# NOTITIE

| | |
|---|---|
| **Onderwerp** | Zuiveringstechnieken PFAS uit water |
| **Project** | Ondersteuning aan Actieprogramma PFAS |
| **Opdrachtgever** | VNO-NCW |
| **Projectcode** | 151661 |
| **Projectleider** | T.P.M. Spit MSc |
| **Status** | Definitief |
| **Datum** | 9 oktober 2026 |
| **Referentie** | 151661/26-015.051 |
| **Classificatie W+B** | Projectgerelateerd |
| **Auteur(s)** | R. Oost MSc, J. Wevers MSc, A.F. Groeliker MSc, T.P.M. Spit MSc |
| **Gecontroleerd door** | Dr. D.S. Rits en Arcadis |
| **Goedgekeurd door** | T.P.M. Spit MSc |
| **Paraaf** |  |
| **Bijlage(n)** | I Additionele achtergrondinformatie over PFAS<br>II Tabel met waterzuiveringstechnieken voor verwijdering PFAS |
| **Aan** | VNO-NCW<br>Actieprogramma PFAS<br>M. Morenc, J. Fokkens<br>leden werkgroep Waterzuivering |
| **Kopie** | - |

# 1 INLEIDING

## 1.1 Introductie

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) is samen met werkgeversorganisatie VNO-NCW, in 2021 gestart met het Actieprogramma PFAS. Doel van het programma is om handelingsperspectieven in beeld te brengen en concrete acties voor de aanpak van PFAS voor te stellen. Deze acties zijn gericht op het beperken van de overdracht van PFAS naar het milieu en/of van menselijke blootstelling. Daarbij is er aandacht voor verschillende schakels in de keten, van de productie van PFAS, het gebruik in bedrijfsprocessen en in producten, tot de verschillende emissie- en blootstellingsroutes. Aanleiding voor dit programma is het restrictieverzoek dat Nederland, samen met andere Europese landen, heeft ingediend bij de Europese Unie (zie kader).

**Restrictie van PFAS**

Het restrictievoorstel voor PFAS is een voorstel van Nederland, Denemarken, Duitsland, Noorwegen en Zweden om het gebruik, de productie en het op de markt brengen van PFAS in de Europese Unie sterk te beperken. Het voorstel richt zich op de gehele groep PFAS, om te voorkomen dat verboden PFAS worden vervangen door andere vergelijkbare PFAS. Doel van het restrictievoorstel is om de risico's van de stoffen voor mens en milieu te beperken.

Het voorstel bevat een algemeen verbod, met voor bepaalde toepassingen tijdelijke overgangstermijnen of uitzonderingen wanneer nog geen geschikte alternatieven beschikbaar zijn. Het doel is om emissies van PFAS naar bodem, water en lucht zoveel mogelijk te voorkomen en daarmee risico's voor mens en milieu te beperken.

Het proces om te komen tot een Europese restrictie bestaat uit meerdere stappen. De eerste stap was het indienen van het restrictievoorstel bij het European Chemicals Agency (ECHA) in januari 2023, waarna ECHA het voorstel in februari 2023 heeft gepubliceerd. Direct daarna startte een openbare consultatie, waarbij industrie, kennisinstellingen en andere stakeholders input konden leveren. Vervolgens beoordelen de wetenschappelijke comités van ECHA het voorstel en de ingebrachte reacties. Deze beoordeling is nog gaande en wordt gefaseerd afgerond. In de laatste stap besluiten de Europese lidstaten of het voorstel wordt aangenomen. Dit vindt naar verwachting eind 2026 – begin 2027 plaats. Voor meer informatie verwijzen wij naar de website van ECHA: Beperkingsprocedure - ECHA

Om de doelen van het Actieprogramma PFAS (AP) te realiseren, is er een brede samenwerking opgezet tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstituten. Gekeken wordt naar welke concrete stappen gezet kunnen worden in de bedrijfsprocessen bij de papier-, cosmetica- en textielindustrie en bij het gebruik van brandblusschuim, om de reductie van PFAS te versnellen.

Een van de bedrijfsprocessen waar in het AP specifiek naar gekeken wordt, is de (afval-)waterzuivering. Verwacht wordt dat concrete maatregelen in deze schakel van het bedrijfsproces, de 'quick wins' zijn die op korte termijn bijdragen aan de beoogde programmadoelen. De werkgroep Waterzuivering heeft daarom gevraagd om een inventarisatie van bestaande technieken voor de zuivering van PFAS-houdend afvalwater, inclusief een beschrijving van de huidige stand van de techniek.

## 1.2 Onderzoeksvragen en methodiek

In 2021 heeft het Expertisecentrum PFAS een notitie geschreven over de stand der techniek van PFAS-verwijderingstechnologieën. Omdat de ontwikkelingen op het gebied van PFAS zich in snel tempo opvolgen en de maatschappelijke bezorgdheid groot is, is verzocht om een actualisatie van het document uit 2021.

Hierbij wordt getracht antwoord te geven op de volgende vragen:

1 welke PFAS-zuiveringstechnieken worden **waar** toegepast en **waarom**?
2 wat zijn sterke en zwakke punten (denk aan technische en bedrijfseconomische aspecten)?
3 welke voorzuivering is nodig per watermatrix (grondwater vs. afvalwater) en waarom?
4 wat zijn leerpunten en aanbevelingen?

Deze notitie beschrijft informatie over alle technieken die ten tijde van schrijven relevant zijn in geval van PFAS-zuivering. Het geeft een overzicht van technieken die gebruikt worden voor de verwijdering van PFAS uit water. De studie is gebaseerd op de waterzuiveringsprincipes, waarbij gekeken is naar twee typen water: afvalwater (zoals proceswater of percolaat van bijvoorbeeld stortplaatsen) en grondwater. De samenstelling van deze typen water verschilt sterk, wat zeer bepalend is voor de in te zetten techniek, het zuiveringsrendement en de kosten. Afvalwater en grondwater kunnen beide PFAS bevatten, waarbij de samenstelling en concentraties sterk afhankelijk zijn van de bron en de lokale omstandigheden. Het belangrijkste onderscheid tussen beide waterstromen is doorgaans de watermatrix: afvalwater bevat veel

meer organische stof, zwevende stoffen en andere verontreinigingen dan grondwater, wat gevolgen heeft voor de verwijdering en analyse van PFAS.

Als eerste is op basis van achtergrondinformatie een overzicht en een long-list van zuiveringstechnieken gemaakt. Van de meest kansrijke technologieën is vervolgens een short-list opgesteld voor verdere uitwerking.

## 1.3 Verantwoording

Het Expertisecentrum PFAS (een samenwerking tussen Arcadis, TTE Consultants en Witteveen+Bos) heeft van IenW opdracht gekregen om het Actieprogramma PFAS te ondersteunen bij technisch-inhoudelijke vragen. De voorliggende studie is uitgevoerd door Witteveen+Bos. Voor het beantwoorden van de vragen hebben wij gebruik gemaakt van wetenschappelijke en publieke publicaties (zie referentielijst).

Witteveen+Bos heeft als onafhankelijke adviseur deze studie op een integere wijze uitgevoerd. Wij hebben gebruik gemaakt van de inzichten op dit moment (Q2 2026). Witteveen+Bos heeft geen belangen met leveranciers van waterzuiveringstechnieken voor de verwijdering van PFAS uit afvalwater. Het rapport is voor review beschikbaar gesteld aan Arcadis, de leden van de werkgroep Waterzuivering en het kernteam van het Actieprogramma PFAS.

## 1.4 Leeswijzer

Deze notitie bevat een samenvatting van de meest recente kennis en inzichten. Het is een handzaam document voor het AP om doelgericht aan de slag te kunnen gaan. **De in bijlage II opgenomen samenvattende tabel staat in deze rapportage centraal**. In deze tabel staan de beschikbare technieken gecategoriseerd en beschreven. Deze notitie geeft verder een beknopte uitleg, onderbouwing en ondersteuning van de tabel.

Hoofdstuk 2 herhaalt kort de relevante eigenschappen van PFAS voor waterzuivering. Hoofdstuk 3 beschrijft de opdeling/categorisering van de technieken en introduceert de longlist van zuiveringstechnieken, en op basis van de selectiecriteria van hoofdstuk 4, worden in hoofdstuk 5 worden de meest kansrijke zuiveringstechnieken toegelicht in een shortlist. Hoofdstuk 6 geeft een conclusie en aanbeveling waarbij een doorkijk wordt gegeven naar laaghangend fruit en technische ontwikkelingen die op de korte termijn als kansrijk kunnen worden beschouwd.

# 2 RELEVANTE INFORMATIE OVER PFAS

Hoewel in dit rapport wordt aangenomen dat de lezer reeds bekend is met PFAS, wordt hieronder kort ingegaan op de eigenschappen van PFAS die relevant zijn voor waterzuivering. Voor meer achtergrondinformatie en verdieping vormen de factsheets van ITRC een waardevolle en actuele informatiebron[1].

## 2.1 Wat zijn PFAS?

PFAS is de afkorting voor poly- en perfluoralkylstoffen, een groep gefabriceerde chemicaliën die vanwege hun nuttige eigenschappen wordt gebruikt in de industrie en in consumentenproducten (zie afbeelding 2.1). Er zijn duizenden verschillende individuele stoffen die tot deze stofgroep horen, met allemaal uiteenlopende molecuulstructuren (zoals neutraal, anionisch, kationisch of zwitterionisch), met of zonder aromatische

[1] https://pfas-1.itrcweb.org/fact-sheets/

ringen, niet-polymeren of polymeren en verschil in molecuulgewicht. Dit geeft deze stoffen verschillende fysische, chemische en biologische eigenschappen. De Organisation for Economic Cooperation and Development [1] heeft in 2021 gedefinieerd welke stoffen tot de stofgroep PFAS horen en welke niet.

Afbeelding 2.1 Voorbeelden van consumentenproducten met PFAS[2]




Deze rapportage focust met name op de PFAS die in water kunnen voorkomen, met als doel deze eruit te halen. Bijlage I geeft meer achtergrondinformatie over de stofgroep PFAS.

### Scope van dit rapport

PFAS omvat een zeer brede en heterogene groep van meer dan 10.000 stoffen, die sterk uiteenlopen in fysisch-chemische eigenschappen, gedrag in het milieu en de mate waarin kennis over analyse en verwijdering beschikbaar is. Het is daarom niet werkbaar om in deze notitie alle PFAS gelijktijdig te behandelen. Deze notitie richt zich daarom specifiek op PFAA's (poly- en perfluoralkylzuren), hun precursors, en relevante vervangende stoffen zoals GenX:

- **PFAA's** zijn de meest persistente eindproducten binnen de PFAS-groep en breken in het milieu niet verder af. Ze worden veelvuldig in oppervlakte- en drinkwater aangetroffen en vormen daarmee de belangrijkste risicobron voor de waterkwaliteit;
- **precursors** zijn relevant omdat zij in het milieu (bijvoorbeeld door biologische of chemische afbraak) alsnog kunnen omzetten in PFAA's. Als deze stoffen buiten beschouwing worden gelaten, ontstaat een onvolledig beeld van de daadwerkelijke PFAA-belasting op de langere termijn;
- **vervangende stoffen zoals GenX** zijn opgenomen omdat deze steeds vaker worden toegepast als alternatief voor de 'klassieke' PFAA's (zoals PFOA en PFOS), sinds deze laatste aan strengere regelgeving onderhevig zijn. Deze vervangers worden inmiddels ook aangetroffen in het watersysteem en vormen daarmee een opkomend aandachtspunt.

Voor deze stoffen is de meeste kennis beschikbaar over meetmethoden, gedrag in het watersysteem en verwijderingstechnieken. Daarnaast maken ze onderdeel uit van de waterkwaliteitsnormen binnen de Europese wetgeving voor oppervlaktewater, grondwater en drinkwater.

[1] Reconciling terminology of the universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances, OECD.org, 2021

[2] Concawe report no. 5/21

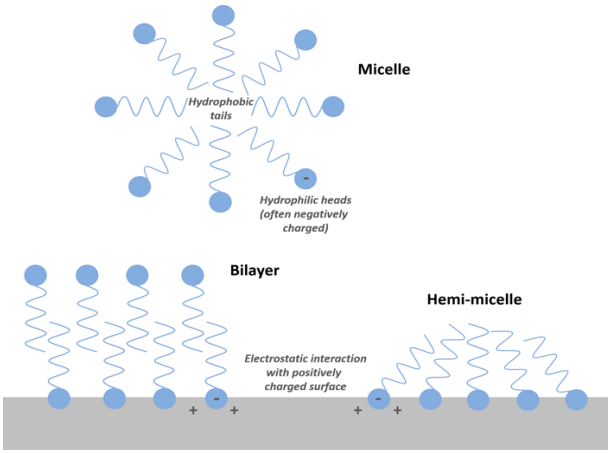
## 2.2 Welke eigenschappen hebben PFAS die belangrijk zijn voor de afvalwaterbehandeling?

Perfluoralkylzuren (PFCA's en PFSA's) zijn oppervlakte-actieve stoffen.Deze stoffen hebben een polaire ionogene kop die vaak bestaat uit een zuurgroep (sulfonaat of carboxylaat) en een apolaire staart bestaande uit organofluorgroep. De kop is hydrofiel ('waterminnend'), de staart is hydrofoob ('waterafstotend').

### 2.2.1 Micellen

Sommige PFAS zijn in staat om de oppervlaktespanning van water te verlagen, waardoor er een schuimachtige structuur ontstaat. Deze PFAS vertonen ander gedrag bij een hoge concentratie. Wanneer de kritische micelconcentratie is overschreden, kunnen micellen, hemi-micellen of een simpele bi-layer structuren ontstaan, zie afbeelding 2.2.

