak niet voldoende verwijderingsrendement kunnen garanderen, en dat deze vaak niet economisch verantwoord zijn bij hoge PFAS concentraties of moeilijke matrixomstandigheden (aanwezigheid van andere adsorberende stoffen dan PFAS). De combinatie met speciale precipitatiemiddelen als **extra zuiveringsstap** kan dan een significant beter zuiveringsresultaat opleveren. Dit principe werd door HMVT reeds toegepast in de praktijk, voor de zuivering van een PFAS-houdende grondwaterstroom (Paul Verhaagen, HMVT, persoonlijke mededeling). Het systeem maakt enkel gebruik van actief kool in de nazuiveringsfase ('polishing'). Het hoofdaandeel van de verwijdering (92%) van de PFAS gebeurt door toevoeging van een adsorbens/flocculans (Perfluor Ad®, een vloeibaar kationisch polymeer). De met PFAS beladen vlokken worden vervolgens verwijderd door microfiltratie en de reststroom met actief kool behandeld (Figuur 2.5).

- Flow rate 1,5-2,0 m³/hr
- Emission level PFAS 1 µg/l (ppb)



Figuur 2.5: waterzuivering toegepast door HMVT voor een met PFAS verontreinigde grondwaterstroom

2.2.5 Andere behandelingstechnieken

Hieronder worden nog enkele andere behandelingstechnieken weergegeven (niet-limitatief). De meeste zijn bewezen technieken op labo-schaal maar dienen nog verder ontwikkeld/getest te worden om de haalbaarheid ervan op full-scale aan te tonen.

2.2.5.1 Omgekeerde osmose

Gekende en bewezen waterzuiveringstechniek, echter met een vrij hoge kostprijs (Goovaerts L., et al., 2006). Het retentaat, met hoge PFAS-concentraties, moet bovendien nog worden behandeld.

2.2.5.2 Zeolieten

Zeolieten zijn ook een mogelijk adsorbens voor PFAS. Van den Bergh et al. (2020) testten een hydrofoob 100%-silica zeoliet Beta voor dit doel. Het zeoliet is volgens deze auteurs zeer selectief en heeft een hoge capaciteit voor PFAS, zelfs als er andere organische stoffen aanwezig zijn in de waterfase. Na verzadiging kunnen de geadsorbeerde PFAS terug gedesorbeerd worden bij 350 °C (regeneratie), waarna de zeolieten herbruikbaar zijn. Dit is een groot voordeel t.o.v. organische PFAS adsorbenten, zoals actief kool of ionen uitwisselingsharsen maar het dient onderzocht te worden of de zeolieten effectief en herhaaldelijk volledig regenereerbaar zijn. Verder dient uiteraard de opgeconcentreerde PFAS-houdende fase verder behandeld te worden.

2.2.5.3 Adsorptie door gemodificeerde klei

Dong et al (2021) toonden aan dat PFOA en PFOS goed uit waterstromen kan worden verwijderd door gemodificeerde natuurlijke klei. Natuurlijke klei is een goedkope grondstof wegens overal op aarde voorkomend. Ze dragen echter van nature een negatieve oppervlaktelading en zijn daardoor niet rechtstreeks geschikt om anionische PFAS te verwijderen (zoals PFOA en PFOS). Na modificatie, bijvoorbeeld met quaternaire ammoniumzouten, bekomt men een zeer groot en sterk adsorberend oppervlak per gewichtseenheid toegediende behandelde klei, dus een goed adsorptiemiddel voor PFAS. Voorbeelden van commercieel verkrijgbare producten zijn FLUORO-SORB®, een oppervlakte-behandeld mineraal op bentonietbasis, en Rembind® (Concawe, 2021).

2.2.5.4 Elektrochemische oxidatie

Elektrochemische oxidatie is een techniek waarbij de PFAS in principe volledig kunnen worden gemineraliseerd en dus definitief verwijderd uit het milieu (Radjenovic J. et al., 2020). Het werkingsprincipe is PFAS destructie aan de anode, in een "klassieke" elektrolyse-opstelling. De techniek is bewezen op laboratoriumschaal, en zou volgens de auteurs opgeschaald kunnen worden tot industriële schaal mits gebruik gemaakt wordt van de nieuwste electrode ontwikkelingen: 3-dimensionele, poreuze electrodematerialen met nanocoatings. Een aandachtspunt is naar welke eindproducten de PFAS gemineraliseerd worden en de mate waarin de destructie volledig optreedt bij full-scale toepassing van de techniek.

2.2.5.5 Fotokatalytische afbraak

PFAS in waterstromen kunnen ook fotokatalytisch worden afgebroken (Cui et al., 2020; Xu et al., 2021). Deze methode maakt gebruik van sulfiet, iodide,...in combinatie met UV licht. PFOA, PFOS en andere PFAS zijn volledig afbreekbaar, maar het afbraakmechanisme is sterk afhankelijk van het type PFAS. Het zuiveringsrendement hangt daarnaast sterk af van de pH, de dosis aan reagentia, opgeloste zuurstof, humuszuren, nitraatgehalte en temperatuur. Fotokatalytische afbraak wordt door deze auteurs beschouwd als een relatief goedkope,

beloftevolle technologie voor PFAS verwijdering die gecombineerd zou kunnen worden met elektrochemische oxidatie of membraanfiltratie. Verder pilotschaal onderzoek is echter nodig.

2.2.5.6 Sono-chemische afbraak

Sono-chemische technieken zijn gekend in waterzuiveringsprocessen voor het verwijderen van allerlei organische polluenten. Tijdens sonificatie ontstaan in de waterfase microbelletjes die aangroeien in opeenvolgende cycli. Zodra de belletjes een onstabiele diameter bereiken, storten ze ineen (cavitatie). Hierbij worden drukgolven geproduceerd in de orde van grootte van honderden atmosfeer waardoor de temperatuur ter hoogte van de interfase water-luchtbel oploopt tot 1000 à 1500 K. Onder deze omstandigheden worden PFAS aanwezig in de interfase water-lucht, gepyroliseerd. Voordelen van de techniek zijn de operationele eenvoud, veiligheid en het feit dat geen schadelijke nevenproducten zouden worden gevormd (Cao et al., 2020). Voor PFAS werd de techniek al in vele studies toegepast in laboratoriumtesten. Deze toonden alle een uitstekend potentieel, waarbij bovendien de PFAS volledig werden afgebroken (gemineraliseerd). De techniek werd ook al met succes toegepast op veldschaal om PFOA en PFOS in grondwater en percolaatwater van stortplaatsen te behandelen (o.a. Cheng et al., 2010).

Inhibitie kan optreden indien hoge concentraties aan andere (vluchtige) organische verbindingen en/of bicarbonaten aanwezig zijn. Het proces kan versneld worden in combinatie met ozon en bij lagere pH.

2.2.5.7 Schuim- en ozo-fractionering

Schuimfractionering maakt gebruik van gecomprimeerde lucht die als belletjes in het water wordt toegediend. De PFAS hechten zich aan de interfase water-lucht en worden in het gevormde schuim opgeconcentreerd. Dit PFAS-houdend schuim wordt bovenaan in het zuiveringssysteem afgescheiden en dient dan verder te worden behandeld (bvb thermisch, voor PFAS destructie; Concawe, 2021). Ozo-fractionering is een variant op bovenstaande procestechniek. Hierbij wordt geen lucht maar ozon als belletjes geïnjecteerd in het verontreinigde grondwater via een aantal in serie geschakelde reactoren. De PFAS worden ook bij deze techniek opgeconcentreerd in het gas-water oppervlak in de reactor en kunnen worden verwijderd als concentraat voor verdere verwerking. De ozon vernietigt de meeste aanwezige organische stoffen in het water en zet de PFAS precursors om in PFAA. Deze laatste hebben een sterkere surfactantwerking en zijn daardoor gemakkelijker te scheiden met dit proces. Korte-keten PFAS zijn moeilijker te verwijderen. Er moet ook altijd een nazuivering voorzien worden met bv actief kool. De techniek is beduidend duurder dan de “standaard” zuivering op actief kool, en komt vooral in aanmerking voor sterk met PFAS verontreinigd water (German Environment Agency, 2020).

3 GRONDREINIGING IN VLAANDEREN

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk beschouwen we drie methodes van grondbehandeling in Vlaanderen, nl. de fysicochemische behandeling, de thermische behandeling en het storten van PFAS houdende gronden. Deze behandelingsmethodes worden respectievelijk in paragrafen 3.2, 3.3 en 3.4 besproken.

De fysicochemische behandeling van PFAS verontreinigde gronden is een bewezen techniek. De grondreiniging kan toegepast worden op voorwaarde dat de PFAS gereinigde gronden in aanmerking komen voor hergebruik. De grondreiniging is bijgevolg gekoppeld aan de regels voor grondverzet. Gereinigde grondpartijen die per definitie uitsluitend buiten de kadastrale werkzone een toepassing vinden, kunnen hetzij vrij hergebruikt worden, hetzij als bodem gebruikt worden mits studie van de ontvangende grond (afhankelijk van het bestemmingstype) of in bouwkundig bodemgebruik mits toepassing van de betreffende code van goede praktijk.

Deze hergebruikregels hebben een invloed op de toelaatbare maximale PFAS concentraties van de ontvangen verontreinigde gronden. Hoe hoger de toegelaten PFAS concentraties in de hergebruikte gereinigde gronden, hoe hoger de toelaatbare maximale PFAS concentraties in de ontvangen gronden kunnen zijn. Dit is afhankelijk van de reinigingsefficiëntie van de fysicochemische reiniging. De reinigingsefficiëntie hangt af van PFAS concentratie en samenstelling in de ontvangen gronden, van de reinigingsefficiëntie van de gebruikte zuiveringssystemen voor het recirculerende proceswater.