Afbeelding 2.2 Voorbeeld van micel vorming van PFAS[1]




De hydrofobe staarten van deze PFAS vertonen interactie met elkaar en haken in elkaar of komen op een andere wijze samen. De hydrofiele kop heeft interactie met water. Er is gerapporteerd dat deze PFAS bij een overschrijding van de kritische micelconcentratie (CMC), meer geadsorbeerd worden aan organisch bodemmateriaal (onder andere zwevend stof/slib) en mineralen uit de omgeving. Dit mechanisme is van belang bij processen waarbij PFAS worden opgeconcentreerd, zoals bij bepaalde zuiveringstechnieken (membraanfiltratie of ionenwisseling)

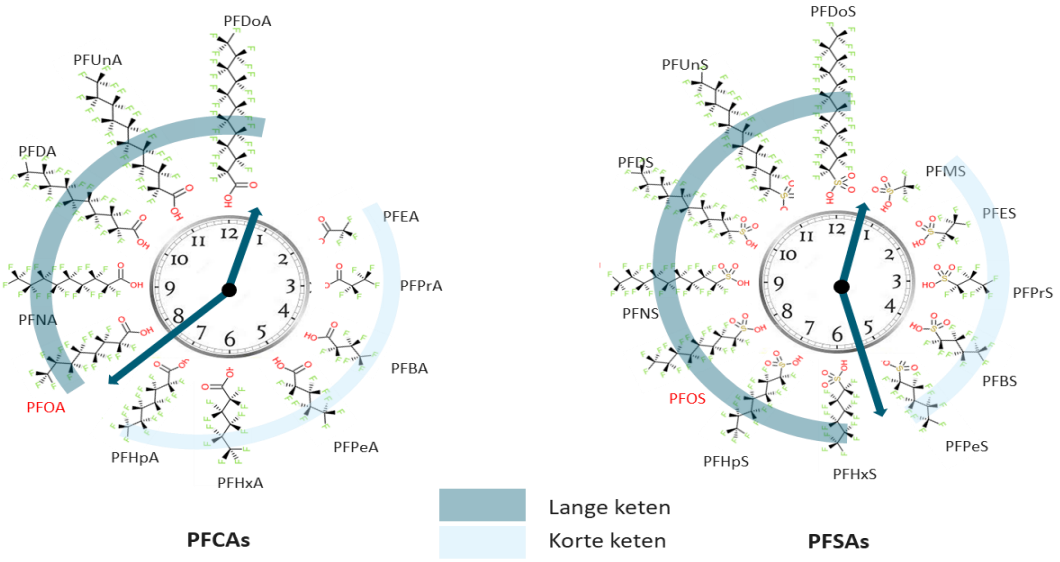
### 2.2.2 Ketenlengte

Ook de ketenlengte speelt een rol in de oplosbaarheid van sommige PFAS in water. PFAS met lange ketens (meer C-atomen) is minder oplosbaar in water dan PFAS met korte ketens. Lange ketens zijn grofweg makkelijker uit het water te verwijderen dan korte ketens.

Het onderscheid tussen korte en lange ketens is in de afbeelding hieronder grafisch weergegeven voor een aantal veelvoorkomende PFAS. Voor de selectie van zuiveringstechnieken moet daarom gekeken worden naar hoe goed de techniek de lange en/of korte PFAS-ketens verwijderd. Het is mogelijk dat er een combinatie van technieken nodig is om tot de volledige verwijdering van PFAS uit het water te komen.

[1] PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances (itrcweb.org)

Afbeelding 2.3 Onderscheid van lange en korte PFAS ketens voor PFAS met carboxylzuren (PFCA's) en sulfonzuren (PFSA's)[1]




# 3 WATERZUIVERINGSTECHNIEKEN

In dit hoofdstuk is beknopt aandacht besteed aan de verschillende principes van zuivering van water in relatie tot de verwijdering van PFAS. De volgende principes van waterbehandeling wordt in deze paragraaf kwalitatief uitgelegd:

- adsorptietechnieken (paragraaf 3.1);
- coagulatietechnieken (paragraaf 3.2);
- scheidingstechnieken (paragraaf 3.3);
- chemische technieken (paragraaf 3.4);
- biologische technieken (paragraaf 3.5);
- thermische technieken (paragraaf 3.6).

In bijlage II staat een tabel (longlist) waarin de werking van de beschikbare waterzuiveringstechnieken kort is toegelicht, opgedeeld in verschillende categorieën gebaseerd op de zuiveringsprincipes. Uit de longlist worden in hoofdstuk 4 de meest geschikte technologieën geselecteerd (shortlist) voor verwijdering van PFAS uit industrieel afvalwater en grondwater.

## 3.1 Adsorptie

Adsorptie is een zuiveringsproces waarbij opgeloste verontreinigingen (het adsorbaat) uit water worden verwijderd door hechting aan het oppervlak van een vast materiaal (het adsorbens). Het principe is gebaseerd op een aantal specifieke interacties tussen het adsorbaat en het adsorbens. De belangrijkste interacties zijn: Van der Waals-krachten, hydrofobe interactie, elektrostatische interactie of directe chemische bindingen. De adsorptiecapaciteit en -snelheid worden onder andere bepaald door eigenschappen van het adsorbens zoals het oppervlak, de poriëngrootte en actieve groepen/binding sites aan het oppervlak. Daarnaast zijn ze ook afhankelijk van de moleculaire eigenschappen van het adsorbaat, pH en de contacttijd.

De twee meest toegepaste en best onderbouwde adsorptietechnieken voor PFAS-verwijdering zijn actieve kool en ionenuitwisselingsharsen. Beide technieken worden in de shortlist van hoofdstuk 5 verder toegelicht.

[1] Afbeelding is eigendom van Arcadis en gebruikt met toestemming.

Daarnaast is een reeks innovatieve sorptietechnieken in ontwikkeling, waaronder actieve biochar, koolstof nanotubes, moleculair geïmprinteerde polymeren en elektrosorptie. Verschillende commerciële producten op de markt zijn op (een van) deze principes gebaseerd, zoals Puratech G400, DEXSORB en FLUORO-SORB (zie ook de geactualiseerde afbeelding 4.2).

### 3.1.1 Actieve kool

Actieve kool, toegepast als granulaat (GAC), poeder (PAC) of colloïdaal (CAC), wordt beschouwd als een van de referentie- of toonaangevende technologieën voor de zuivering van (grond)water. De techniek is veelvuldig toegepast, van pilot- tot full-scale-installaties, en heeft haar doeltreffendheid bewezen. Actieve kool wordt door veel gespecialiseerde leveranciers op de markt gebracht. In het algemeen adsorbeert granulaire actieve kool alle in waterstromen aanwezige niet in wateroplosbare organische stoffen. Het verwijderingsmechanisme is adsorptie in de poriën van de actieve kool, gebaseerd op hydrofobe interacties tussen de (hydrofobe) gefluoreerde keten van PFAS en het oppervlak van de actieve kool. Het toepassingsgebied van actieve kool voor de behandeling van verontreinigd water is breed. Zo wordt het grootschalig ingezet in drinkwaterproductie, grondwater sanering en afvalwaterbehandeling.

### 3.1.2 Actieve biochar

Actieve biochar is een bio-based variant van geactiveerde kool. Actieve biochar wordt geproduceerd door de pyrolyse van biomassa en vervolgens ook thermisch of chemisch geactiveerd. Net als klassieke actieve kool wordt actieve biochar toegepast als adsorbens voor verontreinigingen in (grond)water en berust de verwijdering van organische stoffen op dezelfde adsorptie interactiemechanismes. De technologie is interessant omdat biomassareststromen gevaloriseerd worden, en omdat het een duurzamer alternatief is dan conventionele actieve kool die uit fossiele brandstoffen wordt geproduceerd. Ondanks dit grote voordeel zijn toepassingen nog beperkt en wordt de conventionele actieve kool vaak verkozen boven de bio-based variant. Dit komt voornamelijk door de inconsistentie in de productkwaliteit van de biochar, hierdoor is biochar minder effectief, zowel in adsorptiesnelheid als capaciteit.

### 3.1.3 Koolstof nanotubes

Carbon nanotubes (CNTs) zijn buisvormige koolstofnanostructuren met een groot specifiek oppervlak en gunstige bindingseigenschappen via π–π-interacties, hydrofobe aantrekking en van der Waals-krachten. Voor de adsorptie van PFAS hebben CNTs een hoge affiniteit, vooral voor lange ketens zoals PFOA en PFOS. De adsorptiesnelheid van CNTs is hoog, wat het mogelijk maakt om compactere systemen met een kortere contacttijd toe te passen.

Grootschalige toepassing kent echter serieuze drempels: productie is energie-intensief en kostbaar, CNTs neigen tot aggregatie (samenklontering en verlies van effectief oppervlak), en regeneratie is minder ontwikkeld dan bij actieve kool. Daarnaast roept de potentiële milieuimpact van vrijkomende nanodeeltjes zorgen op. CNTs bieden potentieel voor PFAS-verwijdering, maar zijn nog niet rijp voor brede praktijktoepassing.

### 3.1.4 Moleculair geïmprinteerde polymeren (in het engels: molecular imprinted polymers)

Moleculair geïmprinteerde polymeren (MIPs) zijn synthetische materialen met speciaal gevormde bindingsplaatsen die PFAS-moleculen selectief kunnen opvangen. Tijdens de productie wordt een PFAS-molecuul als ‘template’ gebruikt; na verwijdering blijven holtes achter die precies passen bij de doelstof.

Bij waterzuivering binden de MIPs PFAS zoals PFOA en PFOS via chemische interacties, terwijl andere stoffen grotendeels worden genegeerd. Hierdoor kunnen ze PFAS zeer selectief verwijderen.

Deze hoge selectiviteit maakt MIPs met name kansrijk in toepassingen waarbij vooraf bekend is welke specifieke PFAS verwijderd moeten worden, zoals in industrieel proceswater waar een beperkt en bekend spectrum aan PFAS vrijkomt. Voor generiek afvalwater of grondwater, waarin doorgaans een brede en wisselende mix van PFAS-verbindingen aanwezig is, is deze selectiviteit juist een beperking: stoffen die niet overeenkomen met de template worden nauwelijks verwijderd. Dit maakt ze minder geschikt voor bulk verwijdering en waterbehandeling, maar heel interessant voor de ontwikkeling van sensoren voor PFAS-detectie. De polymeren zijn meestal wel goed chemisch te regenereren, waardoor ze vaker hergebruikt kunnen worden.

### 3.1.5 Elektrosorptie

Elektrosorptie ook wel bekend als capacitive deionization (CDI) is een technologie waarbij ionen onder invloed van een elektrisch veld worden opgeslagen op poreuze koolstofelektroden. De elektrodes kunnen in situ geregenereerd worden door de potentiaal om te draaien. Hierdoor komen de geadsorbeerde ionen weer vrij en worden ze als concentraat afgevoerd.

Voor PFAS is conventionele CDI beperkt effectief, omdat de technologie zich richt op de verwijdering van anorganische ionen. Aangepaste varianten zoals membraan-CDI (MCDI) of gefunctionaliseerde elektroden tonen betere resultaten, met name voor lange ketens zoals PFOA en PFOS. Kortere ketens en nieuwere PFAS-verbindingen zoals GenX zijn lastiger te verwijderen door de kortere hydrofobe staart. Met name concurrentie van andere ionen in de watermatrix is een uitdaging voor de toepassing van elektrosorptie van PFAS. Ionen zoals sulfaat, nitraat en fosfaat worden ook verwijderd.

CDI is een interessante technologie vanwege de eenvoudige regeneratie, maar vraagt verdere optimalisatie van elektrodematerialen en systeemontwerp voordat brede toepassing voor PFAS-verwijdering realistisch is.

### 3.1.6 Puratech G400

Puratech G400 is een adsorbtiemiddel specifiek ontwikkeld voor de verwijdering van PFAS uit water. In vergelijking met traditionele technieken zoals actieve kool (GAC) en ionenwisselaars werkt Puratech G400 veel sneller, met contacttijden van minder dan één minuut. Hierdoor zijn compactere filtersystemen mogelijk met minder materiaalgebruik en lagere investerings- en operationele kosten. Het materiaal wordt inmiddels getest en toegepast in industriële, gemeentelijke en saneringsprojecten. Hieruit moet blijken of het materiaal ook in staat is om korte ketens te verwijderen, en of de korte contacttijden ook toepasbaar zijn voor grotere bredere filterbedden. De adsorbent is single-use.

### 3.1.7 DEXSORB

DEXSORB is een geavanceerd PFAS-filtermateriaal gebaseerd op β-cyclodextrine: ringvormige suikermoleculen afkomstig uit maïszetmeel. Deze moleculen vormen kleine holtes die PFAS selectief aantrekken en vasthouden. In tegenstelling tot traditionele actieve kool heeft DEXSORB een kleiner effectief oppervlak en berust de adsorptie van PFAS aan DEXSORB op zogenaamde guest-host interacties. Hierdoor is de adsorptie selectiever en treed er minder competitie voor bindingsplaatsen op. Het materiaal heeft een snellere adsorptiekinetiek dan GAK en is minder gevoelig voor verstoring door andere stoffen in het water.

Een belangrijk voordeel is dat het filtermateriaal regenereerbaar is: de opgevangen PFAS kunnen geconcentreerd worden verwijderd en het materiaal kan opnieuw worden gebruikt, wat afvalstromen vermindert. Op dit moment wordt er in de communale zuivering onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid

van deze technologie in Nederland[1]. Ook wordt er onderzoek gedaan naar de destructie van PFAS uit dit regeneraat[2].

### 3.1.8 FLUORO-SORB

FLUORO-SORB® is een adsorptiemateriaal voor PFAS-verwijdering, ontwikkeld op basis van gemodificeerde kleimineralen met een aangepast actief oppervlak. Door de speciale oppervlaktechemie is FLUORO-SORB minder gevoelig voor verstoring door andere verontreinigingen, zoals organisch materiaal of oplosmiddelen. Het materiaal kan worden toegepast in doorstroomfilters, reactieve barrières en in-situ bodemsanering. Dankzij de hoge adsorptiecapaciteit zijn minder filterwissels nodig, wat operationele kosten en afvalstromen verlaagt in vergelijking met actief kool.

### 3.1.9 Ionenwisselingsharsen

Ionenwisseling is een bekende technologie voor het verwijderen van PFAS uit drinkwater, grondwater en industrieel afvalwater. De techniek maakt gebruik van synthetische harskorrels (resins) met geladen functionele groepen die PFAS-moleculen aantrekken en vasthouden. Omdat veel PFAS negatief geladen zijn, worden meestal anionenwisselaars toegepast. Wanneer vervuild water door het harsbed stroomt, wisselen de harsen ionen - zoals chloride - uit tegen PFAS-moleculen. Hierdoor worden PFAS effectief uit het water verwijderd. Ionenwisselaars zijn relatief goed in het verwijderen van korte ketenvormige PFAS, die moeilijker af te vangen zijn met traditionele actieve koolfilters.

Een belangrijk voordeel van ion exchange is de hoge verwijderingsefficiëntie, snelle werking en relatief compacte installatiegrootte. De technologie wordt daarom veel toegepast bij drinkwaterbedrijven, industriële installaties en saneringsprojecten. Daarnaast kunnen sommige harsen worden geregenereerd, waardoor het materiaal meerdere keren bruikbaar is en een concentraat afvalstroom wordt geproduceerd.

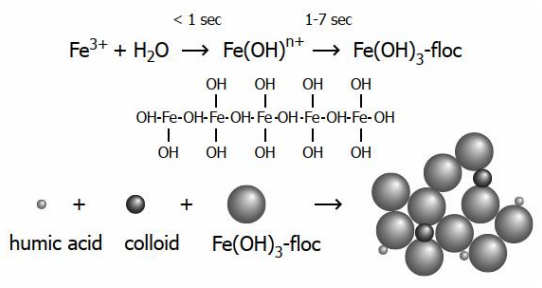
## 3.2 Coagulatie (Scheiding)

Coagulatie is een zuiveringsproces waarbij kleine, in water gesuspendeerde deeltjes worden samengevoegd tot grotere eenheden, zodat zij eenvoudiger kunnen worden verwijderd. Sommige deeltjes in het water zijn namelijk te klein om te bezinken of te filteren. Een deel van deze deeltjes is echter wel groot genoeg om gedestabiliseerd te worden, waarna ze uit oplossing komen. Dit kan door het doseren van een coagulant om deze kleine deeltjes tot een groter geheel te laten vormen, zodat zij eenvoudiger gescheiden kunnen worden. Afbeelding 3.1 laat zien hoe (in dit voorbeeld) humuszuren onder invloed van ijzer coaguleert. In dit voorbeeld zouden de PFAS zich gedragen zoals de humuszuren. Nadat deze deeltjes gevormd zijn, kunnen ze worden verwijderd middels filtratie of bezinking.

[1] STOWA 2023-54. https://www.stowa.nl/publicaties/dexfilter-pilot-lelystad-pilotonderzoek-dexfilter-voor-verwijdering-organische

[2] STOWA 2026-13. https://www.stowa.nl/publicaties/laboratoriumonderzoek-pfas-afbraak-ball-mill

Afbeelding 3.1 Coagulatie voorbeeld met ijzeroxide dosering, PFAS vertoont hier een vergelijkbare gedrag als humuszuren; Bron[1]




Onder deze categorie vallen de volgende technieken:
- coagulatie/flocculatie;
- elektrocoagulatie.

### 3.2.1 Coagulatie/flocculatie

Bij coagulatie ontstaan, zoals hierboven beschreven, kleine vlokken van samengeklonterde deeltjes. Deze vlokken zijn echter vaak nog te klein om te filteren. Door middel van rustig roeren kunnen ze verder groeien, maar dit proces verloopt traag. Om de vlokvorming te versnellen worden flocculanten (vlokmiddelen) worden toegevoegd. Flocculanten zijn hoogmoleculaire polymeren met diverse functionele groepen. Geladen deeltjes en kleine vlokjes worden aangetrokken tot de ladingsgroepen van het polymeer, waardoor een grotere en beter filtreerbare vlokken ontstaan.

Coagulatie en flocculatie worden daarom vaak in combinatie toegepast. In specifieke gevallen kan één van beide technieken echter ook afzonderlijk volstaan.

De investeringskosten van coagulatie/flocculatie zijn laag. Echter zijn de operationele kosten hoog, door de aanzienlijke hoeveelheden coagulant en flocculant die nodig zijn om het uitvlokken op gang te brengen. Ook de reststromen moeten dikwijls extern verwerkt worden, waardoor de kosten hoog kunnen oplopen[2].

Coagulatie/flocculatie wordt voornamelijk ingezet als voorbehandeling voor de fysicochemische zuivering. Op deze manier kunnen zowel het chemicaliënverbruik als de variaties in concentraties beperkt worden.

### 3.2.2 Elektrocoagulatie (EC)

Het doel van elektrocoagulatie is het vormen van precipitaten en van bindingen tussen colloïden zodat deze stoffen gemakkelijk afgescheiden kunnen worden. Het vrijkomen van coagulant wordt bereikt door het elektrolytisch oplossen van een elektrode (anode, gewoonlijk Fe of Al).

Elektrocoagulatie heeft als voordeel dat de installatie eenvoudig is en dat de gevormde slibvlokken groter, stabieler en makkelijker te ontwateren zijn dan fysisch-chemisch slib. Bovendien zal het effluent van een EC minder anorganische stoffen bevatten, wat gunstig is omdat het de zoutvracht op het watersysteem beperkt en de nabehandeling (bijvoorbeeld bij lozing of hergebruik) vereenvoudigt. Een ander groot voordeel is het mogelijk maken van hele kleine colloïdale deeltjes door het elektrisch veld. Het proces is elektrisch gestuurd waardoor de onderhoudskosten (afgezien van het reinigen en vervangen van elektroden) goedkoper uitvalt.

---

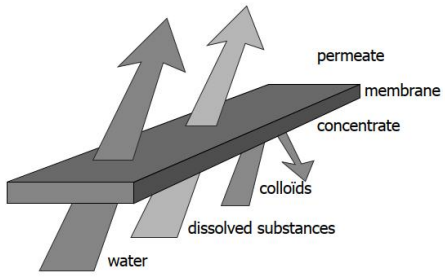
1 TU Delft Fundamentals of drinking water and wastewater treatment September 2011 dictaat.

2 Coagulatie en flocculatie | EMIS

## 3.3 Filtratie (Scheiding)

Verontreiniging in water kan verwijderd worden met fysisch-chemische scheidingstechnieken. Dit zijn onder andere membraanfiltratietechnieken, hierbij worden de verontreinigingen tegengehouden die groter zijn dan de poriën van het membraan. Aan de kant van het membraan waar de verontreiniging zich ophoopt, ontstaat een zogenaamde concentraatstroom. De andere, 'schone' kant van het membraan is het zogenaamde permeaat. Naast membranen zijn er ook andere fysisch-chemische scheidingstechnieken zoals schuimscheiding, waarbij scheiding plaatsvindt op basis van hechtingseigenschappen aan bubbels.

Afbeelding 3.2 Membraanfiltratie: verontreiniging (concentraat) onder en schoon materiaal (permeaat) boven het membraan[1]




Onder deze categorie vallen de volgende technieken:
- omgekeerde osmose;
- nanofiltratie;
- schuimscheiding (met of zonder ozon).

### 3.3.1 Omgekeerde osmose

Omgekeerde osmose is een drukgedreven membraanproces met een scheidingsbereik van 0,1 tot 1 nm. Dankzij dit kleine bereik hebben omgekeerde-osmosemembranen een hoge retentie voor bacteriën, virussen en microdeeltjes. Daarnaast verwijdert omgekeerde osmose nagenoeg alle PFAS, met uitzondering van ultrakorte-keten PFAS zoals TFA.

De belangrijkste nadelen van deze techniek zijn de hoge investerings- en energiekosten, en de noodzaak van uitgebreide voorzuivering om membraanvervuiling (fouling en scaling) te voorkomen Daarnaast produceert het proces een concentraatstroom waarin alle tegengehouden stoffen in hoge concentratie aanwezig zijn en apart verwerkt moet worden.

### 3.3.2 Nanofiltratie

Nanofiltratie is een bewezen membraantechnologie voor verwijdering van PFAS uit water. Nanofiltratie is opgenomen in onze 'shortlist' van de meest kansrijke zuiveringstechnologieën. Verdere toelichting van de effectiviteit, kosten en reststromen van deze zuiveringstechniek is te lezen in paragraaf 5.2.3.

[1] TUDelft - Drinking water treatment, november 2011 (dictaat).

### 3.3.3 Schuimscheiding

Schuimscheiding is een opkomende techniek voor verwijdering van PFAS uit water, die al veelvuldig wordt toegepast op grote schaal. Schuimscheiding is opgenomen in onze ‘shortlist’ van de meest kansrijke zuiveringstechnologieën. Verdere toelichting van de effectiviteit, kosten en reststromen van deze zuiveringstechniek is te lezen in paragraaf 5.2.2.

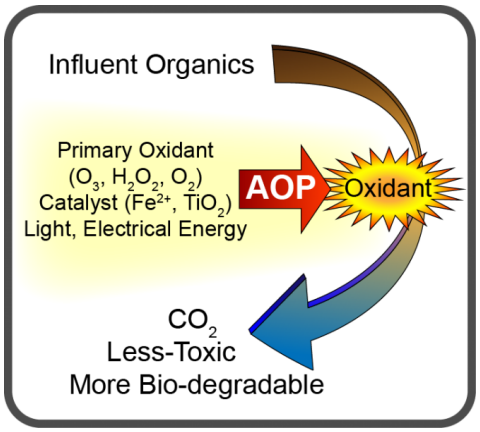
## 3.4 Vernietigingstechnieken

Onder de categorie 'vernietigingstechnieken' vallen in dit rapport technieken die als doel hebben PFAS daadwerkelijk af te breken tot onschadelijke eindproducten, in plaats van de stoffen enkel te verwijderen of te concentreren. Deze technieken worden doorgaans niet ingezet op de hoofdstroom afvalwater zelf, maar op geconcentreerde deelstromen omdat destructie van verdunde PFAS-stromen doorgaans te energie- en kostenintensief is.

Een bekende route in de waterzuivering is de inzet van sterke oxidanten zoals ozon of hydroxylradicalen, vaak toegepast als advanced oxidation processes (AOP). Afbeelding 3.3 laat twee routes zien waarop ozon of radicalen via AOP gebruikt worden in afval- en drinkwater voor de afbraak van organische microverontreinigingen. Het is echter al langer bekend dat deze ‘standaard’ oxidatieve technieken niet in staat zijn om de chemisch zeer sterke PFAS daadwerkelijk af te breken: de sterke koolstof-fluorbinding is hiervoor te stabiel. Wel kunnen deze technieken zogenaamde polyfluor-'precursors' omzetten naar primaire (perfluor)PFAS, zonder deze verder af te breken.

Voor daadwerkelijke destructie van PFAS is dan ook een extra, intensievere stap nodig. Dit is weliswaar mogelijk, maar vergt doorgaans veel energie en/of chemicaliën. De zoektocht richt zich daarom op destructietechnieken die PFAS volledig afbreken, zonder de vorming van schadelijke tussen- of afbraakproducten (zoals kortere-keten PFAS). Naast reductieve technieken, behoort ook verbranding bij hoge temperatuur tot de destructietechnieken.

Afbeelding 3.3 Voorbeeld oxidatieve technieken voor afbraak van organisch materiaal[1]




Onder deze categorie vallen de volgende technieken:
- fotokatalyse/elektrokatalyse/foto-elektrokatalyse;
- chemische oxidatie;
- elektrochemische oxidatie;

[1] https://genesiswatertech.com/blog-post/how-gwt-aop-advanced-oxidation-systems-helped-companies-to-achieve-better-water-treatment-results/

- thermische destructie;
- superkritische wateroxidatie (vaak afgekort tot SCWO);
- hydrothermisch alkalische behandeling (HALT);
- chemische reductie;
- plasmabehandelingstechnologie.

### 3.4.1 Fotokatalyse

Fotokatalyse is een technologie die fotonenergie uit zonnestraling omzet in chemische energie met behulp van halfgeleiders als fotokatalysatoren. Dit gebeurt door elektronen te exciteren zodat elektrongatparen ontstaan, die vervolgens de reductie en oxidatie van chemische stoffen mogelijk maken. Deze zuiveringstechniek kan zowel korte als lange ketens PFAS volledig afbreken, al kosten lange ketens meer tijd. De kosten van fotokatalyse zijn afhankelijk van de high-power UV lamps, die een beperkte levensduur hebben, en het chemicaliëngebruik.

### 3.4.2 Chemische oxidatie

Chemische oxidatie heeft als doel organische polluenten om te zetten in minder schadelijke of onschadelijke stoffen. Dit proces maakt gebruik van oxidantia die worden toegevoegd aan of opgewekt in het afvalwater, zoals ozon ($O_3$), waterstofperoxide ($H_2O_2$) en natriumhypochloriet (NaOCl).

Voor PFAS-verwijdering is chemische oxidatie vooralsnog onvoldoende effectief gebleken. Uit een studie van 2026 blijkt dat PFAS slechts onvolledig wordt afgebroken: lange-keten PFAS-verbindingen worden omgezet naar kortere ketens.[1]Deze bevinding sluit aan bij eerder onderzoek, waaruit eveneens bleek dat chemische oxidatie ineffectief kan zijn voor de afbraak van PFAS[2].