Fysicochemische reiniging is een water verbruikend proces waardoor geen proceswater dient geloosd te worden. Het proceswater wordt gezuiverd, gebufferd in opslagtanks en hergebruikt. Het hemelwater dat valt op de verharde oppervlakten van het reinigingscentrum en van de zones met tijdelijke opslagplaatsen voor verontreinigde gronden wordt wel gezuiverd vooraleer het wordt geloosd. Mogelijk bevat dit hemelwater PFAS afkomstig van PFAS houdende gronden die tijdelijk worden opgeslagen. Momenteel geldt voor de lozing van PFOS de rapportagegrens als indelingscriterium.

De thermische behandelingsinstallatie Indaver kan verwerkt bijzondere afvalstromen in Vlaanderen door pyrolyse. Er zijn echter strikte randvoorwaarden van toepassing voor de grondreiniging in deze behandelingsinstallatie waardoor deze reinigingsmethode niet of nauwelijks wordt toegepast.

Een derde verwerkingsmethode is het storten van PFAS houdende gronden. Dit wordt toegepast op de slibfractie afkomstig van de fysicochemische grondreiniging of op sterk klei- en leemhoudende bodems die niet fysicochemisch of op een andere wijze gereinigd kunnen worden.

3.2 FYSICOCHEMISCHE GRONDREINIGING

In Vlaanderen wordt voorlopig slechts één reinigingstechniek als BBT beschouwd voor PFAS-verontreinigde zandige bodems, en dat is fysicochemische grondreiniging of het grondwassen. Een volledige lijst van erkende centra voor grondreiniging is beschikbaar op de website van de OVAM (<https://ovam.be/ovamlijstgrcweb>).

3.2.1 Beschrijving van de techniek

Fysicochemische reiniging van grond is een standaardtechniek voor grondreiniging in Vlaanderen. Voor meer details over het proces wordt verwezen naar de code van goede praktijk voor de opslag, behandeling en reiniging van bodemmateriële (OVAM, 2020) en de BBT studie van het Vito (Goovaerts L., et al., 2006).

Deze reinigingstechniek is een water verbruikend proces. Het proceswater wordt ofwel in buffertanks gestockeerd in afwachting van hergebruik ofwel gezuiverd voor hergebruik en desnoods geloosd. PFAS stoffen komen afhankelijk van hun specifieke stoffeïegenschappen terecht in de slibfractie (bv PFOS) of in de waterfase (bv PFOA en PFAS met korte ketenlengtes).

Er gelden diverse acceptatiecriteria voor fysicochemische reiniging die (lichtjes) kunnen verschillen tussen de verschillende reinigingscentra. We verwijzen hiervoor naar de website van de grondreinigers.

3.2.2 Behandelbaarheid in functie van samenstelling

Algemeen kan worden gesteld dat enkel gronden met een voldoende hoog zandgehalte (fractie >63 µm) in aanmerking komen voor fysicochemische reiniging. Gronden met een percentage fijne fractie (0 – 63 µm) groter dan 40% komen in principe niet in aanmerking en moeten worden gestort of thermisch gereinigd.

3.2.3 Fysicochemische reiniging van PFAS-houdende grond

Er is in België tot heden weinig ervaring opgebouwd met fysicochemische reiniging van PFAS verontreinigde gronden. Er zijn momenteel (dd augustus 2021 en bij RSK gekend) enkele saneringsprojecten waarbij PFOS houdende grond ontgraven wordt en fysicochemisch wordt gereinigd. In het kader van grondverzetswerken zijn tot heden nog weinig PFAS houdende grondstromen naar de reinigingscentra overgebracht zoals blijkt uit de bevraging bij de erkende reinigingscentra.

Niettemin is fysicochemische reiniging een goed gekende reinigingstechniek. Er wordt momenteel nog verder onderzoek gedaan om het reinigingsproces te optimaliseren. Dit onderzoek kan betrekking hebben op de reiniging van het proceswater (met actief kool of andere) of op de behandeling van de sterk PFAS beladen fijne fractie, om te voldoen aan de acceptatiecriteria van de stortplaatsen.

Naar duurzaamheid toe heeft deze techniek -specifiek toegepast voor PFAS- dezelfde milieubelasting als voor andere types grondverontreiniging. Echter, de PFAS worden niet vernietigd maar opgeconcentreerd en zo *tijdelijk* uit het milieu weggenomen (gestort). Het met PFAS beladen actief kool wordt gestort, geregenereerd of verbrand; regeneratie biedt het beste rendement qua duurzaamheid.

In onderstaande paragrafen wordt een beknopt verslag van de bevraging van enkele van de belangrijke erkende grondreinigingscentra in Vlaanderen weergegeven. Het gesprek wordt zo goed mogelijk tekstueel

weergegeven. De deelnemers aan dit gesprek en de datum ervan worden in Tabel 1.1 weergegeven. Voor ‘belangrijke’ PFAS gerelateerde aspecten wordt de bedrijfsnaam die de mededeling doet weergegeven.

3.2.3.1 GRC Kallo

GRC Kallo heeft ervaring met PFAS houdende ontgraven gronden van Antwerpen (i.e. Opel site) en uit Gent (anonieme site)². In beide gevallen betreft de PFAS verontreiniging een bijkomende verontreiniging die niet de hoofdreden voor de sanering was. De te saneren verontreiniging bestond uit minerale olie, BTEX en andere koolwaterstoffen. Op beide sites werd PFAS (hoofdzakelijk PFOS) aangetroffen t.g.v. het gebruik van blusschuim.

Op de site in Antwerpen werd 30 000 ton al dan niet PFAS (met hoofdzakelijk PFOS) houdende grond ontgraven. In de ontgraven grondhopen werden maximale concentraties tot 700 µg/kg ds PFAS aangetroffen. De te behalen reinigingsconcentratie is 70 µg/kg ds, maar de effectieve reiniging gebeurde tot verder onder deze waarde. De partijen grond konden worden gereinigd tot een gehalte van 1 à 5 µg/kg ds PFAS (som) in de zandfractie (met een uitschieter tot 27 µg/kg ds PFAS (som)). De berekende reinigingsefficiëntie op PFAS bedraagt 97%³. Deze gereinigde gronden werden terug naar de oorspronkelijke site gebracht, conform de bepalingen in het bodemsaneringsproject. Er diende geen reiniging tot waarde voor vrij hergebruik uitgevoerd te worden, wat - rekening houdend met de verwachte reinigingsefficiëntie van 90% - een hoger acceptatiecriterium voor de maximale aanvaardbare PFAS concentratie van 700 µg/kg ds toeliet. In het geval van de Opel case werd de slibkoek – gezien de uitloogbaarheid van PFAS - gestort in zoutcelcondities, d.w.z. “volledig ingepakt” in 2,5 mm HDPE liner (mededeling, GRC Kallo).

Op de site in Gent werd 9400 ton PFAS houdende grond gereinigd. De gronden werden gereinigd tot een concentratieniveau lager dan 3 µg/kg ds PFAS (som) of tot een waarde voor vrij hergebruik.

De capaciteit van het GRC Kallo is standaard 40 ton/uur, maar is opvoerbaar tot max. 60 ton/uur. GRC KALLO heeft naast de vaste installatie ook twee mobiele installaties. (mededeling, GRC Kallo).

De fysicochemische installatie werd voor de PFAS verontreiniging uitgebreid met een waterzuivering op basis van Granular Activated Carbon (GAC), buffertanks en pompen. De waterfase wordt zoveel mogelijk hergebruikt als proceswater na zuivering; indien lozing nodig is, gebeurt de (na)zuivering eveneens op GAC. GAC heeft voor PFOS (belangrijkste PFAS component) een maximale beladingsgraad van 0,5% (0,5 kg PFOS per ton GAC) (mededeling, GRC Kallo). Algemeen wordt de beladingsgraad van GAC voor PFAS op 0,1% geraamd. GRC KALLO meldt dat de maximale beladingsgraad lager kan zijn voor meer mobiele – lichtere PFAS stoffen. Afhankelijk van de aard van de PFAS verontreiniging zal de efficiëntie van de GAC reiniging dus kunnen verschillen.

GAC kan bij DESOTEC of Chemviron verwerkt worden (mededeling, GRC KALLO). De gebruikte GAC wordt bij Chemviron gereactiveerd bij een temperatuur van 925 tot 975°C in een zuurstofarme omgeving (pyrolyse). De vernietiging van PFAS verloopt in twee fasen: eerst wordt PFAS vervluchtigd of gedesorbeerd van het

² Omwille van confidentialiteit anoniem gehouden

³ Info van de inkeuringsresultaten en uitkeuringsresultaten zandfractie in de periode 14 april – 4 juni 2021 afkomstig van de OVAM

koolstofoppervlak. Een deel van de gedesorbeerde PFAS wordt vernietigd in de reactiveringsoven. De resterende PFAS wordt door een emissie reductiesysteem geleid, dat bestaat uit een thermische oxidator/naverbrander, een scrubber en een baghouse. Het emissie reductiesysteem is ontworpen om organische stoffen met een efficiëntie van ten minste 99,99% te vernietigen, om zure gassen te neutraliseren die tijdens het proces vrijkomen, en om deeltjes af te vangen (Memo van Calgon Carbon, juni 2020). Navraag bij DESOTEC geeft aan dat GAC via RENEWI wordt verwerkt, daar zij nog verder onderzoek naar regeneratie/reactivatie van PFAS houdend GAC wensen te doen. RENEWI gebruikt deze GAC met PFAS voor de aanmaak van steunbrandstof voor de cementoven. In de cementoven (bv Holcim) wordt de PFAS houdende GAC bij hoge temperatuur (tussen 1300 en 1500°C) verbrand, waarbij de rookgassen gewassen worden (mededeling, Renewi).

Als alternatief kan een verbranding in een draaitrommeloven zoals bij Indaver uitgevoerd worden (mededeling, GRC KALLO).

3.2.3.2 Suez

Suez heeft een fysicochemische reinigingsinstallatie met een capaciteit van 50 ton/uur. Deze capaciteit kan verhoogd worden indien de marktvraag zou toenemen.

Tot heden heeft Suez weinig PFAS houdende gronden voor reiniging ontvangen, met uitzondering van een partij van 100 ton met som PFAS concentraties van minder dan 100 µg/kg ds. De efficiëntie van de proefreiniging bedroeg 90 à 95 % (mededeling, SUEZ). Desnoods kan de reiniging verbeterd worden door de grondstroom tweemaal fysicochemisch te reinigen, waardoor een efficiëntie van ca. 99% kan worden gerealiseerd.

Voor de waterzuivering van de fysicochemische behandeling zijn diverse waterbehandelingstechnieken beschikbaar. Het proceswater bevat diverse toeslagstoffen (bv surfactanten) waardoor de waterbehandeling een complex proces is. De waterbehandelingstrein kan afhankelijk van de grondverontreiniging worden aangepast, zo ook voor PFAS verontreinigingen. Voor zuivering van PFAS verontreinigd water wordt in deze ontwerpfasen aan omgekeerde osmose gedacht (mededeling, SUEZ). De hierboven vermelde literatuurstudie leert ons dat dit nog een experimentele techniek is voor PFAS.

De slibfractie kan afhankelijk van de acceptatiecriteria van de stortplaats gestort worden. Het is niet uit te sluiten dat de slibfractie moet worden behandeld om te voldoen aan de acceptatiecriteria van de stortplaats. Naast het storten betekent deze behandeling eveneens een mogelijke meerkost.

De kostprijs van de fysicochemische grondreiniging wordt bepaald door de grootte van de reinigingsbatch, de waterzuivering, de fractie fijne materialen (<63 µm en organisch materiaal). Hoe groter de reinigingsbatch, hoe lager de kostprijs per ton. Immers, de reinigingsinstallatie moet éénmalig aangepast worden om het reinigingsproces gedurende een langere tijd te laten verlopen.

3.2.3.3 Bioterra

Met de installatie kunnen gronden tot een hergebruiksconcentratie van 70 µg/kg ds PFAS (som) of lager gereinigd worden, rekening houdend met een ingaande maximale concentratie van 1 mg/kg ds PFAS-(som) (mededeling Bioterra).

Bijkomende eis is dat maximaal 40% m/m ds restfractie aanwezig is (som van de fractie < 63µm bij natte zeping en organische stof o.b.v. gloeiverlies). Dit is echter een theoretische benadering want e.e.a. is tevens afhankelijk van andere factoren die de haalbaarheid van FC-reiniging mee bepalen, namelijk:

- aard/type van de PFAS;
- de verhouding fijne minerale fractie en het organische stofgehalte;
- gemiddelde PFAS concentraties in de partij tov de gewenste eindconcentratie;
- eventuele aanwezigheid en concentraties van andere contaminanten.

Grondreiniging. Te reinigen PFAS-houdende gronden worden opgeslagen in een stockagehal van 4000 m², beschermd tegen regen. Vanuit de hal wordt de partij gevoed aan de fysicochemische wasinstallatie. Op deze wijze komen de PFAS terecht in de proceswaterbuffer van de fysicochemische reinigingsinstallatie (1000 m³). De hal heeft een capaciteit van 3 loten van 4000 ton.

In ideale omstandigheden vermeldt Bioterra een verwerkingscapaciteit van 80 ton/uur en een totaal te verwerken hoeveelheid van ca. 125.000 ton per jaar. Dit is 50% van de totale jaarcapaciteit van de fysicochemische installatie van Bioterra te Genk.

De filterkoeken met hoge PFAS-gehalten worden per schip afgevoerd naar een stortplaats. De noodzaak tot verdere behandeling van deze filterkoeken om uitloging van PFAS te beperken zou gecontroleerd moeten worden.

De waterzuiveringsinstallatie (WZI) heeft een capaciteit van 14 m³/u en bestaat uit een zandvang (tot 180 m³/u) en 3 vuilwaterbuffertanks (3 x 500 m³). Daarnaast zijn er 3 gelijkaardige tanks voor opslag van gezuiverd water. De totale buffercapaciteit bedraagt 3.000 m³ excl. de proceswaterbuffer van de fysicochemische wasinstallatie (1.000m³).

De WZI is een actief slib biomembraanreactor met variabele capaciteit (4 - 14 m³/u). Deze bestaat uit een anaerobe en een aerobe reactor. Voor de PFAS is een bijkomende zuiveringstrap ingebouwd die bestaat uit een hoog-absorberende actief kool (ORGANOSORB 10 AA) en een ionuitwisselingshars (Lewatit Monoplus M500).(Mededeling, JDN)

3.2.3.4 Jan De Nul

Jan De Nul (JDN) heeft twee fysicochemische reinigingsinstallatie met een capaciteit van ca 50 ton/uur (100 000 ton/jaar). Eén ervan staat vandaag opgesteld in Toulon (FR). Twee van hun valorisatiecentra voor verontreinigde gronden en sedimenten zijn vergund voor het exploiteren van dergelijke reinigingsinstallatie. De reinigingsinstallatie is flexibel qua opbouw en kan, indien nodig, direct opgeschaald worden.

JDN is al sinds enkele jaren actief in het uitvoeren van piloottesten voor het zoeken naar de meest geschikte techniek om met PFAS verontreinigde gronden te saneren. De fysicochemische installatie werd daarbij geoptimaliseerd.

Een batch gronden met een gemiddelde concentratie van 300 µg/kg ds PFOS, afkomstig van de Opel site in Antwerpen, werd met de installatie gereinigd aan een efficiëntie van 95% (mededeling, JDN). Ondertussen werd door JDN zo'n 7.000 ton PFAS-houdende grond behandeld in hun centra, afkomstig van verschillende werven in Vlaanderen. De reiniging van het proceswater gebeurt met GAC. Waterzuivering met GAC wordt beschouwd als een robuuste reinigingstechniek. Alternatieven genieten na uitvoerig testen geen voorkeur: ion-uitwisselingsharsen omwille van de kostprijs en de chemische oxidatie van het proceswater omwille van een slecht rendement (mededeling, JDN).

De kostprijs van de fysicochemische grondreiniging wordt bepaald door het gehalte aan fijne fractie (<63 µ) en organisch materiaal (zijnde de te storten fractie), de grootte van de partij, het gehalte aan droge stof, en het uitlooggedrag van het te storten materiaal. Indien PFAS uitloopt in de stortplaats, wordt de stortfractie mogelijk niet geaccepteerd. Er wordt verder onderzoek gedaan naar adsorbentia om de uitloogbaarheid van de stortfractie te verminderen. De kostprijs van fysicochemische grondreiniging wordt project-specifiek beoordeeld rekening houdend met de verschillende hierboven vermelde parameters.

3.2.4 Besluit

De totale fysicochemische reinigingscapaciteit in Vlaanderen bedraagt bij de erkende reinigingscentra grosso modo meer dan 200 ton/uur of ca 300 000 ton/jaar. Deze capaciteit kan bij stijgende marktvraag opgeschaald worden tot meer dan 500 000 ton/jaar.

In 2021 werden minstens 47.000 ton PFAS houdende gronden in de reinigingscentra fysicochemisch gereinigd. Daarvoor hebben de reinigingscentra proefreinigingen op PFAS houdende gronden uitgevoerd waarbij een reinigingsefficiëntie van 95% tot 99% werd gerealiseerd. Uit gesprekken met deze centra blijkt dat de aanpassing van de reinigingsinstallatie maatwerk is en afhangt van de aard van de PFAS verontreiniging (samenstelling, maximale concentraties en te behalen reinigingsconcentratie). Aanpassingen zijn nodig voor de waterzuivering. GAC wordt beschouwd als een robuuste waterzuiveringsstap, maar andere waterzuiveringstechnieken zoals ionuitwisselingsharsen e.a. kunnen als onderdeel van een waterbehandelingstrein in het reinigingscentrum in aanmerking komen. Deze reinigingscentra hebben ervaring met het aanpassen van hun waterzuiveringsinstallaties aan de aard van de verontreiniging (andere dan PFAS).

Fysicochemische grondreiniging is een water verbruikend reinigingsproces. Dit betekent dat geen of in beperkte mate proceswater van de fysicochemische behandelingsinstallatie moet worden geloosd. Het proceswater wordt voor hergebruik gezuiverd. Er is momenteel geen indelingscriterium voor lozing voor PFAS (met uitzondering van PFOS waarvoor de rapportagegrens geldt).

De kostprijs van fysicochemische grondreiniging is afhankelijk van verschillende factoren. In eerste instantie wordt de kostprijs bepaald door het volume te reinigen grond en door het gehalte aan fijne delen < 63 µm en organisch materiaal. Verder heeft de behandeling van de slibfractie of het storten onder zoutcelcondities en de benodigde bijkomende waterzuiveringsstappen voor het PFAS houdend proceswater een invloed.

In overleg met de OVB - Ondernemers Vereniging Bodemsaneerders waarin ook de erkende grondreinigers zijn vertegenwoordigd – werd onderstaande kostenstructuur van de reiniging van PFAS verontreinigde gronden opgemaakt (tabel 3.1) onder volgende acceptatievoorwaarden:

- Maximale concentratie bedraagt 300 µg/kg ds PFAS (som);
- Het puingehalte is lager dan 5%;
- De reinigingsconcentratie is 3 µg/kg ds PFAS (som)

Tabel 3.1: Kostenstructuur fysicochemische grondreiniging in Vlaanderen

Beïnvloedende factor	kostprijs	Opmerking
Basisreiniging (incl. 15 % fijne delen < 63µ en organische stof (OS))	40 – 60 Euro/ton	Afhankelijk van de grootte van de grondpartij en geschatte waterzuiveringskosten obv proefreinigingen
Fractie aan fijne delen < 63µ en organische stof (OS) boven 15%	0,8 – 1,6 Euro/%/ton	Behandeling- en/of stortkosten
Grondreiniging partij met 15 % slib/OS	40 – 60	
Grondreiniging voor partij met 35% slib/OS	56 – 92	

Deze kostenstructuur houdt geen rekening met de aanwezigheid van andere verontreinigingen in het vaste deel van de aarde die eveneens fysicochemisch kunnen gereinigd worden. De afwijkende kost hangt af van de aard en concentratie van deze andere verontreinigingen. Mogelijk blijft de kost ongewijzigd.