### 3.4.3 Elektrochemische oxidatie

Elektrochemische oxidatie (EO) is een veelbelovende techniek voor de afbraak van PFAS, waarbij volledige mineralisatie mogelijk is via zogenaamde niet-actieve elektroden. De meest onderzochte anodetypen zijn boor-gedoteerd diamant (BDD) en titaniumsuboxide (TSO), vanwege hun hoge afbraakefficiëntie.

De techniek is al op relatief grote schaal toegepast. De grootste beschreven installatie behandelde circa 985.000 liter verontreinigd water met behulp van $Ti_4O_7$-elektroden, met een verwijderingsrendement van 80-98 % voor PFOA en PFOS. Hierbij was echter nog wel sprake van onvolledige mineralisatie. Alhoewel een defluorering van ruim 200 % is aangetoond (door aanwezigheid van ongekwantificeerde gefluoreerde componenten) was de verwijdering van korte ketens beperkt. [3]

### 3.4.4 Thermische destructie

Bij thermische destructie worden zeer hoge temperaturen gebruikt om verontreinigingen te mineraliseren. Dit is een bewezen techniek om een zeer groot deel van PFAS af te breken. De exacte benodigde minimumtemperatuur ligt nog niet eenduidig vast, maar de algemene consensus is dat temperaturen >1.000 °C benodigd zijn, mogelijk zelfs >1.400°C. Bij onvolledige verbranding kunnen korte keten PFAS weer uitgestoten worden als afbraakproduct.

---

[1] Zheng et al. (2026)

[2] ITRC june 2022; Kurcharzyk et al., 2017

[3] Tshangana et al., 2025. Technology status to treat PFAS-contaminated water

### 3.4.5 SCWO

Bij superkritische wateroxidatie gedraagt water zich als oplosmiddel wanneer het de kritische toestand bereikt (boven 374 °C en 22,1 MPa). In deze toestand worden chemische oxidatiereacties van oxidantia zoals $O_2$, lucht en $H_2O_2$ versterkt[1].

SCWO is in staat tot volledige mineralisatie van zowel korte- als langeketenverbindingen, met $CO_2$ en HF als eindproducten. De conversie is sterk temperatuurafhankelijk: onder batchcondities werd bij 500 °C na 60 minuten een conversie van maximaal 70 % voor PFOS bereikt[2]. Bij continue doorstroom werd bij temperaturen tot 650 °C een conversie van 99,999 % bereikt voor PFOS, PFHpS en PFOA in circa 30 seconden[3].

SCWO is een mature technologie die al meer dan 20 jaar commercieel beschikbaar is voor de behandeling van gevaarlijke afvalstromen.[4] Voor PFAS-toepassingen heeft het Deense bedrijf Aquarden Technologies de techniek succesvol opgeschaald naar volledige praktijkschaal. Knelpunten bij opschaling zijn corrosie, zoutprecipitatie en de hoge energiebehoefte van het proces.

### 3.4.6 HALT

HALT is een techniek waarbij water onder zeer hoge druk (~25 MPa) en temperatuur (~350 °C) wordt gebracht, zonder de kritische toestand te bereiken zoals bij SCWO. Door tegelijkertijd een sterk basische stof, vaak natriumhydroxide (NaOH), toe te voegen, worden PFAS-verbindingen afgebroken tot onschadelijke fluoridezouten.[5]

De techniek is in staat tot volledige mineralisatie van zowel korte- als langeketenverbindingen [6]. Een belangrijk voordeel ten opzichte van SCWO is dat HALT niet gevoelig is voor de aanwezigheid van zware metalen, wat de toepasbaarheid op complexe afvalstromen vergroot.

De technologie bevindt zich op Technical Readiness Level (TLR) 5-6, wat betekent dat de schaalvergroting nog beperkt is.

### 3.4.7 Chemische reductie

Chemische reductie is, vergelijkbaar met oxidatieprocessen, gebaseerd op directe elektronenoverdracht en het genereren van reactieve vrije radicalen om verontreinigingen af te breken[7]. De techniek wordt voornamelijk ingezet voor grondwaterbehandeling. De efficiëntie is sterk afhankelijk van de watermatrix. Een belangrijk knelpunt bij in-situ toepassing is dat reductiemiddelen snel worden afgevangen door zuurstof en nitraat, wat de toepasbaarheid ter plaatse bemoeilijkt[8]. Daarnaast zijn hoge reactietemperaturen en de kosten van nul-valent ijzer (zero valent iron, ZVI) een praktische belemmering[9].

De technologie bevindt zich op TLR 6-7.

---

[1] Berg et al. (2022): Developing innovative treatment technologies for PFAS-containing wastes

[2] Pinkard et al. 20221

[3] Tshangana et al. 2025

[4] Diguiseppi et al. 2024

[5] Tsanghana et al 2025

[6] DiGuiseppi et al, 2024

[7] Nzeribe et al., 2019

[8] Ross et al. 2018

[9] Verma et al. 2021

### 3.4.8 Plasmabehandelingstechnologie

Plasma is de vierde toestand van materie (naast vast, vloeibaar en gas) en bestaat uit geladen deeltjes zoals ionen en vrije elektronen. Via elektrische ontladingen kunnen organische moleculen gelijktijdig worden afgebroken door oxidatie én reductie[1].

Er zijn twee varianten: thermisch en niet-thermisch plasma. Niet-thermisch plasma verbruikt minder energie, maar heeft meer tijd nodig om hetzelfde resultaat te bereiken.  De techniek kan worden ingezet voor de behandeling van grondwater[2].

Voor langeketenverbindingen werd een verwijderingsefficiëntie van meer dan 90 % bereikt, bij niet-thermisch plasma zelfs binnen 10 minuten voor stoffen zoals PFOS en PFHxA. Korteketenverbindingen worden minder goed afgebroken doordat de volledige omzetting moeilijker te bereiken is[3]. Een aandachtspunt is dat bij het proces mogelijk schadelijke bijproducten en broeikasgassen vrijkomen.
De technologie bevindt zich op TRL 6-7 voor thermisch plasma en TRL 6-8 voor niet-thermisch plasma.

### 3.4.9 Fysisch chemische destructie

Tot slot is er nog fysisch chemische destructie met bijvoorbeeld een planetaire kogelmolen (ball mill). Dit is geen verwijderingsmechanisme, maar kan worden toegepast na een verwijdering als een mechanochemische destructietechniek waarbij PFAS in droge vorm (ingedampt concentraat) in een kogelmolen met chemische toevoegingen (co-milling agents zoals KOH) vermalen wordt. Door botsing en wrijving ontstaan lokaal hoge temperaturen en druk waarbij volledige mineralisatie van zowel lange als korte ketens mogelijk is. De technologie is nog volop in ontwikkeling en nog niet toegepast op grote schaal.

## 3.5 Biologische technieken

Het inzetten van micro-organismen (bacteriën, schimmels) of planten voor het afbreken van verontreinigingen wordt biologische afbraak c.q. bioremediatie genoemd. Dit kan mogelijk een duurzamer alternatief zijn voor de afbraak van PFAS. In 2018 leek dit succesvol met de Acidimicrobium sp. A6 bacterie, echter is nadien weinig bewijs gevonden dat deze microben ook effectief PFAS kunnen afbreken. Wel lopen een aantal onderzoekstrajecten om te zoeken naar organismen die PFAS effectief kunnen afbreken.

Onder deze categorie vallen de volgende technieken:
- micro-organismen gebaseerde biologische afbraak;
- constructed wetlands;
- enzymen en proteïnen voor biologische afbraak.

Gezien de lage TRL en effectiviteit, werken we deze technieken niet uit in dit document.

[1] Ahmed et al. 2020

[2] Diguiseppi et al., 2024

[3] Tshangana et al., 2025

# 4 VERGELIJKING VAN TECHNIEKEN VOOR VERWIJDERING PFAS UIT WATER

De diverse zuiveringstechnieken zijn samengevat in bijlage II. Hiervoor is een grote hoeveelheid aan literatuur geraadpleegd (weergegeven in bijlage II en de referentielijst). Om tot de shortlist van hoofdstuk 5 te komen, is iedere techniek waar mogelijk op de volgende punten beoordeeld:

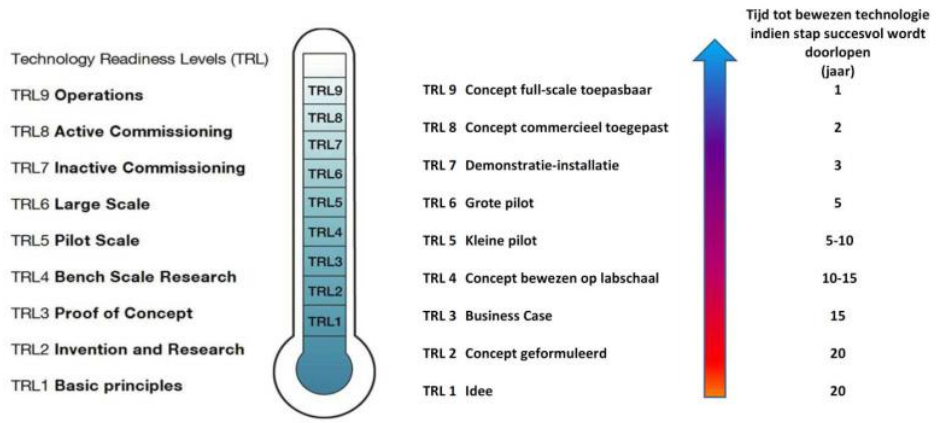
- schaal/marktrijpheid/TRL (>7);
- effectiviteit:
  - korte ketens versus lange ketens (short vs. long chain);
  - verwijderingsrendement;
- geschiktheid:
  - type water waarin getest is (industrieel afvalwater/grondwater);
  - reststroom/-product;
  - kosten CAPEX en OPEX.

Voor enkele technieken was er in de literatuur geen direct antwoord beschikbaar op een van bovenstaande punten. In dat geval is op basis van 'expert opinion' informatie gegeven die richting geeft. Bijvoorbeeld de inzet van enzymen voor verwijdering van PFAS: voor deze techniek is nu nog geen concrete informatie beschikbaar over de kosten. In plaats daarvan is aangegeven dat de enzymen uit een specifieke bacterie gewonnen moeten worden en dat de omvang van kosten nog onbekend is.

## 4.1 Technology Readiness Levels (TRL)

Eén van de doelstellingen van deze studie is om 'laaghangend fruit' te duiden. Welke zuiveringstechnieken hebben potentie en kunnen snel doorontwikkeld en opgeschaald worden? De technische volwassenheid van technieken, en daarmee de potentie en snelheid van opschalen, is uitgedrukt in Technology Readiness Level (TRL).

Afbeelding 4.1 Overzicht van de TRL stappen, op basis van het model voor verwijdering van medicijnresten uit communaal afvalwater via de STOWA[1]

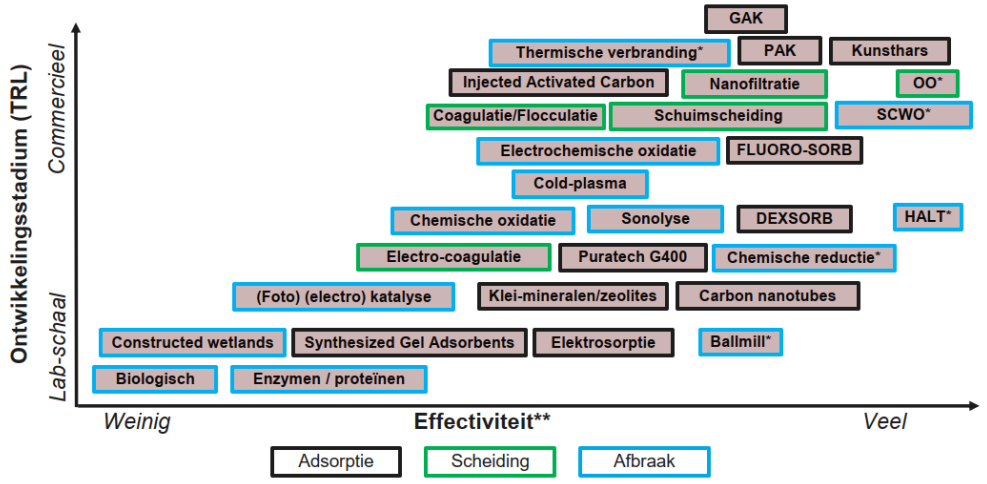



Technieken met TRL7 en hoger zijn technieken die in operationele omstandigheden als pilot getest kunnen worden. Deze technieken kunnen relatief snel opgeschaald worden naar een volwaardige techniek als de pilottesten succesvol zijn. Voor pilots en demonstratieprojecten in het Actieprogramma PFAS is TRL 7 en hoger interessant om te kunnen voldoen aan de wens om de PFAS-concentraties in effluentwater op relatief korte termijn substantieel te verlagen, bijvoorbeeld als gevolg aan (en daarom opgenomen in hoofdstuk 5).

[1] STOWA Richtlijnen haalbaarheidsstudie innovatieprogramma microverontreinigingen uit afvalwater mei 2019.

Afbeelding 4.2 geeft de actuele status aan van hoe effectief een zuiveringstechniek voor verwijdering van PFAS uit water is, en waar de techniek is in de ontwikkeling naar technische volwassenheid.