Voor fysicochemische reiniging is het haalbaar verwijderingsrendement 95 tot 99% afhankelijk van het type grond en het type PFAS. Met dergelijke verwijderingsrendementen is het haalbaar ingaande gronden met concentraties van 300 µg/kg ds tot 3 µg/kg ds te reinigen. Het is haalbaar om sterker verontreinigde ingaande gronden afhankelijk van de samenstelling (bv concentraties van 700 µg/kg ds PFAS (som)) gewassen zanden te bekomen die voldoen aan het criterium voor bouwkundig bodemgebruik (70 µg/kg ds PFAS (som)). Daarnaast bestaat de mogelijkheid de niet te reinigen gronden te storten (na het bekomen van een niet-reinigbaarheidsverklaring).

3.3 THERMISCHE GRONDREINIGING

Er is in Vlaanderen geen capaciteit beschikbaar voor thermische grondreiniging op basis van thermisch desorptie met naverbranding van de gassen, ook niet voor PFAS houdende gronden.

In de Haven van Antwerpen bevindt zich de thermisch installatie van Indaver, waar afvalstoffen die PFAS bevatten thermisch gereinigd kunnen worden. Immers afvalstoffen met gehalte van meer dan 50 mg/kg PFAS dienen conform de POP verordening vernietigd te worden.

De afvalstoffen en gronden worden in een draaitrommeloven gedurende 30 minuten aan hoge temperatuur verbrand, gecombineerd met een nabehandeling van de rookgassen. De kostprijs bedraagt 250 tot 400

euro/ton. Deze kostprijs wordt beïnvloed door de aanwezigheid van co-polluenten in de grond zoals zwavel, asbest en zware metalen (in bijzonder kwik). Deze prijs is zeer hoog in vergelijking met de behandeling door thermische desorptie van de gronden en een naverbranding van de dampfase (zie paragraaf 4). Voor de grote volumes van PFAS houdende verontreinigde gronden is deze installatie niet geschikt omdat er wachttijden zijn voor de verbranding van afvalstoffen. Desnoods zou er een beperkte capaciteit verspreid over een heel jaar beschikbaar kunnen worden gemaakt (bron: Indaver nv).

In België wenst de groep Cordeel een nieuwe verwerkingsinstallatie, gebruikmakend van het proces van thermische desorptie onder vacuüm, op te richten. Voor de verwerking van PFOS/PFAS houdende gronden kan de installatie uitgebreid worden met een bijkomende specifieke unit. De reeds uitgevoerd test-runs op de verwerking van deze gronden zijn veelbelovend (bron: C-ground nv – groep Cordeel).

Door het verbruik van fossiele brandstoffen, de verhoogde CO₂ uitstoot door de aanwezigheid van natuurlijke organische stoffen in de bodem en de beperkte vergunde capaciteit in West-Europa maken deze verwerkingsmethode minder duurzaam ten opzichte van de fysicochemische verwerking van PFAS houdende gronden.

Bij verbranding van de gasfase van PFAS moet de temperatuur voldoende hoog zijn. Volledige PFAS mineralisatie gebeurt normalerwijze bij 1400°C (zie paragraaf 2.1.3). Recente inzichten hebben erop gewezen dat niet altijd alle PFAS verbindingen worden vernietigd en dat dus mogelijkwerwijs PFAS wordt uitgestoten bij deze verbranding.

Een wettelijk kader ontbreekt: de uitstoot van PFAS naar de lucht is noch Europees, noch op Vlaams niveau gereguleerd. Er gelden geen Europese emissiegrenswaarden en luchtkwaliteitsnormen. Momenteel zijn er wel analysemethoden beschikbaar voor een reeks PFAS, maar het ontbreekt aan een gestandaardiseerde methode voor staalname voor analyse van deze PFAS-verbindingen in lucht. Voor lucht zijn er dus ook nog geen erkenningen (bron: Eerste tussentijds rapport van de opdrachthouder K. Vrancken, september 2021). Dit wil zeggen dat er momenteel geen procedures zijn voor PFAS staalname en PFAS analyse van de luchtfase, noch bestaan er PFAS emissienormen voor deze behandelingsinstallaties.

3.4 STORTEN

Grond die niet kan gereinigd worden volgens de best beschikbare technieken (BBT), kan in aanmerking komen voor een verlaagde milieuheffing in geval van storten. De aanvraag voor de verlaagde milieuheffing dient te gebeuren bij OVAM en moet steeds vergezeld zijn van een 'Verklaring niet-reinigbaarheid'. Die verklaring moet aangevraagd worden bij de OVB. De niet-reinigbaarheid van grond kan een gevolg zijn van een te hoge slibfractie (>40% slib in een kleigrond of leemgrond) of omwille van de aanwezigheid van andere verontreinigingen waarvoor geen reinigingsmethode geschikt is (bv te hoge kwikconcentratie). De slibfractie afkomstig van de fysicochemische grondreiniging wordt eveneens gestort.

De uitloogbaarheid van PFAS zijn aandachtspunten bij het storten van PFAS houdende gronden. PFAS uit deze gronden kunnen in het percolaatwater terecht komen. Verder onderzoek naar de stabilisatie en de beperking

van de PFAS uitloging is aangewezen. Zonder behandeling wordt momenteel de PFAS houdende grond in een zoutcel van de stortplaats ondergebracht.

Het is geen onderdeel van onderhavige studie de acceptatiecriteria en capaciteit van stortplaatsen en bijhorende zoutcellen te onderzoeken.

4 GRONDREINIGING IN NEDERLAND

4.1 INLEIDING

In Nederland is een tijdelijk handelingskader voor het hergebruik van PFAS houdende gronden en baggerspecie⁴ van toepassing. Dit handelingskader vormt een toepassing van het voorzorgsprincipe en het “stand-still” principe. Grond en baggerspecie mogen niet toegepast worden indien deze niet voldoen aan de betreffende bodemfunctieklaas (kwaliteit die bodem dient te vervullen zoals toegekend volgens de bodemfunctiekaart) en aan de bodemkwaliteitsklaas (de kwaliteit van de bodem waarop de grond of baggerspecie wordt aangebracht). Dit tijdelijke handelingskader is een veel strenger kader dan het kader van het Vlaamse grondverzet.

Voor het transport van te reinigen gronden van Vlaanderen naar Nederland is een exportvergunning nodig. De procedure voor reiniging van Vlaamse grondpartijen in Nederland is relatief complex en langdurig.

4.2 FYSICOCHEMISCHE GRONDREINIGING

4.2.1 Beschrijving van de techniek

De reinigingstechniek in Nederland is analoog aan de reinigingstechniek in Vlaanderen. We verwijzen voor de beschrijving naar de referenties die in paragraaf 3.2 zijn opgenomen.

Niet tegenstaande de fysicochemische grondreiniging een water verbruikende activiteit is, zou onder bepaalde condities het gezuiverde proceswater toch moeten worden geloosd in oppervlaktewater. De vergunning verlenende instanties – nl de Waterschappen – stellen afhankelijk van provincie hoge eisen aan de kwaliteit van het geloosde water (nullozing voor PFAS). De reinigingscentra zijn meestal zeer terughoudend om aan de lozingseisen te voldoen (mededeling, NVPg). Hierdoor hebben vele reinigingsinstallaties geen vergunning voor het lozen van het gezuiverde proceswater aangevraagd. Samen met de strenge eisen voor grondreiniging (zie verder) en het soms ontbreken van een lozingsvergunning van PFAS gezuiverd proceswater zijn de acceptatiecriteria van PFAS houdende gronden in Nederland streng.

4.2.2 Fysicochemische reiniging van PFAS-houdende grond

Er is in Nederland ervaring opgebouwd met fysicochemische reiniging van PFAS verontreinigde gronden. Vooraleer de reinigingscentra een vergunning bekomen moeten zij uitgebreid proef-reinigen met substantiële grote grondstromen zodat de verschillende samenstellingen (concentraties, fracties aan fijne delen etc.) bekend zijn. Deze proefreinigingen worden opgevolgd en gecontroleerd door het bevoegd gezag. Een 6-tal reinigingscentra zijn bezig met de fysicochemische reiniging van PFAS houdende gronden.

Naast de Nederlandse Vereniging van Procesmatige Grondreiniging (NVPg) werden een 3-tal (van 6) fysicochemische grondreinigingscentra gecontacteerd. Het verslag van het contact/overleg wordt hieronder opgenomen. Voor de rest wordt verder niet ingegaan op de verschillende bedrijven in Nederland die zich bezig

⁴ Geactualiseerde versie van 2 juli 2020

houden met fysicochemische grondreiniging, omdat de reinigingscapaciteit in Vlaanderen met deze techniek, voldoende ruim is.

4.2.2.1 Nederlandse Vereniging van Procesmatige Grondreiniging (NVPG)

Er zouden 3 locaties in Nederland verontreinigd met PFAS concentraties hoger van 1000 µg/kg ds (mededeling, NVPG). Dit is de luchthaven Schiphol, Site Chemours te Dordrecht en een site te Helmond. Naar schatting zou ca. 1000 ton grond sterk met PFAS verontreinigd zijn. Deze gronden worden ontgraven en opgeslagen in afwachting van verdere behandeling.

De overige verontreinigde en te saneren locaties bevatten concentraties tussen 3 en 1000 µg/kg ds PFAS. Er wordt recent melding van gemaakt aan de hand van een signaalkaart met 400 PFAS verontreinigde locaties. De zandige gronden kunnen fysicochemisch behandeld worden, waarvan de slibfractie (< 40%) wordt gestort. De vergunde capaciteit voor de fysicochemische behandeling in Nederland wordt door NVPG geschat op 100 000 ton/jaar. Het overgrote deel van de aangeboden gronden bevatten PFAS concentraties lager dan 60 µg/kg ds. Dit betekent dat het overgrote deel van de zandige gronden met reinigingsefficiëntie van minimaal 95 % kunnen worden gereinigd tot concentraties onder 3 µg/kg ds.

Proefreinigingen in de verschillende reinigingscentra hebben aangetoond dat PFAS concentraties in het hergebruikte proceswater in het reinigingsproces kunnen oplopen tot 500-800 µg/l. De PFAS bindt zich in de slibkoek. De concentraties in de slibkoek dalen na de ontwatering ervan.

Lemige en kleiïge PFAS houdende gronden met meer dan 40 % slib of gronden met meer organisch materiaal of gronden met concentraties hoger dan 60 µg/kg ds PFAS/PFOS of meer dan 140 µg/kg ds PFOA komen in aanmerking voor een niet-reinigbaarheidsverklaring en kunnen dan worden gestort. Mogelijk kunnen deze gronden en andere gronden met sterk verhoogde PFAS concentraties in de nabije toekomst thermisch behandeld worden. Momenteel is er echter in Nederland nog geen vergunde installatie voor thermische reiniging operationeel (zie paragraaf 4.3).

De kostprijs van de fysicochemische reiniging wordt bepaald door de grootte van de partij, de slibfractie en ingangskoncentraties voor reiniging (in principe max. 60 µg/kg ds PFAS of 140 µg/kg ds PFOA).

4.2.2.2 Jansen Recycling

De installatie van Jansen Recycling BV (Helmond) heeft bij voorbeeld een vergunde capaciteit om PFAS houdende grondstromen te reinigen van 60 ton per uur. Een proefreiniging werd uitgevoerd op een partij van 20 000 ton.

De acceptatievoorwaarden van de PFAS houdende gronden zijn: max. 100 µg/kg ds PFAS met een residu afslibbaar deel < 63 µm en organisch stof van maximaal 35%.

Er wordt een aanvullende grondwaterzuivering op PFAS voor deze proefgrondreiniging voorzien.

4.2.2.3 Afvalzorg – Ballast Nedam – BAM Infra

De installatie van afvalzorg heeft in maart 2020 een proefreiniging uitgevoerd op 6 000 ton. Sinds maart 2021 is het centrum vergund voor de reiniging van PFAS houdende gronden. Ondertussen werd 50 000 ton gereinigd.

Veenhoudende en kleihoudende grondstromen (>40 %) worden niet aanvaard. De acceptatiecriteria voor PFAS houdende zandgronden bedragen 60 µg/kg ds PFOS, 140 µg/kg ds PFOA en 60 µg/kg ds andere PFAS. De gronden worden gereinigd tot concentraties lager dan respectievelijk 3 µg/kg ds PFOS, 7 µg/kg ds PFOA en 3 µg/kg ds andere PFAS. De reinigingsefficiëntie bedraagt bijgevolg 95%.

Het waterreinigingsproces is een gesloten systeem zonder lozing van het gezuiverd effluentwater. Een hogere efficiëntie zou bekomen kunnen worden indien een waterzuivering van het proceswater wordt toegepast (persoonlijke mededeling, Martin Van Bostelen, Afvalzorg).

Alle PFAS komt in de slibfase terecht of zit in het water van de gereinigde zandfractie. De slibfractie wordt ontwaterd met behulp van een kamfilterpers tot 60% droge stofgehalte, waarna het wordt gestort.

4.2.2.4 Theo Pouw

Theo Pouw heeft een reinigingsinstallatie voor een capaciteit van 100 000 ton/jaar. Deze installatie kan uitgebreid worden indien de marktvraag naar fysicochemische grondreiniging toeneemt. Momenteel heeft deze grondreiniger geen vergunning voor deze reinigingsmethode van PFAS-houdende gronden. Er zijn echter wel diverse proeven en testen in uitvoering voor de optimalisatie van het reinigingsproces.

Het voorziene reinigingsproces van PFAS-houdende gronden bestaat uit 3 geïntegreerde fasen, waarbij de derde fase het klassieke fysicochemische reinigingsproces is. De eerste twee fasen bestaan uit de spoeling van de gronden met water. De preliminaire testen tonen aan dat dit water met behulp van ionen uitwisselingsharsen kan worden behandeld. Het voordeel van dit reinigingsproces is dat de PFAS stoffen door het spoelingsproces in de waterfase terecht komen. Immers deze stoffen zijn goed wateroplosbaar. Het wateroplosbare PFAS kan met de ionen uitwisselingsharsen uit het spoelingswater gehaald worden. Als 'polishing step' kan er een nabehandeling met actief kool gebeuren. Doordat de waterreiniging vóór de derde reinigingsfase gebeurt, zijn geen toeslagstoffen in het spoelingswater aanwezig. Deze toeslagstoffen bemoeilijken het reinigingsproces met ionen-uitwisselingsharsen en leiden tot een hoger actief koolverbruik en gerelateerde kosten. Door de voorafgaande spoelingen kan de bulk van de PFAS verontreiniging uit de grond verwijderd worden. Bij de regeneratie van de harsen kunnen de PFAS stoffen verwijderd waarna ze thermisch vernietigd worden. In de derde fase – de fysicochemische reiniging – zal de resterende PFAS verontreiniging uit de grond verwijderd worden. De resterende vuilvracht aan PFAS komt in het slib terecht.

Dit slib is minder belast aan PFAS dan bij reinigingsproces zonder voorafgaande spoeling. Na ontwatering kan het slib op een stortplaats worden verwerkt.

Deze reinigingsmethode met 3 fasen biedt het voordeel dat gronden met hogere PFAS concentraties dan 60 à 70 µg/kg ds voor fysicochemische reiniging aanvaard kunnen worden. De PFAS verwijdering door spoeling is efficiënter bij hogere concentraties. Door de toepassing van de derde stap met fysicochemische reiniging met een reinigingsrendement van 95% of meer kan de reiniging van concentratieniveaus van 60 à 70 µg/kg ds tot minder dan 3 µg/kg ds PFAS (of 7 µg/kg ds PFOA) terug gebracht worden. De vergunning voor dit reinigingsproces van PFAS houdende gronden zal op termijn worden aangevraagd.

4.2.3 Besluit

De vergunde capaciteit voor de fysicochemische behandeling in Nederland wordt door NVPG geschat op 100 000 ton/jaar. Het overgrote deel van de aangeboden gronden bevatten PFAS concentraties lager dan 60 µg/kg ds (mededeling, NVPG). Dit betekent dat het overgrote deel van de zandige gronden met reinigingsefficiëntie van 95 tot 99% kunnen worden gereinigd tot concentraties onder 3 µg/kg ds.

Er zijn momenteel nog diverse reinigingscentra met een aanvraag voor een vergunning voor de reiniging van PFAS houdende gronden bezig. Hiervoor worden proefreinigingen uitgevoerd die door de overheid worden opgevolgd. Verwachting is dat de vergunde capaciteit voor de fysicochemische behandeling van PFAS houdende grondstromen verder zal uitbreiden.

PFAS houdende zandgronden kunnen fysicochemisch gereinigd worden met een efficiëntie van meer dan 95%. Bij dit reinigingsproces komt PFAS hoofdzakelijk in de slibfractie terecht. De PFAS verontreiniging wordt niet vernietigd en komt via de slibfractie op de stortplaats terecht. PFAS kan na uitloging uit het slib, indien niet voorbehandeld, terug in het percolaatwater van de stortplaats terecht komen. Het verdwijnt niet uit het milieu, tenzij PFAS wordt vernietigd. Een voorafgaande spoeling van PFAS verontreinigde gronden en de PFAS reiniging van dit spoelingswater zou een oplossing kunnen bieden.

Op basis van een recente kostenvergelijking van een RSK begeleid project in Nederland kunnen we voor de fysicochemische reiniging van PFAS houdende gronden volgende kosten ramen met volgende acceptatievoorwaarden:

- Maximale PFAS (som) concentratie bedraagt 100 µg/kg ds;
- Het puingehalte is lager dan 5%;
- De reinigingsconcentratie is 3 µg/kg ds PFAS (som)

Tabel 4.1: Kostenstructuur fysicochemische grondreiniging in Nederland

Beïnvloedende factor	kostprijs	Opmerking
----------------------	-----------	-----------

Basisreiniging (incl. 30 % fijne delen < 63µm/organische stof (OS)	50-60 Euro/ton	Afhankelijk van de grootte van de grondpartij en eventuele waterzuiveringskosten
fractie aan slib/OS (min of meerkost)	1-1,5 Euro%/ton	Behandeling- en/of stortkosten
Grondreiniging voor partij met 30 % fijne delen < 63µm/organische stof	50-60 Euro/ton	

Deze kostenstructuur houdt geen rekening met de aanwezigheid van andere verontreinigingen in het vaste deel van de aarde die eveneens fysicochemisch kunnen gereinigd worden. De afwijkende kost hangt af van de aard en concentratie van deze andere verontreinigingen. Mogelijk blijft de kost ongewijzigd.

4.3 THERMISCHE GRONDREINIGING

In Nederland zijn er twee bedrijven die een thermische reinigingsinstallatie voor verontreinigde gronden hebben: nl. ATM te Moerdijk en Theo Pouw te Utrecht. Geen enkele installatie is tot dusver vergund voor de reiniging van PFAS houdende gronden. In het verleden zijn er problemen geweest met de afzet van de thermische gereinigde gronden. Momenteel worden slechts beperkte hoeveelheden thermisch te reinigen gronden aanvaard door de Nederlandse autoriteit.