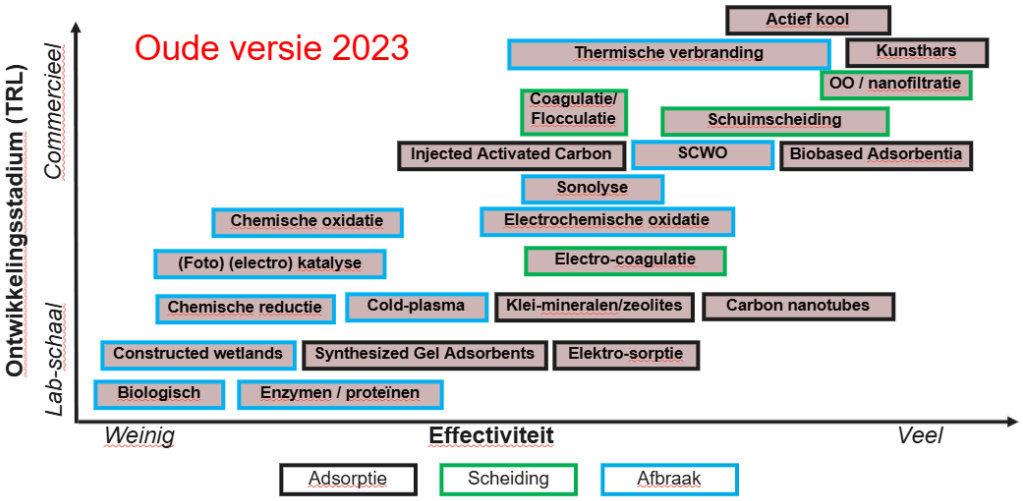
Afbeelding 4.2 Overzicht PFAS-zuiveringstechnieken beoordeeld op TRL en effectiviteit




* Deze technieken zijn geselecteerd als meest geschikt voor korte-keten-PFAS (C4-C7) verwijdering/afbraak
** Effectiviteit is als volgt gedefinieerd:
- Adsorptie- en scheidingstechnieken: In hoeverre worden lange en korte ketens verwijderd
- Afbraaktechnieken: in hoeverre wordt volledige mineralisatie behaald

Afbeelding 4.3 geeft de stand van de PFAS-zuiveringstechnieken weer in 2023. In vergelijking met de nieuwe versie is een duidelijke ontwikkeling zichtbaar: er zijn technieken bijgekomen (DEXSORB, HALT, Puratech G400) en verwijderd (Biobased Adsorbentia). Ook zijn er technieken verschoven in positionering, zoals chemische reductie welke effectief is bevonden voor de verwijdering van korte-keten PFAS.

Afbeelding 4.3 Oude overzicht uit 2023 van PFAS-zuiveringstechnieken beoordeeld op TRL en effectiviteit



## 4.2 Effectiviteit

### Korte-keten-PFAS versus lange-keten-PFAS

De beschikbare technieken voor verwijdering van PFAS zijn over het algemeen efficiënter voor lange-keten-PFAS dan voor korte ketens. Dit heeft te maken met de intrinsieke hogere mobiliteit van de korte ketens en de kortere hydrofobe staart. In de longlist is per techniek aangegeven in welke mate deze geschikt is voor korte keten verwijdering. Bij bulkverwijdering ligt de nadruk doorgaans op het reduceren van de totale PFAS-vracht, waarbij met name langeketen-PFAS effectief uit het water worden verwijderd. Dit is relevant omdat deze stoffen over het algemeen een hoger risicoprofiel hebben en daardoor vaak aan strengere individuele normen zijn gekoppeld. Om echter te kunnen voldoen aan strenge lozingseisen, moet worden gezuiverd tot zeer lage concentraties. Daarbij is ook een effectieve verwijdering van korteketen-PFAS noodzakelijk. Hiervoor worden aanvullende polishing-technieken toegepast.

### Verwijderingsrendement

Per zuiveringstechniek wordt een indicatie gegeven in hoeverre zij PFAS kunnen verwijderen op basis van bestaande literatuur. Deze indicatie kan de vorm aannemen van een verwijderingsrendement per type PFAS, of een beschrijving van hoe effectief de techniek is voor PFAS-verwijdering in het algemeen.

## 4.3 Geschiktheid

### Verschil behandeling van afvalwater en van grondwater

Grondwater en afvalwater hebben een andere matrix en dit kan invloed hebben op de inzetbaarheid van een zuiveringstechniek om PFAS te verwijderen. Voor sommige gevallen wordt er in de literatuur genoemd met welk soort water de zuiveringstechniek getest is, deze is dan opgenomen in het techniekenoverzicht.

### Reststroom

Sommige zuiveringstechnieken genereren een reststroom die achteraf nog behandeld moeten worden. Dit kan invloed hebben op de operationele kosten. In deze studie worden op basis van de literatuur -waar mogelijk- de eigenschappen, hoeveelheid en verwerking van de reststroom aangegeven.

### Kosten CAPEX en OPEX

CAPEX zijn de investeringskosten voor aanschaf, installatie en bouw van de zuiveringstechniek. OPEX zijn de operationele kosten voor onder andere energie, onderhoud en chemicaliën. Beide kostenposten worden in dit rapport kwalitatief per techniek beoordeeld (hoog, gemiddeld, laag). Er zijn technieken die nog in een relatief vroeg stadium staan, waardoor er ook geen informatie beschikbaar is over de kostenindicatie.

### Inzet van technieken combineren

Zuiveringstechnieken combineren is zeer belangrijk. In de voorgaande paragraaf is kort belicht dat er zuiveringstechnieken zijn die een deel van het PFAS-probleem op kunnen lossen. Voor een integrale oplossing moet de ene techniek aangevuld worden met een andere techniek. Zo moet een stroom bijvoorbeeld een voorbehandeling ondergaan voordat de RO (reverse osmosis/omgekeerde osmose) als PFAS-zuiveringstechniek ingezet kan worden. Bij de inzet van RO blijft er vervolgens een reststroom over, waar een destructietechniek van pas kan komen om de PFAS te vernietigen.

Voor de aanpak van een complexe groep stoffen als PFAS moet een oplossing gevonden worden in de vorm van een set aan nageschakelde technieken, wat de behandeling relatief duur maakt.

### Lozingsroute bepalend voor geschiktheid type zuivering

In welke mate PFAS verwijderd dienen te worden is afhankelijk van normering voor het ontvangende milieu. Bij het terugbrengen van water in de bodem bij bodemsaneringen gelden op moment van schrijven minder strenge eisen dan bij lozing op oppervlaktewater. Lozingen op het riool worden gezien als indirecte lozingen op het oppervlaktewater en kennen dezelfde eisen als geldt voor lozing op oppervlaktewater. De verwijdering van PFAS op een afvalwaterzuivering is meestal zeer beperkt omdat de meeste

afvalwaterzuivering niet ingericht zijn voor PFAS-verwijdering. Afhankelijk van de situatie kan bulkverwijdering voldoende zijn of is aanvullende vergaande zuivering (polishing) vereist.

Voor bulkverwijdering en polishing gelden verschillende selectiecriteria. Bij bulkverwijdering ligt de nadruk op het efficiënt wegnemen van de grootste PFAS-massa, waarbij langere-keten PFAS doorgaans goed worden afgevangen. Bij polishing bestaat de resterende vracht echter relatief gezien vooral uit korte-keten PFAS, die kleiner, mobieler en beter wateroplosbaar zijn en zich dus lastiger laten verwijderen. Het rendement voor korte-keten-verwijdering is daarom een bepalend selectiecriterium bij polishing, omdat juist deze fractie vaak beslissend is voor het voldoen aan de norm.

**Achtergrondinformatie**
In de long-list is extra informatie over de zuiveringstechnieken toegevoegd die mogelijk invloed kan hebben op de geschiktheid van de zuiveringstechnieken. Deze 'achtergrondinformatie' bevindt zich in de laatste kolom van bijlage II.

# 5 SELECTIE GESCHIKTE TECHNIEKEN

Op basis van de longlist (bijlage II) en de criteria van Hoofdstuk 4, zijn de meest geschikte technieken geselecteerd voor PFAS-verwijdering uit grondwater en industrieel afvalwater. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen:
- voorzuivering - niet om PFAS te verwijderen, maar om de PFAS-verwijderingstechniek te beschermen en om competitie van andere vervuilingen met PFAS in te verminderen;
- bulkverwijdering - om grote hoeveelheden PFAS uit het water te verwijderen tot lage concentraties;
- polishing - om vanaf lage concentraties ook de korte ketens en laatste PFAS uit het water te verwijderen;
- destructie - om de PFAS te vernietigen.

In tabel 5.1 is een overzicht te zien van de meest kansrijke PFAS-verwijderingstechnieken. Hierin zijn ook de kosten ten opzichte van elkaar geschat. De daadwerkelijke kosten zijn onder andere afhankelijk van de watermatrix, het type PFAS en de schaal waarop de zuivering wordt toegepast. De onderstaande technieken worden in dit hoofdstuk verder toegelicht. Zoals eerder genoemd is er vrijwel altijd een combinatie van zuiveringstechnieken nodig om PFAS effectief te verwijderen.

Tabel 5.1 Shortlist PFAS-verwijderingstechnieken

| Techniek | TRL | CAPEX | OPEX | Reststroom | Toepassingsgebied |
|---|---|---|---|---|---|
| actieve koolfiltratie (GAC/AKF) | TRL 9 | laag | matig; | verzadigd GAC → regeneratie of thermische destructie; spoelwater | grondwater, industrieel afvalwater, drinkwater |
| schuim-scheiding (foam fractionation) | TRL 8–9 | laag–matig | laag | PFAS-houdend schuimconcentraat → destructie | hoge PFAS-concentraties; grondwater, industrieel afvalwater, concentraatstromen |
| nanofiltratie (NF) | TRL 9 | hoog | hoog | concentraat 10–30 % van influent; CIP-spoelwater; membraanafval | grondwater, industrieel afvalwater, proceswaterzuivering |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Polishing** | | | | | |
| actieve kool – GAC (serie-configuratie) | TRL 9 | laag | matig | verzadigd GAC; spoelwater | nabehandeling na bulkverwijdering; strenge normen |
| actieve kool – PAK (poeder) | TRL 9 | laag | matig | slibstroom met PAK → afvoer/verwerking | polishing; inzetbaar in bestaande installaties (DAF, bezinking) |
| Ionenuitwisselingsharsen (IX) | TRL 9 | matig-hoog | hoog | verzadigd hars → thermische destructie; beperkt spoelwater | strenge lozingseisen; na bulk-voorzuivering |
| **Destructie** | | | | | |
| thermische verbranding | TRL 9 | - | hoog | rookgassen → gaswassing vereist | eindverwerking concentraatstromen, verzadigd GAC/hars |
| alternatieve destructie* (SCWO, HALT, elektrochemische oxidatie, chemische reductie, koude plasma) | TRL 6–8 | hoog | hoog | sterk geconcentreerde reststromen vereist | kleine, geconcentreerde stromen; beperkt toepasbaar op grote schaal |

## 5.1 Voorzuivering

Voor het toepassen van PFAS-verwijderingstechnieken is voorzuivering aanbevolen. PFAS-verwijderingstechnieken zijn gevoelig voor de aanwezigheid van onder andere zwevend stof, organisch materiaal, ijzer en mangaan. Deze stoffen kunnen leiden tot vervuiling, competitie voor adsorptieplaatsen of verstopping van installaties. Hierdoor neemt de verwijderingsefficiëntie af en stijgen operationele kosten.

De selectie van een geschikte voorzuivering verschilt per watermatrix. Voor zowel grondwater als industrieel afvalwater staan de aanbevelingen betreffende voorzuivering hieronder beschreven. Na voorzuivering zijn de geselecteerde technieken voor bulkverwijdering en polishing toepasbaar voor behandeling van zowel grondwater als industrieel afvalwater.

### 5.1.1 Voorzuivering grondwater

Bij grondwater is voorzuivering vereist voor verwijdering van zwevend stof, ijzer, mangaan, ammonium en methaan (wanneer aanwezig) om verstopping van filters en membranen te voorkomen. Hiervoor is de toepassing van beluchte zandfiltratie in veel gevallen afdoende. Bij hoge concentraties zwevend stof kan een aanvullende coagulatiestap benodigd zijn waarbij het gevormde slib verwijderd kan worden middels bezinking (lamellen afscheider) of flotatie (Dissolved air flotation, DAF). Wanneer slibformatie beperkt is kan ook gekozen worden om het slib af te vangen met de zandfilters. Wanneer gekozen wordt voor PFAS-verwijdering middels nanofiltratie kan aanvullende voorbehandeling nodig zijn. Afhankelijk van de watermatrix kan pH-correctie nodig zijn om scaling te beperken. Scaling betreft ongewenste mineraalafzetting die membranen en installaties verstopt of beschadigt.

**PFAS-verwijdering bij voorzuivering grondwater**
Bij voorzuivering van PFAS-houdend grondwater is in veel gevallen beluchting nodig voor oxidatie van onder andere ijzer, zodat dit vervolgens verwijderd kan worden. Bij beluchting van water met hoge concentraties PFAS is de kans op schuimvorming groot. Door de beluchting uit te voeren in een gecontroleerde omgeving waar het PFAS-houdende schuim kan worden afgevangen (bijvoorbeeld in een afgesloten DAF met schuimafzuiging) kan direct ook PFAS verwijderd worden. De verwijdering kan verhoogd worden door toevoeging van oppervlakte-actieve stoffen of door dosering van poederkool in de DAF. Beide opties zijn succesvol gedemonstreerd bij de locatie Voltastraat in Doetinchem. Een bijkomend voordeel van de DAF is dat deze multi-inzetbaar is en aanvullend gebruikt kan worden bij coagulatie waarbij het coagulant voorafgaand aan de DAF wordt gedoseerd en verwijdering van slib plaatsvindt in de DAF, gelijktijdig met dosering van poederkool (PAC) of oppervlakte-actieve stoffen. Er loopt een onderzoekstraject voor verdere optimalisatie van deze zuiveringsopzet.