4.3.1 ATM

Algemene beschrijving van het reinigingsproces

Bij ATM verloopt het reinigingsproces als volgt (Rob Van Zundert, persoonlijke mededeling). Verontreinigde grond wordt geladen in een bunker met voorzeving op 50 cm (verwijdering grove delen). Via een transportband bereikt de grond een tweede zeef (10 cm). De puinfractie die hierdoor wordt weerhouden wordt ter plaatse gebroken en terug bij de verontreinigde grond gevoegd. Dit geheel gaat naar de thermische installatie: een langzaam draaiende **trommel** van 60 m lengte en 5,5 m diameter, met inwendige schoepen en een hellingsgraad van 2 cm. De trommel wordt verhit met oliebranders (olie afkomstig van op het bedrijf zelf opgewerkte afvalolie; er worden geen primaire brandstoffen gebruikt). De temperatuur in de trommel bedraagt 470-550 °C. De verblijftijd is ongeveer 1 uur. In de trommel gaat de verontreiniging over in de dampfase (thermische desorptie).

De dampen gaan vervolgens naar de **incinerator**, waar het bij een temperatuur rond 1000 °C wordt verbrand. De incinerator wordt gestookt met pyrolysegas dat op het bedrijf zelf wordt geproduceerd uit de verwerking van verfafval. De verbrandingsgassen worden vervolgens gekoeld in een warmtewisselaar, en de as afgevangen m.b.v. een elektrostatisch partikelfilter. Deze vlieggas wordt verwerkt in de cementindustrie. De rookgassen worden vervolgens nog door een gaswasser geleid alvorens te worden geloosd in de atmosfeer.

De gereinigde grondfractie wordt gezeefd op 2 mm, waarbij een grondfractie ontstaat (<2 mm) en een granulaatfractie (>2 mm).

Restwarmte van de installatie wordt gebruikt voor de productie van stoom, die op de site zelf wordt gebruikt voor scheepsreinigingsactiviteiten.

De **capaciteit** van de thermische installatie bedraagt 75-80 ton per uur (ca. 2 000 ton per dag). De kosten voor de reiniging vallen gemiddeld in de vork 60-70 €/ton. Bij grote partijen (> 10 000 ton) is de kostprijs lager.

Naast PFAS verontreinigde grond kan ook PFAS beladen actief kool op deze wijze worden behandeld.

Toepassing op PFAS-houdende grond

Bij ATM worden de mogelijkheden en randvoorwaarden voor thermische reiniging van met PFAS-verontreinigde grond momenteel nog volop onderzocht. Nog dit jaar worden 2 proefpartijen behandeld met gehalten van 200-300 µg/kg ds (som PFAS) enerzijds en 150 µg/kg ds PFOS anderzijds. Deze proefbehandelingen worden nauwgezet opgevolgd naar behaald reinigingsrendement en **emissies**. De resultaten worden in een rapport beschreven dat zal worden gepresenteerd aan de Omgevingsdienst. Indien de resultaten gunstig zijn verwacht ATM tegen eind maart 2022 zijn vergunning te kunnen uitbreiden voor de behandeling van met PFAS verontreinigde grond.

Thermische grondreiniging van PFAS-houdende grond of slib kan met de bestaande installatie – er zijn geen speciale aanpassingen vereist. Er is ook geen beperking wat betreft grondsamenstelling: ook PFAS-houdende leem- of kleibodems kunnen worden gereinigd. De maximaal behandelbare PFAS concentraties dienen nog bepaald te worden, maar bij optimale procescondities - voldoende lange verblijftijd in de desorptietrommel en voldoende hoge temperatuur in de incinerator – wordt verwacht dat ook gronden met zeer hoge PFAS concentraties, grotendeels (maar niet volledig) reinigbaar zullen zijn. Op basis van preliminaire testen wordt bij een temperatuur tot 550°C een desorptierendement van 99.9% voor PFAS-houdende gronden bekomen. Onder deze voorwaarden is het acceptatiecriterium voor PFAS houdende gronden ca. 3000 µg/kg ds PFAS zodat een eindconcentratie van 3 µg/kg ds PFAS kan worden bekomen in de gereinigde partij. In de incinerator worden de PFAS-houdende gasen verbrand bij een temperatuur bij 950-1100°C bij een verblijftijd van 2 sec.

Voor- en nadelen aan thermische reiniging en Duurzaamheid. Bij ATM worden geen primaire brandstoffen gebruikt en restwarmte wordt zoveel als mogelijk nuttig aangewend. De CO₂-uitstoot van thermische reiniging is echter aanzienlijk omdat, naast de gebruikte brandstoffen en de verontreiniging zelf, ook de natuurlijke organische stof in de bodem grotendeels wordt omgezet naar CO₂. Voor PFAS-houdende grond is echter het grote voordeel van thermische reiniging (t.o.v. andere technieken) dat de PFAS werkelijk worden vernietigd en dus definitief worden verwijderd uit het milieu. Grote partijen (tot 50 000 ton) kunnen in één keer per schip worden aangeleverd.

Gezien de temperatuur van de incinerator maar op 950-1100 °C ligt, en temperaturen van 1400°C nodig zijn om alle C-F verbindingen te breken, is het belangrijk om de kanttekening toe te voegen dat dergelijke temperaturen niet worden gehaald en dat het dus in de lijn der verwachting ligt dat geen volledige vernietiging plaatsvindt van PFAS. In de VS en Scandinavië mag thermische reiniging niet meer worden toegepast omdat de PFAS niet volledig vernietigd werd en verhoogde concentraties PFAS werden aangetroffen rond de verbrandingsoven, als gevolg van onvolledige verbranding.

Gronden met te hoge asbestgehalten of te hoge concentraties aan zwavel en kwik (e.a. zware metalen) kunnen via deze thermische reinigingsmethode niet behandeld worden. De volledige voorwaarden worden omschreven in de acceptatiecriteria van ATM zoals in volgende tabel opgenomen:

Tabel 4.2: Acceptatiecriteria voor thermische grondbehandeling bij ATM (andere dan PFAS)

Zware metalen	acceptatiecriterium
Arseen (mg/kg ds)	76
Barium (mg/kg ds)	920
Cadmium (mg/kg ds)	4,3
Chroom (mg/kg ds)	180
Cobalt (mg/kg ds)	190
Koper (mg/kg ds)	190
Kwik (mg/kg ds)	4,8
Molybdeen (mg/kg ds)	190
Nikkel (mg/kg ds)	100
Lood (mg/kg ds)	530
Zink (mg/kg ds)	720
Antimoon (mg/kg ds)	22
Vanadium (mg/kg ds)	250
Organische stoffen	
Minerale olie (mg/kg ds)	15.000 (in overleg hoger acceptabel)
Som PAK (mg/kg ds)	15.000 (in overleg hoger acceptabel)
Aromaten (mg/kg ds)	15.000 (in overleg hoger acceptabel)
PCB (som 7 congenere) (mg/kg ds)	< 1.500.
Organisch Zwavel (mg/kg ds)	1.000 (in overleg hoger acceptabel)
Organisch Tin (mg/kg ds)	180 (in overleg hoger acceptabel)
Organisch Stikstof (mg/kg ds)	< 5.000
Cyanide (mg/kg ds)	<10.000
EOX (mg/kg ds)	2.000 (in overleg hoger acceptabel)
HCH (mg/kg ds)	3.280 (in overleg hoger acceptabel)
Dioxine (ug/kg ds)	< 30 (in overleg hoger acceptabel)
Anorganische stoffen	

Sulfaat (SO ₄ , mg/kg ds)	2.430
Fluoride (F, mg/kg ds)	55
Chloride (Cl, mg/kg ds)	616
Bromide (Br, mg/kg ds)	20
Asbest (mg/kg ds)	100

4.3.2 Theo Pouw

Deze grondreiniger heeft testen uitgevoerd voor de thermische reiniging van PFAS houdende gronden. Gronden met concentraties van 250 tot 500 µg/kg ds PFAS en met een vochtgehalte van 8-15% werden bij een temperatuur van 550°C behandeld. Na deze behandeling voor thermische desorptie werd (quasi) geen PFAS in de gronden aangetroffen. De PFAS-houdende gassen werden in de incinerator bij een temperatuur van 1100 °C verbrand.

Theo Pouw wenst haar thermische reinigingsinstallatie niet te gebruiken voor de reiniging van PFAS houdende stoffen. Er zijn momenteel geen plannen om een vergunning voor de thermische reiniging van PFAS-houdende gronden aan te vragen. Eén van de redenen is een verwachte kostprijs van meer dan 100 euro/ton.

4.4 STORTEN

Niet reinigbare verklaarde PFAS houdende gronden worden gestort. In Nederland heeft Rijkswaterstaat Bodem+ de beoordelingscriteria voor partijen met PFAS verontreinigde grond bij een aanvraag voor verklaring van niet-reinigbaarheid verruimd. Hierdoor werd het afzetprobleem van PFAS-houdende grond gedeeltelijk opgelost. PFAS-houdende zandgrond met gehalten boven respectievelijk 60 µg/kg ds voor PFOS, 140 µg/kg ds voor PFOA en 60 µg/kg ds voor andere PFAS-verbindingen mag worden gestort met een verklaring van niet-reinigbaarheid omdat deze gronden voorlopig als niet reinigbaar worden beschouwd (Bodem+, 2020a). Dit bleek uit proefreinigingen in 2020 door grondreinigers in Nederland uitgevoerd. Er werd een reinigingsrendement van 95% behaald. De grenswaarden zijn gebaseerd op de toepassingsnormen uit het tijdelijk handelingskader PFAS.

PFAS-houdende klei- en veengrond met meer dan 40% fijne delen (minerale delen < 63 µm plus organische stof) worden als niet-reinigbaar beschouwd bij overschrijding van de normen voor PFAS (het inmiddels definitief handelingskader (3-7 µg/kg). Dergelijke partijen worden via geen enkele economisch of technische haalbare technologie reinigbaar geacht.

Hierbij kan als kanttekening worden opgemerkt dat de mogelijkheid van thermische reiniging in een vaste installatie, momenteel nog wordt onderzocht (zie par. 4.4).