### 5.1.2 Voorzuivering afvalwater

Voor afvalwater is voorzuivering van het effluent vrijwel altijd vereist, met name voor de verwijdering van de organische componenten en zwevende stof om verstoppingen te voorkomen. De benodigde mate van voorzuivering is sterk afhankelijk van de technologie die toegepast wordt. Technologieën die geschikt zijn voor effluent polishing zijn altijd gebaat bij een effectieve voorzuivering, de verwijdering van DOC in voorgaande stappen zorgt ervoor dat er minder competitie met andere componenten plaatsvindt. Hierdoor kan een polishing stap effectiever ingrijpen op de target stof, de PFAS. Wanneer membranen (NF/RO) worden ingezet op effluent is het ook van belang dat de biologische aangroei en het scaling potentieel van het effluent wordt beperkt.

## 5.2 Bulkverwijdering

Voor bulkverwijdering van PFAS zijn actieve koolfiltratie (AKF) met granulair actieve kool (GAC), schuimscheiding (foam fractionation) en nanofiltratie (NF) geselecteerd als meest geschikte technieken.

### 5.2.1 Actieve kool filtratie

**TRL**
Actieve koolfiltratie (AKF) met granulair actieve kool (GAC) is één van de meest toegepaste technieken voor verwijdering van PFAS uit water (TRL 9). Deze techniek is wereldwijd op grote schaal geïmplementeerd voor drinkwaterzuivering, grondwatersanering en industriële afvalwaterbehandeling. Door de relatief eenvoudige installatie en goede opschaalbaarheid is AKF breed inzetbaar voor uiteenlopende toepassingen.

**Verwijderingsefficiëntie**
Lange ketens binden sterker aan GAC dan korte keten PFAS, vanwege hydrofobe interacties tussen het GAC en de ‘staart’ van het PFAS-molecuul. Alhoewel voor zowel korte- als lange-keten-PFAS volledige verwijdering haalbaar is zullen de korte ketens eerder doorslaan in het effluent. Bij strenge zuiveringseisen voor PFAS zal het GAC daardoor snel ververst moeten worden, en de mate van adsorptie aan actieve kool is daardoor voor PFAS lager dan voor andere verontreinigingen De binding van PFAS aan GAC is een evenwichtsreactie. De maximale adsorptiecapaciteit van de actieve kool is daardoor afhankelijk van onder andere de influentconcentraties, de aanwezigheid van concurrerende stoffen en de contacttijd. Dit maakt deze methode geschikt voor bulkverwijdering bij hoge concentraties PFAS.

Deze techniek is echter ook geschikt als polishingtechniek. In de praktijk worden hiervoor vaak meerdere koolfilters in serie geplaatst. De voorliggende filters functioneren daarbij voornamelijk voor bulkverwijdering,

terwijl het laatste filter als polishing-filter wordt ingezet. Door deze configuratie wordt de belasting van het polishing-filter met concurrerende stoffen beperkt waardoor ook korte ketens kunnen worden verwijderd.

**Reststromen**
Na verzadiging van het GAC neemt de PFAS-concentratie in het effluent toe en dient het GAC vervangen of geregenereerd te worden. Veel leveranciers kunnen verzadigd actief kool innemen voor reactivatie, mits het materiaal voldoet aan de gestelde kwaliteitseisen (verschillen per leverancier). Gereactiveerd GAC kan vervolgens opnieuw worden ingezet en heeft doorgaans vergelijkbare adsorptie-eigenschappen als nieuw materiaal. Wanneer regeneratie niet meer mogelijk is, dient het verzadigde GAC afgevoerd te worden voor thermische destructie.

Daarnaast ontstaan spoelwaterstromen doordat de koolfilters periodiek gespoeld moeten worden om verstopping, drukopbouw en kanaalvorming te voorkomen.

**Kosten**
De CAPEX voor AKF is relatief laag doordat de techniek bestaat uit een eenvoudige en robuuste installatie. De OPEX wordt gedomineerd door verbruikskosten voor GAC. Als reactiveren van GAC mogelijk is, kunnen de operationele kosten aanzienlijk worden verlaagd ten opzichte van het afvoeren voor destructie en aanwenden van nieuwe GAC.

**Substitutiemogelijkheden**
Voor bulkverwijdering van PFAS kan GAC eventueel gesubstitueerd worden door opkomende alternatieven als andere adsorbentia zoals FLUORO-SORB (TRL 9) of DEXSORB (TRL 6-7). Deze adsorbens zijn ontwikkeld voor verbeterde binding van PFAS en kunnen vaak worden toegepast in bestaande GAC-installaties.

### 5.2.2 Schuimscheiding

**TRL**
Schuimscheiding (foam fractionation) is een opkomende techniek voor verwijdering van PFAS uit water (TRL 8-9), die al veelvuldig wordt toegepast op grote schaal. De techniek maakt gebruik van de oppervlakte-actieve eigenschappen van PFAS-moleculen, waardoor deze zich ophopen aan het grensvlak tussen lucht en water. Door lucht of ozon (voor verbeterde verwijdering) in het water te injecteren ontstaan schuimbellen waaraan PFAS adsorberen. Het gevormde schuim wordt vervolgens afgescheiden en afgevoerd als concentraatstroom. Schuimscheiding wordt met name toegepast voor behandeling van waterstromen met hoge PFAS-concentraties, waaronder grondwater, industrieel afvalwater en concentraatstromen van andere zuiveringstechnieken.

**Verwijderingsefficiëntie**
Schuimscheiding is met name effectief voor lange keten PFAS met verwijderingsefficiënties >95 %. Deze stoffen adsorberen sterk aan het lucht-water grensvlak en worden daardoor effectief met het schuim afgevoerd. Korte keten PFAS zijn over het algemeen moeilijker te verwijderen doordat deze minder oppervlakte-actief zijn en daardoor minder sterk aan schuimbellen hechten. Voor verbeterde verwijdering van korte ketens kunnen oppervlakte actieve stoffen toegevoegd worden. Hierbij is echter de ecotoxiciteit van deze toegevoegde stoffen een aandachtspunt, waardoor nazuivering vaak vereist is.

De verwijderingsefficiëntie is afhankelijk van verschillende factoren zoals de samenstelling van het PFAS-pakket, de influentconcentratie, geleidbaarheid, aanwezigheid van organische stoffen en de hydraulische belasting van het systeem. Schuimscheiding is vooral geschikt voor bulkverwijdering bij relatief hoge PFAS-concentraties. Voor het behalen van zeer lage effluentconcentraties is vaak een aanvullende polishing-stap nodig.

**Reststromen**
De belangrijkste reststroom bij schuimscheiding is het PFAS-houdende schuimconcentraat. Deze concentraatstroom dient verder behandeld of vernietigd te worden. Afhankelijk van de samenstelling en

concentratie kan dit bijvoorbeeld met thermische destructie of aanvullende concentratie- en destructietechnieken.

**Kosten**
De CAPEX voor schuimscheiding is doorgaans relatief beperkt doordat de installatie compact is en voornamelijk bestaat uit kolommen, pompen en luchtinjectiesystemen. Ook de OPEX is relatief beperkt en wordt voornamelijk bepaald door energieverbruik, chemicaliënverbruik (indien additieven nodig zijn) en kosten voor verwerking van het concentraat.

Doordat PFAS worden geconcentreerd in een kleine reststroom kunnen kosten voor reststroomverwerking aanzienlijk lager uitvallen dan bij technieken waarbij grote volumes adsorbens of concentraat afgevoerd moeten worden. De techniek is daardoor economisch interessant voor bulkverwijdering bij hogere PFAS-concentraties.

### 5.2.3 Nanofiltratie

**TRL**
Nanofiltratie (NF) is een bewezen membraantechnologie voor verwijdering van PFAS uit water (TRL 9). De techniek maakt gebruik van semipermeabele membranen waarmee opgeloste stoffen op basis van molecuulgrootte worden gescheiden van water. Nanofiltratie wordt wereldwijd toegepast voor drinkwaterproductie, proceswaterzuivering en behandeling van industrieel afvalwater.

**Verwijderingsefficiëntie**
Nanofiltratie is effectief voor verwijdering van lange-keten-PFAS waarbij verwijdering tot 99 % mogelijk is. Voor korte ketens is NF minder effectief. De efficiëntie voor korte ketens is daarbij sterk afhankelijk van het specifieke membraantype, bedrijfsdruk en watersamenstelling. Dit maakt deze techniek voornamelijk geschikt voor bulkverwijdering. In tegenstelling tot adsorptietechnieken vindt geen verzadiging van het membraan plaats door PFAS-opslag, waardoor de verwijdering relatief stabiel blijft zolang het membraan intact is. Wel kunnen vervuiling (fouling) en scaling optreden door organische stof, ijzer, kalk of andere componenten in het influent. Vergaande voorbehandeling van het influent is daarom vaak noodzakelijk.

**Reststromen**
Bij toepassing van NF wordt PFAS afgevangen in een concentraatstroom (reject). De mate van concentraatvorming is afhankelijk van de watermatrix maar ligt meestal rond 10-30 % van het behandelde water. De concentraatstroom dient verder behandeld of afgevoerd te worden, dit kan oplopen tot zeer grote volumes. Afhankelijk van de toepassing kan aanvullende behandeling plaatsvinden met destructietechnieken of verdere concentratie.

Naast het concentraat ontstaan reststromen door periodieke chemische reiniging van de membranen (Cleaning In Place, CIP). Hierbij komen spoel- en reinigingsvloeistoffen vrij die verontreinigingen bevatten afkomstig van membraanvervuiling. Membranen hebben daarnaast een beperkte levensduur en dienen periodiek vervangen te worden.

**Kosten**
De CAPEX voor nanofiltratie is relatief hoog vanwege benodigde membraaninstallaties en hogedrukpompen. De OPEX wordt voornamelijk bepaald door energieverbruik, membraanvervanging, chemicaliënverbruik voor reiniging en verwerking van het concentraat.

## 5.3 Polishing

Voor polishing van PFAS zijn actieve kool en Ionenuitwissellingsharsen (IX) geselecteerd als meest geschikte technieken.

### 5.3.1 Actieve kool

Actieve kool kan in verschillende vormen worden toegepast. De meest gebruikte variant is granulair actief kool (GAC), dat veelvuldig wordt ingezet als polishing-techniek. Naast GAC kan ook poeder actief kool (PAK) worden toegepast. Ten opzichte van GAC is PAK beter geschikt voor de verwijdering van korte-keten-PFAS, waardoor deze techniek eveneens toepasbaar is als polishingstap. Bij toepassing wordt PAK gedoseerd aan PFAS-houdend water, waarna PFAS zich bindt aan het PAK en vervolgens wordt afgevoerd via een slibstroom. Om dit mogelijk te maken, dient het PAK na dosering en voldoende contacttijd uit het water te worden verwijderd door middel van filtratie, flotatie of bezinking, eventueel binnen een bestaande installatie.

### 5.3.2 Ionenwissellingsharsen

**TRL**

Ionenuitwisselingsharsen (IX) zijn een bewezen techniek voor vergaande verwijdering van PFAS uit waterstromen (TRL 9). De techniek wordt veel toegepast als polishingstap voor het behalen van zeer lage PFAS-concentraties in effluent, bijvoorbeeld na voorzuivering met actieve kool, foam fractionation of membraanfiltratie. Door de hoge selectiviteit en adsorptiecapaciteit van PFAS-selectieve harsen is IX met name geschikt voor toepassingen waarbij strenge normen gehaald moeten worden.

**Verwijderingsefficiënties**

PFAS-selectieve harsen hebben over het algemeen een hogere affiniteit voor PFAS dan conventionele actieve kool, waardoor ook korte keten PFAS effectiever verwijderd kunnen worden. Hierdoor is ionenwisseling geschikt als polishing-techniek voor het bereiken van zeer lage restconcentraties, waarbij volledige verwijdering van zowel lange als korte ketens technisch haalbaar is.

De verwijderingsefficiëntie is afhankelijk van factoren zoals de harsselectiviteit, contacttijd, watersamenstelling en aanwezigheid van concurrerende opgeloste stoffen zoals sulfaat, nitraat en organische componenten. In vergelijking met bulkverwijderingstechnieken zijn IX-systemen gevoeliger voor vervuiling en competitie door andere componenten in het influent. Om die reden wordt ionenwisseling doorgaans toegepast na een voorbehandelingsstap waarbij zwevende stof, organische belasting en een groot deel van de PFAS-vracht reeds verwijderd zijn.

Door de hoge adsorptiecapaciteit en sterke binding van PFAS aan gespecialiseerde harsen kunnen lange standtijden worden gerealiseerd bij lage influentconcentraties.

**Reststromen**

Na verzadiging van het hars neemt de PFAS-concentratie in het effluent toe en dient het hars vervangen of geregenereerd te worden. Afhankelijk van het type hars en leverancier kan regeneratie mogelijk zijn, al worden PFAS-selectieve harsen in de praktijk vaak als eenmalige toepassing ingezet vanwege de sterke binding van PFAS aan het hars.

Verzadigd hars dient afgevoerd te worden voor verdere verwerking of thermische destructie. Daarnaast ontstaan beperkte spoelwaterstromen bij periodieke reiniging. In vergelijking met technieken zoals actieve koolfiltratie ontstaan doorgaans relatief kleine volumes vaste reststoffen doordat ionenwisselaars hoge adsorptiecapaciteiten kunnen behalen.

**Kosten**

De CAPEX voor IX is gemiddeld tot relatief hoog, afhankelijk van de benodigde harsvolumes en configuratie van de installatie. De OPEX wordt voornamelijk bepaald door de kosten van het harsmateriaal, frequentie van vervanging en verwerking van verzadigd hars.

PFAS-selectieve harsen zijn doorgaans duurder dan GAC, maar kunnen in sommige gevallen door hogere selectiviteit en langere standtijd economisch aantrekkelijk zijn voor polishing-toepassingen met lage influentconcentraties en strenge effluenteisen.

## 5.4 Destructie

Bij bulkverwijdering en polishing wordt PFAS uit het water verwijderd, maar vindt nog geen directe destructie plaats. De vrijkomende reststromen worden daarom doorgaans afgevoerd voor thermische destructie. Voor kool is thermische reactivatie ook mogelijk wanneer de belading van het kool - de hoeveelheid PFAS die zich op de actief kool heeft gehecht - laag genoeg is om dit toe te staan (POP-verordening). Tegelijkertijd zijn verschillende alternatieve destructietechnieken in ontwikkeling. De meest veelbelovende technieken zijn superkritische wateroxidatie (SCWO), hydrothermisch alkalische behandeling (HALT), elektrochemische oxidatie, chemische reductie en koude plasma (zie longlist in bijlage II). Deze technieken zijn momenteel echter uitsluitend geschikt voor kleine, sterk geconcentreerde stromen. In veel gevallen moeten concentraatstromen eerst verder worden behandeld voordat toepassing van deze technieken mogelijk is. Voor de behandeling van grondwater of industrieel afvalwater is dit vooralsnog vaak onvoldoende ontwikkeld of economisch niet rendabel, waardoor thermische verbranding voorlopig de meest gangbare verwerkingsroute blijft.

# 6 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Deze notitie geeft een actueel, praktisch overzicht van bewezen en kansrijke zuiveringstechnieken om PFAS uit afvalwater en grondwater te verwijderen, met onderscheid tussen bulkverwijdering, polishing en destructie. De meest haalbare route is doorgaans een combinatie van nageschakelde technieken, omdat de effectiviteit per PFAS-type (lange vs. korte ketens) en per watermatrix verschilt en strenge lozingseisen vaak slechts met aanvullende polishing worden gehaald.

Op basis van technische volwassenheid (TRL), effectiviteit en haalbaarheid zijn GAC/korrelactieve kool, ionenwisseling, (nano)filtratie (NF/RO) en schuimscheiding als marktrijp te beschouwen, met perspectief op snelle opschaling voor onder andere organische adsorbentia, SCWO, elektrochemische oxidatie, koude plasma en HALT.

De belangrijkste belemmeringen voor implementatie liggen niet in de techniek zelf, maar in de hoge kosten, onzekerheid over wet- en regelgeving en gebrek aan geborgde afzet-/verwerkingsroutes voor PFAS-reststromen. Het advies is daarom om te starten met pilots (vóór opschaling), zodat technische prestaties en ketenaanpak (inclusief voorbehandeling en reststroomverwerking) onder praktijkcondities kunnen worden gevalideerd en versneld lerend kunnen worden uitgerold.

De hoge kosten per kg verwijderde stof benadrukken juist het belang van bronaanpak: op locaties met hogere PFAS-concentraties, zoals nabij directe emissiebronnen, is de kosteneffectiviteit van verwijdering aanzienlijk gunstiger, omdat per kg verwijderde stof minder water hoeft te worden behandeld.

## 6.1 Aanbevelingen

Uit deze studie blijkt dat diverse technieken beschikbaar zijn om PFAS uit water te verwijderen. Dit biedt kansen voor zowel afval- als grondwaterzuivering. Het is lastig om te spreken van écht laaghangend fruit: er zijn een aantal technieken marktrijp, maar er is nog geen standaardoplossing die altijd goed werkt. Het blijft noodzakelijk om kritisch te kijken naar de zuiveringsopgave en de watersamenstelling, om op basis daarvan de meeste geschikte techniek of combinatie van technieken te selecteren.

Technieken die als marktrijp beschouwd kunnen worden zijn:
- korrelkool (GAC/granulair actiefkool);
- Ionenwisseling;
- membraanfiltratie middels omgekeerde osmose of nanofiltratie;
- schuimscheiding met of zonder ozon.

De ontwikkelingen gaan momenteel erg snel, dus ook de TRL's zullen de komende tijd (komende 1-2 jaar) snel kunnen ontwikkelen. Met name de technieken die nu op TRL 5-7 staan kunnen snel doorgroeien en daarmee binnen een aantal jaar marktrijp zijn.

De aanbeveling is dan ook om de volgende technieken goed in de gaten te houden:
- organische adsorbentia;
- superkritische water oxidatie (SCWO);
- elektrochemische oxidatie;
- koude plasma;
- hydrothermisch alkalische behandeling (HALT).

Wanneer er interesse is om pilotstudies uit te voeren, geven de technieken uit bijlage II voldoende houvast om daaruit keuzes te maken. Onze aanbeveling is ook om hierin samen te werken met overige belanghebbenden bij het Actieprogramma PFAS en daadwerkelijk te gaan testen om zo (gezamenlijk) lerend te implementeren.

# 7 REFERENTIELIJST


| Korte referentie | Referentie |
|---|---|
| Ahmed et al., 2020 | Ahmed, M.B., Alam, M.M., Zhou, J.L., Xu, B., Johir, M.A.H., Karmakar, A.K., Rahman, M.S., Hossen, J., Hasan, A.T.M.K, Moni, M.A. (2020). Advanced treatment technologies efficacies and mechanism of per- and poly-fluoroalkyl substances removal from water. Process Safety and Environmental Protection. DOI: 10.1016/j.psep.2020.01.005 |
| Berg et al., 2021 | Berg, C., Crone, B., Gullett, B., … & Whitehill, A. (2021). Developing innovative treatment technologies for PFAS-containing wastes. Journal of the Air & Waste Management Association. DOI: 10.1080/10962247.2021.2000903 |
| Boyer et al., 2021a | Boyer, T.H., Fang, Y., Ellis, A., Dietz, R., Choi, Y.J., Schaefer, C. E., Higgins, C.P., Strathmann, T.J. (2021). Anion exchange resin removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from impacted water: A critical review. Water Research. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117244 |
| Boyer et al., 2021b | Boyer, T.H., Ellis, A., Fang, Y., Schaefer, C.E., Higgins, C.P., & Strathmann, T.J. (2021). Life cycle environmental impacts of regeneration options for anion exchange resin remediation of PFAS impacted water. Water Research, 207, 117798. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117798 |
| Cornelsen et al., 2021 | Cornelsen, M., Weber, R., Panglisch, S. (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. DOI: 10.1016/j.emcon.2021.02.001 |
| Dixit et al., 2021 | Dixit, F., Dutta, R., Barbeau, B., Berube, P., Mohseni, M. (2021). PFAS removal by ion exchange resins: A review. Chemosphere. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129777 |
| Gagliano et al., 2021 | Gagliano, E., Sgroi, M., Falciglia, P.P., Vagliasindi, F.G.A., Roccaro, P. (2020). Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: Role of PFAS chainlength, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration. Water Research. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115381. |
| Garg et al., 2021 | Garg, S., Wang, J., Kumar, P., Mishra, V., Arafat, H., Sharma, R.S., Dumée, L.F. (2021). Remediation of water from per-/poly-fluoroalkyl substances (PFAS) – Challenges and perspectives. Journal of Environmental Management. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105784 |
| Iery, 2019 | 'Iery, R. (2019). Treatment technologies for PFAS site management. NAVFAC. Geraadpleegd op 24/05/2022. |

| Korte referentie | Referentie |
|---|---|
| ITRC, 2020 | https://clu-in.org/conf/tio/FRTRPresents5_062019/slides/2Slide_Presentation_for_Ramona_Iery,_Ph.D.,_Naval_Facilities_Engineering_and_Expeditionary_Warfare_Center.pdf' |
| Kucharzyk et al., 2017 | ITRC (2020). PFAS Technical and Regulartory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, PFAS Team. https://pfas-1.itrcweb.org/ |
| Lenka et al., 2021 | Kucharzyk, K.H., Darlington, R., Benotti, M., Deeb, R., Hawley, E. (2017). Novel treatment technologies for PFAS compounds: A critical review. Journal of Environmental Management. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.08.016 |
| Leonello et al., 2021 | Lenka, S.P., Kah, M., Padhye, L.P. (2021). A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants. Water Research. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117187 |
| Li et al., 2020 | Leonello, D., Fendrich, M.A., Parrino, F., Patel, N., Orlandi, M., Miotello, A. (2021). Light-induced advanced oxidation processes as PFAS remediation methods: A review. Applied Sciences. DOI: .10.3390/app11188458 |
| Liang et al., 2022 | Li, F., Duan, J., Tian, S., Ji, H., Zhu, Y., Wei, Z., & Zhao, D. (2020). Short-chain per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic systems: Occurrence, impacts and treatment. Chemical Engineering Journal, 380, 122506. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122506 |
| Liu et al., 2022 | 'Liang, S., Mora, R. Huang, Q., Casson, R., Wang, Y., Woodard, S;, & Anderson, H. (2022). Field demonstration of coupling ion-exchange resin with electrochemical |
| Lu et al., 2020 | oxidation for enhanced treatment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater. Chemical Engineering Journal Advances, 9, 100216. DOI: 10.1016/j.ceja.2021.100216' |
| McDonough et al., 2022 | Liu, Y., Li, T., Bao, J., Hu, X.,Zhao, X., Shao, L., Li, C., Lu, M. (2022). A review of treatment techniques for short-chain perfluoroalkyl substances. Applied Sciences. DOI: 10.3390/app12041941 |
| Meegoda et al., 2020 | Lu, D. Sha, S., Luo, J., Huang, Z., & Jackie, X.Z. (2020). Treatment train approaches for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. Journal of Hazardous Materials, 386, 121963. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121963 |
| Militao et al., 2021 | 'McDonough, J.T., Kirby, J., Bellona, C., Quinnan, J.A., Welty, N., Follin, J. & Liberty, K. (2022). Validation of supercritical water oxidation to destroy |
| Nienhauser et al., 2022 | perfluoroalkyl acids. Remediation, 32, 75-90. DOI: 10.1002/rem.21711' |
| Nzeribe et al., 2019 | 'Meegoda, J.N., Kewalramani, J.A., Li, B., & Marsh, R.W. (2020). A Review of the Applications, Environmental Release, and Remediation Technologies of Per- and |
| OECD, 2021 | Polyfluoroalkyl Substances. Environmental Reserach and Public Health, 17, 8117. DOI: 10.3390/ijerph17218117' |
| OVAM, 2021 | Militao, I.M., Roddick, F.A., Bergamasco, R., & Fan., L. (2021). Journal of Environmental Chemical Engineering, 9, 105271. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105271 |
| Palma et al., 2022 | 'Nienhauser, A.B., Ersan, M.S., Lin, Z., Perreault, F., Westerhoff, P., & Garcia-Segura, S. (2022). Boron-doped diamond electrodes degrade short- and long-chain per- and |
| Phong et al., 2020 | polyfluorinated alkyl substances in real industrial wastewaters. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10, 107192. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107192' |
| Pinkard et al., 2021 | Nzeribe, N., Crimi, M., Thagard, S.M., Holsen, T.M. (2019). Physico-chemical processes for the treatment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review blossom. Critical Reviews in Environmental Science andTechnology. DOI: 10.1080/10643389.2018.1542916 |
| Zhanyun Wang et al., 2021 | OECD (2021), Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances |
| Ross et al., 2018 | Recommendations and Practical Guidance, OECD Series on Risk Management, No. 61, OECD |
| Sahu et al., 2018 | Publishing, Paris. |
| Santiago et al., 2022 | OVAM (2021). Grondreiniging PFAS: Beknopte literatuurstudie en marktbevraging grondreiniging. Rapport OVAM. Geraadpleegd op 24/05/2022. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1642156808/OVAM_-_Grondreiniging_PFAS_ufuxbo.pdf |

| Korte referentie | Referentie |
|---|---|
| Sherma et al., 2022 | Palma, D., Richard, C., Minella, M. (2022). State of the art and perspectives about non-thermal plasma applications for the removal of PFAS in water. Chemical Engineering Journal Advances. DOI: 10.1016/j.ceja.2022.100253 |
| Tian et al., 2021 | Vp, H.N.P., Ngo, H.H., Guo, W., … & Nguyen, T.A.H. (2020). Poly-and perfluoroalkyl substances in water and wastewater: A comprehensive review from sources to remediation. Journal of Water Process Engineering, 36, 101393. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101393 |
| Van den Bergh et al., 2021 (PhD thesis) | 'Pinkard, R. B., Shetty, S., Stritzinger, D., Bellona, C. & Novosselov, I.V. (2021). Destruction of perfluorooctanesulfonate (PFOS) in a batch supercritical |
| Verma et al., 2021 | water oxidation reactor. Chemospere, 279, 130834. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130834' |
| Vu & Wu, 2020 | Roest, K, ter Laak, T.L., Huiting, H., Siegersn W., Meekel, N., de Jong, C., de Jong, M., van Houten, M., Pancras, T, & Plaisier, W. (2021). Performance of water |
| Wanninayake 2021 | treatment systems for PFAS removal. Concawe, report no. 5/21 |
| Xu et al., 2017 | Ross, I., McDonough, F., Miles, J., Storch, P., Kochunarayanan, P.T., Kalve, E., Hurst, J., Dasgupta, S.S., & Burdick, J. (2018). A review of emerging technologies for remediation of PFASs. Remediation, 28, 101-126. DOI: 10.1002/rem.21553 |
| Ahmed et al., 2020 | Sahu, S.P., Qanbarzadeh, M., Ateia, M., Torkzadeh, H., Maroli, A.S., Cates, E.L. (2018). Rapid Degradation and Mineralization of Perfluorooctanoic Acid by a New Petitjeanite Bi3O(OH)(PO4)2 Microparticle Ultraviolet Photocatalyst. Environmental Science & Technology Letters. DOI: 10.1021/acs.estlett.8b00395 |

# BIJLAGE: ADDITIONELE ACHTERGRONDINFORMATIE OVER PFAS

PFAS is een groep gefabriceerde chemicaliën die sinds de jaren 40 in industriële processen en in consumentenproducten worden gebruikt vanwege hun nuttige eigenschappen. Er zijn duizenden verschillende individuele stoffen die tot de stofgroep PFAS horen. Enkele stoffen zijn op grotere schaal gebruikt, zoals PFOA (perfluoroctaanzuur) voor de productie van PFTE (onder andere gebruikt in antiaanbakpannen) en PFOS (perfluoroctaansulfonaat) dat is toegepast in brandblusschuim. Andere stoffen zijn weer op veel beperkte schaal gebruikt. Ook zijn sommige stoffen veel intensiever wetenschappelijk onderzocht dan de andere stoffen.