Dit volgende categorieën verontreinigde grond komen in aanmerking voor een verklaring (Bodemplus, 2021b):

- Partijen grond die door andere aanwezige verontreinigingen dan PFAS als niet-reinigbaar/ koud-immobiliseerbaar zijn (ongeacht de PFAS concentratie);
- Partijen met meer dan 40gew% minerale delen kleiner dan 63 µm plus organische stof, (partijen klei of veen) die zijn verontreinigd boven de toepassingsnormen voor PFAS;
- Partijen met minder dan 40gew% minerale delen kleiner dan 63 µm plus organische stof, MAAR verontreinigd met PFAS boven 60 µg/kg ds (PFOS-som), 140 µg/kg ds (PFOA-som) of 60 µg/kg ds (overige PFAS-individueel);
- Partijen met minder dan 40gew% minerale delen kleiner dan 63 µm plus organische stof én verontreinigd met PFAS in gehalten lager dan 60 µg/kg ds (PFOS-som), 140 µg/kg ds (PFOA-som) en 60 µg/kg ds (overige PFAS-individueel) worden potentieel reinigbaar geacht binnen 5 jaar. Dit vereist een aanpassing in de omgevingsvergunning van de grondreinigingsbedrijven. Tot de PFAS-houdende grond gereinigd kan en mag worden, moet deze grond (met vergunning) tijdelijk worden opgeslagen. E.e.a. is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 4.3: Randvoorwaarden niet-reinigbaarheidsverklaring in Nederland (Bodemplus, 2021b)

MOGELIJKHEDEN OM WEL OF NIET IN AANMERKING TE KOMEN VOOR EEN VERKLARING VAN NIET-REINIGBAARHEID

Grondsoort	Overige verontreinigingen	PFAS-gehalten (PFOS, PFOA, overige PFAS in ug/kg)	Mogelijkheden hergebruik, reinigen en storten	Wel/geen verklaring van niet-reinigbaarheid
Alle grondsoorten	≤ MW Industrie	≤3, ≤7, en ≤3	herbruikbaar	Geen
Alle grondsoorten	> MW Industrie, maar hergebruik mogelijk na reiniging of immobilisatie	≤3, ≤7, en ≤3	Reinigen of immobilisatie	Geen
Alle grondsoorten	> MW Industrie en geen hergebruik via reiniging of immobilisatie	≤3, ≤7, en ≤3	Storten (met verklaring van niet-reinigbaarheid)	Wel
Minerale delen < 63 um plus organische stof > 40% (klei of veen)	≤ of > MW Industrie	> 3, > 7 of >3	Storten (met verklaring van niet-reinigbaarheid)	Wel
Minerale delen < 63 um plus organische stof < 40% (zand)	≤ MW Industrie of > MW Industrie, maar hergebruik mogelijk na reiniging of immobilisatie	> 3, > 7 of >3 en ≤ 60, ≤140 en ≤60	Reinigen (via techniek extractieve reiniging)	Geen
Minerale delen < 63 um plus organische stof < 40% (zand)	≤ of > MW Industrie	> 60, > 140 of >60	Storten (met verklaring van niet-reinigbaarheid)	Wel

Er wordt melding gemaakt van de mogelijkheid van uitloging van PFAS in deze stortplaatsen zolang deze stortplaatsen niet volledig zijn afgedicht (mededeling, Theo Pouw). Hierdoor kan PFAS in het percolaatwater of in het grondwater terecht komen. Door het storten blijft PFAS in het milieu aanwezig. Het storten van PFAS houdende gronden of slibfracties wordt niet als een duurzame behandelingsmethode aanzien, daar PFAS in het milieu blijft.

5 GRONDREINIGING IN DUITSLAND

5.1 FYSICOCHEMISCHE GRONDREINIGING

De fysicochemische grondreiniging werd niet verder onderzocht omdat in Vlaanderen en Nederland voldoende reinigingscapaciteit beschikbaar is.

5.2 THERMISCHE GRONDREINIGING

In overleg met RSK Alenco (Duitsland) zijn we tot de constatacie gekomen dat PFAS houdende gronden die niet met een fysicochemische behandeling kunnen gereinigd worden, eveneens worden gestort. Er zijn echter wel grondreinigingscentra met een installatie voor thermische desorptie (ARE Deutzen GmbH – zie ook **Tabel 1.1**, REWA kammerfilterpressen GmbH). Reinigingskosten zijn van de orde grootte van 150 euro/ton, maar deze kost en de acceptatie door de vergunde reinigingscentra worden beïnvloed door diverse andere factoren (o.a. vochtgehalte, totaal organisch stofgehalte, kwikgehalte, max. PFAS gehalte van 50 mg/kg ds...) (mededeling, ARE Deutzen GmbH). Voor de volledigheid van de parameters verwijzen we ook naar de acceptatiecriteria van ATM.

Daarnaast zijn diverse andere behandelingscentra voor de verbranding van afvalstoffen en gronden. We vermelden deze centra niet, daar de verwerkingskosten variëren tussen 250 tot 400 euro/ton.

6 SAMENVATTING EN BESLUIT

Onderhavige studie betreft een studie naar de op dit moment (internationaal) beschikbare reinigingsmogelijkheden en -technieken voor gronden (inclusief waterbehandeling) verontreinigd met PFAS (per- en poly-gefluoreerde alkylstoffen). De studie omvat een beknopte literatuurstudie van de grond- en waterbehandelingstechnieken, en interviews met grondbeheersorganisaties en grondreinigers in Vlaanderen en Nederland. Tevens werden thermische grondreinigers in Duitsland gecontacteerd.

Literatuurstudie

De literatuurstudie heeft aangegeven dat sinds 2020 het onderzoek naar de behandeling van PFAS stoffen in het vaste deel van de aarde en in de waterfase sterk is toegenomen.

Voor de behandeling van het vaste deel van de aarde komen fysicochemische en thermische grondreinigingstechnieken in aanmerking. Momenteel wordt alleen fysicochemische reiniging vergund en op commerciële basis uitgevoerd. In Nederland zijn vergunningsaanvragen (zowel voor fysicochemische als thermische grondreiniging) in voorbereiding aan de hand van proefreinigingen.

Het ITRC vermeldt dat sorptie en stabilisatie van PFAS in de grondmatrix mogelijk is met behulp van toeslagstoffen (zoals actief kool of een mengsel van aluminium hydroxide en kaoliniet). Dit wordt als haalbare en bewezen techniek aanzien om de uitloging van PFAS stoffen naar het grondwater te beperken, maar wordt in Vlaanderen of Nederland (nog) niet toegepast. In zowel Vlaanderen als Nederland is er een uitgebreide grondreinigingscapaciteit aanwezig, en beide regio's kennen een zeer grote landdruk. Stabilisatie/immobilisatie van PFAS houdende gronden ter voorkoming van uitloging naar het grondwater moet met de nodige omzichtigheid beoordeeld worden. Het betreft geen reinigingstechniek daar de PFAS verontreiniging ter plaatse blijft.

Verder maken verschillende studies melding van fyto-remediatie gezien PFAS in bepaalde delen van planten (bladeren, naalden) bio-accumuleren. Verwijdering van deze plantendelen zou op termijn de PFAS verontreiniging uit een belaste bodem (bv landbouwgronden met lage ontwerp bodemsaneringsnormen in Vlaanderen) op extensieve manier kunnen verminderen. Verwerking van bepaalde delen van planten door middel van thermische behandeling zou een alternatieve verwerkingsmethode kunnen zijn. De financiële en technische haalbaarheid van fyto-remediatie moet verder nog bewezen worden vooraleer het op grote schaal toe te passen.

Voor de behandeling van PFAS in de waterfase worden sorptie op actief kool of ion-uitwisselingsharsen op grote schaal in diverse omgevingen toegepast. Ook in grondreinigingscentra in Vlaanderen en Nederland zijn deze zuiveringstechnieken gekend. Verder werd nog melding gemaakt van een hele reeks andere mogelijke zuiveringstechnieken (omgekeerde osmose, zeolieten, geactiveerde biochar,...) die onder specifieke randvoorwaarden hun toepassing zouden kunnen vinden. Het onderzoek naar de reiniging van PFAS belast water is in volle ontwikkeling.

Grondreiniging in Vlaanderen

In Vlaanderen is voldoende fysicochemische reinigingscapaciteit (ca 300 000 ton/jaar) aanwezig. Deze capaciteit is vlot uitbreidbaar afhankelijk van de marktvraag. In de reinigingscentra kunnen gronden met concentraties tot

500 µg/kg ds PFAS (som) worden aanvaard omwille van een reinigingsefficiëntie van 95 % tot 99 %. Indien hogere PFAS concentraties in de gereinigde gronden worden toegelaten dan de waarden voor vrij hergebruik voor PFAS, kunnen ook gronden met hogere ingangconcentraties worden behandeld.

In 2021 werd in één grondreinigingscentrum meer dan 47 000 ton PFAS belaste grond fysicochemisch gereinigd. De PFAS concentraties van deze aanvaarde grondpartijen zijn afhankelijk van de te behalen reinigingsconcentratie. Andere grondreinigingscentra hebben tot heden, wegens een beperkte toestroom van PFAS gronden, hoofdzakelijk ervaring opgedaan in het kader van proefreinigingen. Op basis van de resultaten van deze proefreinigingen werden commerciële aanbiedingen door de erkende reinigingscentra uitgestuurd. Specifiek voor de PFAS houdende gronden dienden oplossingen aangeboden te worden voor de behandeling van het proceswater. De waterzuiveringsinstallatie wordt voor de behandeling van PFAS uitgebreid met een extra waterzuiveringstap, zoals actief kool, of ion-uitwisselingsharsen. Fysicochemische grondreiniging is een water verbruikend proces waardoor niet of nauwelijks dient te worden geloosd. Voor de lozing van PFOS houdende water geldt het indelingscriterium die overeenkomt met de rapportagegrens van PFOS. Voor andere PFAS stoffen in het lozingswater zijn geen indelingscriteria beschikbaar. Dit betekent dat er voor de andere PFAS stoffen bij lozing eveneens moet voldaan worden aan de rapportagegrens.

Alle gronden met een fractie van minder dan 40 % slib (bestaande uit fijne delen <63 µm en organisch materiaal) kunnen of worden fysicochemisch behandeld. De slibfractie dient al dan niet na behandeling te worden gestort. De behandeling van het slib voor de beperking van de uitloogbaarheid van PFAS blijft een aandachtspunt ten einde te voldoen aan de acceptatiecriteria van de stortplaatsen.

Indien de gronden meer dan 40% slib bevatten, kan bij OVB een niet-reinigbaarheidsverklaring aangevraagd worden zodat gronden met een verminderde milieuheffing kunnen worden gestort. In Vlaanderen zijn op dit ogenblik geen alternatieve reinigingstechnieken zoals thermische grondreiniging beschikbaar.

De kosten voor fysicochemische grondreiniging in Vlaanderen liggen tussen 40 en 60 euro/ton, afhankelijk van de grootte van de partij, de inkeuringsconcentraties aan PFAS en de noodzakelijke waterbehandeling (o.b.v. proefreinigingen). Boven deze basisprijs voor een gehalte van 15 % slib (= fijne delen < 63 µm en organisch materiaal) kan nog een toeslag van 0,8 à 1,6 euro/extra %slib/ton verrekend worden, afhankelijk van de noodzaak van behandeling van de slibfractie ter beperking van de uitloging of voor het storten van slibfractie in zoutcelcondities.

Door de behandeling van PFAS houdende gronden met fysicochemische reiniging en via storten worden de PFAS stoffen in het milieu behouden. De PFAS stoffen worden geïsoleerd en de eventuele verspreiding naar het grondwater of oppervlaktewater wordt aldus beheerst.

Grondreiniging in Nederland

Voor Nederland wordt de vergunde fysicochemische reinigingscapaciteit geraamd op 100 000 ton/jaar. Diverse reinigingscentra zijn nog bezig met de aanvraag van een vergunning van PFAS houdende gronden. Hiervoor worden nog proeven en testen uitgevoerd om het fysicochemische reinigingsproces te optimaliseren of worden proefreinigingen onder controle van het bevoegd gezag uitgevoerd. Het resultaat van deze ontwikkelingen is dat de fysicochemische reinigingscapaciteit in de toekomst verder zal worden uitgebreid. Tevens zouden mogelijk de acceptatiecriteria en reinigingsefficiënties kunnen worden verhoogd.

Zandige gronden met concentraties tot 60 à 100 µg/kg ds PFAS worden voor fysicochemische reiniging aanvaard. Gronden met hogere PFAS concentraties dan het acceptatiecriterium kunnen, in afwachting van een beschikbare behandelingsmogelijkheid binnen de 5 jaar, worden gestockeerd of eventueel worden gestort indien zij kunnen worden beschouwd als niet reinigbaar. Momenteel kunnen gronden als niet reinigbaar worden beschouwd indien concentraties hoger zijn dan 60 µg/kg ds PFOS en andere PFAS of 140 µg/kg ds PFOA. Bij een reinigingsrendement van 95% kunnen deze gronden tot de waarde voor vrij hergebruik worden gereinigd. Gronden kunnen eveneens worden gestort bij slibconcentraties van meer dan 40%.

Momenteel is ATM te Moerdijk bezig met de aanvraag van een vergunning voor de thermische reiniging van PFAS houdende gronden (obv thermische desorptie met naverbranding). ATM streeft ernaar deze vergunning in maart 2022 te bekomen. Theo Pouw, een grondreiniger met eveneens een thermische grondreinigingsinstallatie te Utrecht, heeft momenteel geen plannen om een dergelijke vergunning aan te vragen.

Algemeen kan men stellen dat door de behandeling van PFAS houdende gronden met thermische desorptie en nabehandeling van de gasfase PFAS stoffen (grotendeels) worden vernietigd. Bij de gehanteerde verbrandingstemperatuur (meestal rond 1000°C) kan een deel van de PFAS stoffen nog worden geëmitteerd, daar volledige destructie pas optreedt bij temperaturen rond 1400°C. Omwille van de vernietiging van de PFAS stoffen is deze behandelingsmethode doeltreffend. De behandelingsmethode vergt echter zeer veel energie. De CO₂-uitstoot van thermische reiniging is dus aanzienlijk omdat, naast de gebruikte brandstoffen (bij ATM niet primair) de verontreiniging zelf, ook de natuurlijke organische stof in de bodem grotendeels wordt omgezet naar CO₂.

Grondreiniging in Duitsland

Fysicochemische grondreiniging in Duitsland werd niet onderzocht wegens voldoende capaciteit in de lage landen. Er werd navraag gedaan naar de thermische reinigingscapaciteit in Duitsland. Er zijn vergunde reinigingsinstallaties gebaseerd op de techniek van thermische desorptie in Duitsland beschikbaar waar PFAS houdende gronden met een maximale concentratie van 50 mg/kg ds PFAS kunnen worden gereinigd. De reinigingskost wordt bepaald door diverse factoren en is van de grootte orde van 150 euro/ton.

BIJLAGE 1

REFERENTIES

- Baghirzade B. S., et al.** 2021. Thermal Regeneration of Spent Granular Activated Carbon Presents an Opportunity to Break the Forever PFAS Cycle. *Environ. Sci. Technol.* 55, 9, 5608–5619
- Bolan N., et al.**, 2021a. Distribution, behaviour, bioavailability and remediation of poly- and per-fluoroalkyl substances (PFAS) in solid biowastes and biowaste-treated soil. *Environment International*, 155, 106600.
- Bolan N., et al.**, 2021b. Remediation of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) contaminated soils – To mobilize or to immobilize or to degrade? *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123892.
- Bodemplus**, 2021a (<https://www.bodemplus.nl/actueel/nieuwsberichten/2020/verruiming-afzet-verwerking-pfas-houdende-grond/>)
- Bodemplus**, 2021b (<https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/wet-regelgeving/bbk/vragen/grond-baggerspecie-pfas-overige-situaties/faq/komt-pfas-houdende-grond-aanmerking-verklaring/>)
- Cao H., et al.**, 2020. Sonochemical degradation of poly- and perfluoroalkyl substances – A review. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 69, 105245
- Cheng, J. et al.**, 2010. Sonochemical degradation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in groundwater: kinetic effects of matrix inorganics, *Environ. Sci. Technol.* 44, 445–450.
- Concawe**, 2021. Performance of water treatment systems for PFAS removal. Report no. 5/21, 107p.
- Cornelsen M., et al.**, 2021. Minimizing the environmental impact of PFAS by using specialized coagulants for the treatment of PFAS polluted waters and for the decontamination of firefighting equipment. *Emerging Contaminants* 7, 63-76
- Dixit, F. et al.**, 2021. PFAS removal by ion exchange resins: A review. *Chemosphere*, 272, 129777
- Dong Q., et al.**, 2021. Efficient sorption of perfluoroalkyl acids by ionic liquid-modified natural clay. *Chemical Engineering Journal Advances* 7, 100135
- EPA**, 2020. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Incineration to Manage PFAS Waste Streams. Technical Brief, 1-2.
- German Environment Agency**, 2020. Remediation management for local and widespread PFAS contamination. ISSN 1862-4804.
- Gobelius, L., et al.**, 2017. Plant Uptake of Per- and Polyfluoroalkyl Substances at a Contaminated Fire Training Facility to Evaluate the Phytoremediation Potential of Various Plant Species: *Environ. Sci. Technol.* 51, 12602-12610.
- Goovaerts L., et al.**, 2006. Best beschikbare technieken (BBT) bij het uitvoeren van bodemsaneringsprojecten en bij grondreinigingscentra. Gent, Academia Press, 191p.
- Hoisaeter A. et al.**, 2021. Excavated vs novel in situ soil washing as a remediation strategy for sandy soils impacted with per- and polyfluoroalkyl substances from aqueous film forming foams. *Science of the Total Environment*, 794, 148763
- ITRC**, 2021 (<https://pfas-1.itrcweb.org/12-treatment-technologies/> ; geraadpleegd op 5/8/2021)

- Junkui C.J. et al.**, 2020. Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) with Advanced Reduction Processes (ARPs): A Critical Review *Environ. Sci. Technol.* 54, 7, 3752–3766
- McGregor R.**, 2020. Six pilot-scale studies evaluating the in situ treatment of PFAS in groundwater. *Remediation*, 30, 39-50.
- Mei, W. et al.**, 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the soil–plant system: Sorption, root uptake, and translocation. *Environment International* 156, 106642
- Nason et al.**, 2021. A community based PFAS phytoremediation project at the former Loring Airforce Base. *iScience* 24, 102777
- OVAM**, 2020. Code van goede praktijk voor de opslag, behandeling en reiniging van bodemmateriële. (www.ovam.be)
- Radjenovic J. et al.**, 2020. Facing the Challenge of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Water: Is Electrochemical Oxidation the Answer? *Environ. Sci. Technol.* 54, 23, 14815–14829
- Sorengard, M. et al.**, 2020. Non-target and suspect screening strategies for electrodialytic soil remediation evaluation: assessing changes in the molecular fingerprints and per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 104437
- Sorengard, M. et al.**, 2021. Laboratory-scale and pilot-scale stabilization and solidification (S/S) remediation of soil contaminated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of Hazardous Materials* 402, 123453
- Sormo, E. et al.**, 2021. Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar. *Science of the Total Environment*, 763, 144034
- Van den Bergh M., et al.**, 2020. Highly Selective Removal of Perfluorinated Contaminants by Adsorption on All-Silica Zeolite Beta. *Angewandte Chemie*, 59, 33, 14086-14090
- Xu, B. et al.**, 2021. PFAS and their substitutes in groundwater: Occurrence, transformation and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125159