### Toepassingen

PFAS hebben een gemeenschappelijk kenmerk: veel stoffen breken heel langzaam af, ze kunnen zich gemakkelijk verspreiden en in de loop van de tijd kunnen hopen deze stoffen zich op bij mensen, dieren en in het milieu. Bewezen is dat PFAS aanwezig is in ons water, bodem, lucht en voedsel, evenals in materialen die in onze huizen of werkplekken worden aangetroffen.  Een overzicht van consumentenproducten met PFAS is weergegeven in onderstaand kader.

### PFAS in consumentenproducten




Gebruiksgoederen zoals elektronica, (outdoor) textiel, schoenen en pannen. Voedselverpakkingen zoals vetbestendig papier, fastfood verpakkingen, magnetronpopcornzakken, pizzadozen en snoepwikkels. Brandblusschuim - in waterige filmvormende schuimen (of AFFF's) die worden gebruikt om brandbare branden op vloeibare basis te blussen. Dergelijke schuimen worden gebruikt bij trainings- en noodhulpevenementen op luchthavens, scheepswerven, militaire bases, trainingsfaciliteiten voor brandbestrijding, chemische fabrieken en raffinaderijen. Persoonlijke verzorgingsproducten – bijvoorbeeld in bepaalde shampoo, tandzijde en cosmetica. Huishoudelijke producten zoals sprays om vlekken of water afstotend te maken op tapijten, stoffering, kleding, schoonmaakmiddelen, verven en afdichtingsmiddelen.

[PFAS in products and waste streams in the Netherlands (overheid.nl)]

### Gezondheidseffecten van PFAS

Door het wijdverspreide gebruik van PFAS kunnen mensen op verschillende manieren worden blootgesteld aan deze stoffen. De meeste bekende blootstellingen zijn relatief laag, maar sommige kunnen hoog zijn, vooral wanneer mensen gedurende lange perioden worden blootgesteld aan een geconcentreerde bron. Sommige PFAS-chemicaliën kunnen zich na verloop van tijd in het lichaam ophopen.

Wetenschappelijke studies hebben aangetoond dat blootstelling aan bepaalde niveaus van sommige PFAS kan leiden tot:

- reproductieve effecten zoals verminderde vruchtbaarheid of verhoogde hoge bloeddruk bij zwangere vrouwen;
- ontwikkelingseffecten of vertragingen bij kinderen, waaronder een laag geboortegewicht, versnelde puberteit, botvariaties of gedragsveranderingen;
- verhoogd risico op sommige kankers, waaronder prostaat-, nier- en teelbalkanker;
- verminderd vermogen van het immuunsysteem van het lichaam om infecties te bestrijden, waaronder een verminderde vaccinrespons;
- interferentie met de natuurlijke hormonen van het lichaam;
- verhoogd cholesterolgehalte en/of risico op obesitas.

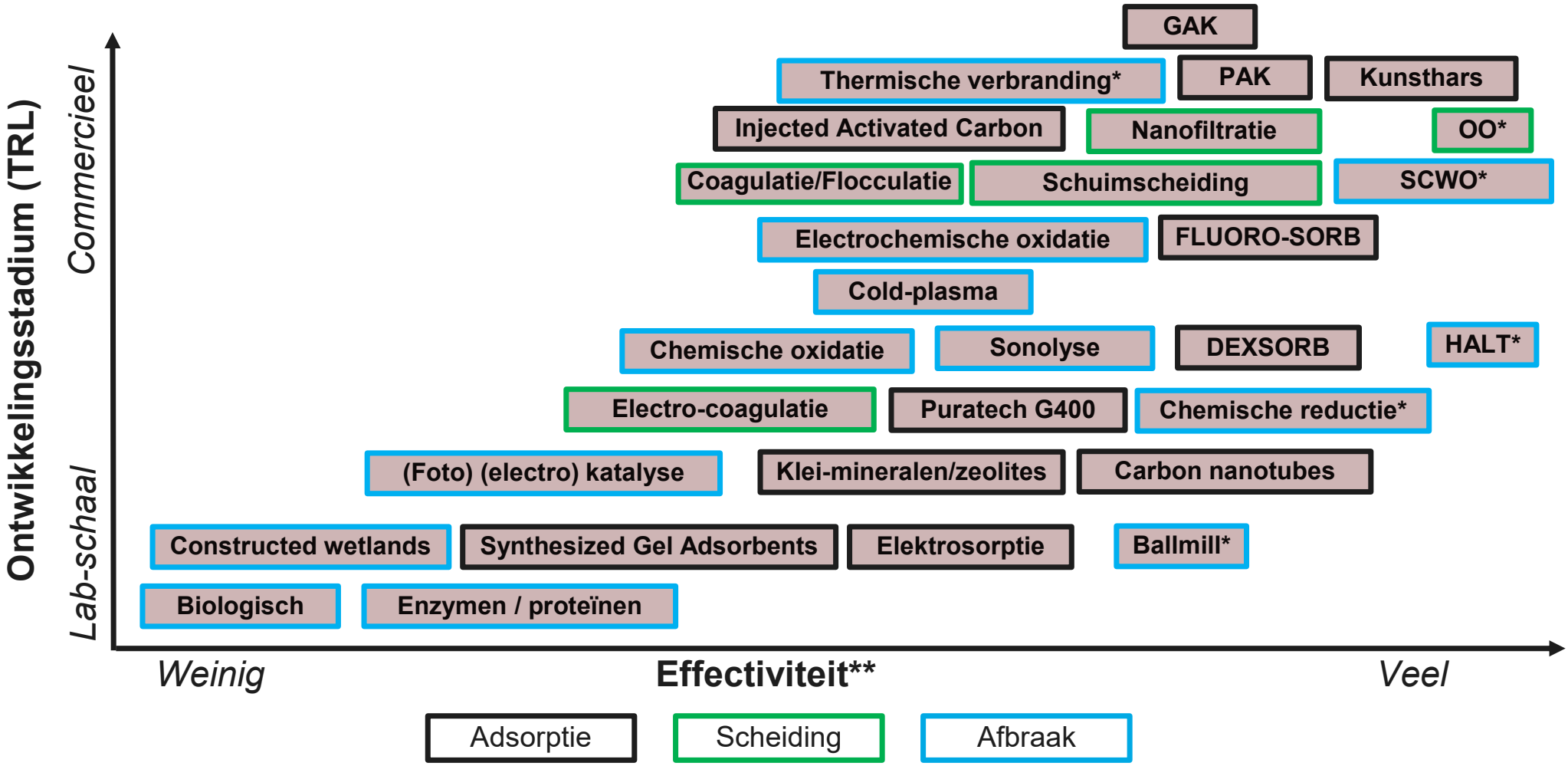
Opgemerkt wordt dat het zeer moeilijk is om (bijkomende) gezondheidseffecten te relateren aan specifieke stoffen. Ondanks dat hier wereldwijd veel onderzoek naar wordt gedaan, weten we nog altijd weinig van de gezondheidseffecten die direct geassocieerd worden met blootstelling aan PFAS. Dit is moeilijk te specificeren, doordat er duizenden PFAS-stoffen zijn met potentieel verschillende effecten en toxiciteitsniveaus. De meeste studies richten zich echter op een beperkt aantal bekendere PFAS-verbindingen.

Daarnaast kunnen mensen op verschillende manieren en in verschillende levensfasen worden blootgesteld aan PFAS. De soorten en toepassingen van PFAS veranderen in de loop van de tijd, waardoor het een uitdaging is om te volgen en te beoordelen hoe blootstelling aan deze chemicaliën plaatsvindt en hoe ze de menselijke gezondheid zullen beïnvloeden. Tot slot zijn er verschillen tussen volwassenen en kinderen en tussen mannen en vrouwen. Wetenschappers blijven onderzoek doen op dit gebied.

[EPA - PFAS Explained | US EPA]
[ITRC - PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances (itrcweb.org)]

# II

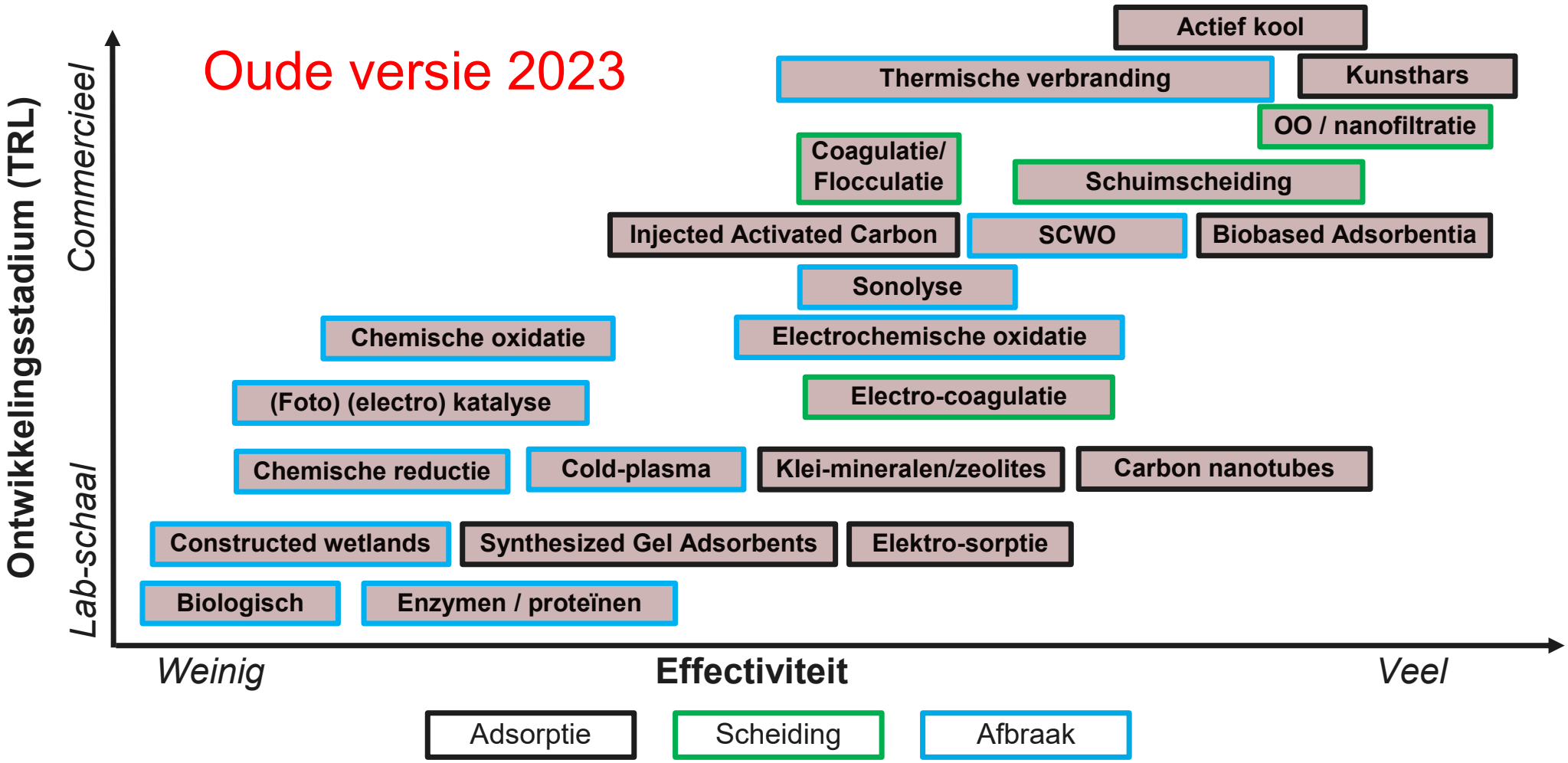
## BIJLAGE: TABEL MET WATERZUIVERINGSTECHNIEKEN VOOR VERWIJDERING PFAS




* Deze technieken zijn geselecteerd als meest geschikt voor korte-keten-PFAS (C4-C7) verwijdering/afbraak

** Effectiviteit is als volgt gedefinieerd:

- Adsorptie- en scheidingstechnieken: In hoeverre worden lange en korte ketens verwijderd
- Afbraaktechnieken: in hoeverre wordt volledige mineralisatie behaald


Oude versie 2023
Ontwikkelingsstadium (TRL)
Commercieel
Lab-schaal
Actief kool
Thermische verbranding
Kunsthars
OO / nanofiltratie
Coagulatie/
Flocculatie
Schuimscheiding
Injected Activated Carbon
SCWO
Biobased Adsorbentia
Sonolyse
Chemische oxidatie
Electrochemische oxidatie
(Foto) (electro) katalyse
Electro-coagulatie
Chemische reductie
Cold-plasma
Klei-mineralen/zeolites
Carbon nanotubes
Constructed wetlands
Synthesized Gel Adsorbents
Elektro-sorptie
Biologisch
Enzymen / proteïnen
Weinig
Effectiviteit
Veel
Adsorptie
Scheiding
Afbraak