

Verdere verwijdering en afbraak van PFAS in de drinkwaterproductie: geen simpele opgave

Roberta Hofman-Caris, Martijn van Veggel, Bas Wols (KWR Water Research Institute), Harrie Timmer (Vewin)

Er wordt heel hard aan gewerkt om technieken te ontwikkelen die PFAS uit het water kunnen verwijderen of ze zelfs stuk kunnen maken. Grootschalige implementatie van deze technieken blijkt in de praktijk echter nog niet zo eenvoudig te zijn. Alle tot nu toe bekende technieken (verwijdering/concentratie en afbraak) blijken op grote schaal problemen op te leveren, die toepassing in de weg staan.

Regelmatig verschijnen er berichten over PFAS in het milieu en nieuwe oplossingen voor dit probleem. Onlangs publiceerde Greenpeace een kaartje met de PFAS-concentraties in Nederlands drinkwater [1]. In gebieden waar oppervlaktewater als bron wordt gebruikt en in kustgebieden waar PFAS uit zee neerslaan, zijn de PFAS-concentraties hoger.

PFAS is een door de mens gemaakte groep verbindingen, die niet thuishoort in het milieu, noch in voedsel, drinkwater en in de mens, maar helaas overal ter wereld te vinden zijn. Ze zijn extreem stabiel en vaak erg mobiel, en verspreiden zich dus gemakkelijk, zonder dat ze afgebroken worden. In 85 procent van de ondiepe grondwaterlagen (op 10 m diepte) is al PFAS aangetroffen [2]. In het diepere grondwater zijn de concentraties op dit moment vaak nog laag of zelfs niet of nauwelijks meetbaar, maar het is een kwestie van tijd totdat de mobiele moleculen ook daar zullen opduiken.

Het RIVM heeft aangetoond dat de meeste Nederlanders te veel PFAS in hun bloed hebben [3]. Ze krijgen het binnen via voedsel, drinkwater, lucht en via de huid. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat drinkwater voor ongeveer 20 procent aan de inname mag bijdragen. De norm voor PFAS is 100 ng/L voor de som van 20 PFAS.

Het belangrijkste is uiteraard dat de productie en het gebruik van dergelijke stoffen worden gestopt, want het wordt ook steeds duidelijker dat ze nadelig voor de gezondheid kunnen zijn. Omdat er inmiddels overal diverse PFAS worden aangetroffen, worden er nu ook maatregelen genomen om ze uit voedsel en drinkwater te verwijderen. Drinkwaterbedrijven verlagen het PFAS-gehalte zo ver mogelijk, maar 100 procent verwijdering lukt tot nu toe niet. Toch halen allerlei nieuwe technieken regelmatig het nieuws die dit probleem zouden kunnen oplossen. Het is logisch dat bezorgde mensen zich afvragen waarom ze dan niet 'gewoon alle PFAS' uit het water verwijderen. In dit artikel laten we op basis van bestaande literatuur en onderzoek zien dat dit in de praktijk erg ingewikkeld is.

Het probleem

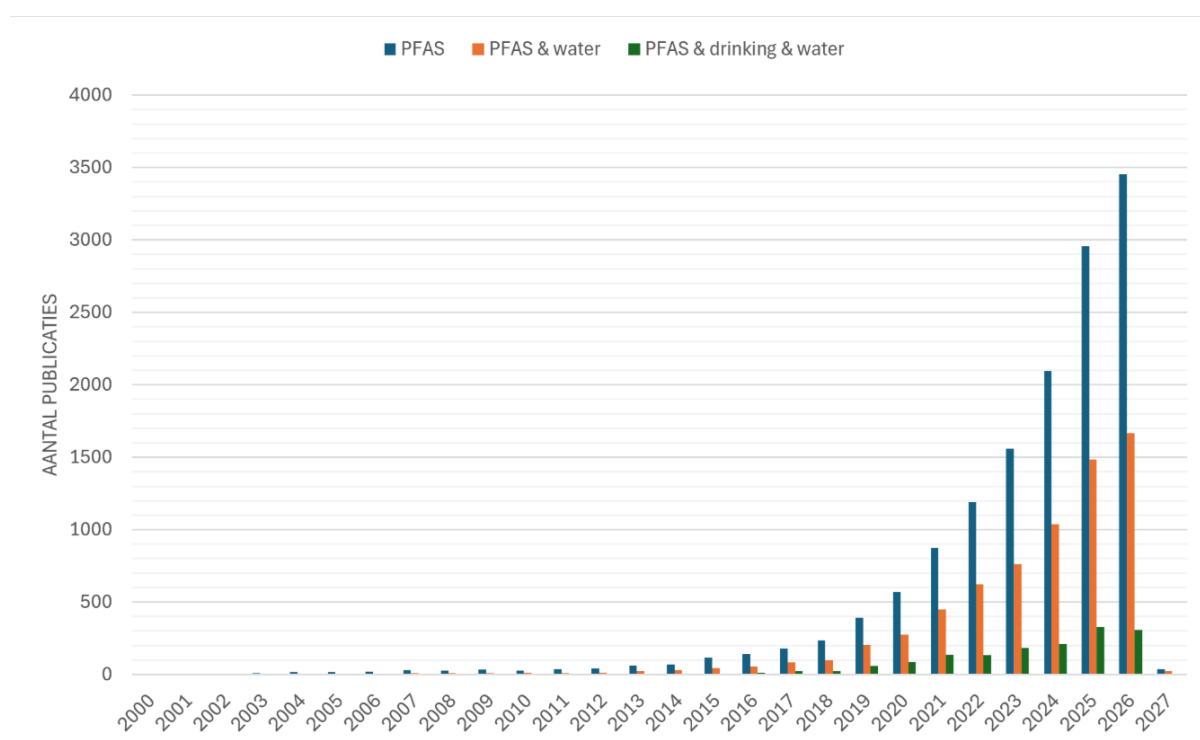
Per- en polyfluoralkylstoffen, afgekort PFAS, vormen een groep van ruim 7 miljoen verschillende stoffen [4], die allemaal door mensen zijn ontworpen en geproduceerd. Ze lijken op koolwaterstoffen, alleen zijn alle waterstofatomen vervangen door fluoratomen. De koolstof-fluorverbinding is een van de sterkste moleculaire verbindingen die we kennen.

Daarom zijn deze stoffen ook zo resistent in het milieu: er zijn nauwelijks bacteriën te vinden die ze kunnen afbreken, en als ze het kunnen is het een tergend traag proces.

De geadviseerde gezondheidkundige richtwaarde van het RIVM is erg laag. Die wordt uitgedrukt in nanogram PEQ/L, waarbij PEQ staat voor 'PFOA-equivalenten'. Hierbij wordt de concentratie van een PFAS gecorrigeerd voor zijn toxiciteit ten opzichte van het bekende perfluorooctaanzuur (PFOA). Die richtwaarde is 4,4 ng/L, de concentratie van, ter vergelijking, één paracetamolletje dat wordt opgelost in 45 olympische zwembaden aan water. Om zulke lage concentraties stoffen uit water te verwijderen zijn heel intensieve processen nodig. Het succes hangt sterk af van de bron, de hoeveelheid en de typen PFAS, en hoe goed die met verschillende technieken te verwijderen zijn.

Onderzoek naar PFAS-verwijdering

Sinds bekend werd dat PFAS schadelijker zijn dan eerst werd aangenomen [5], [6] en wereldwijd verspreid zijn, wordt er veel onderzoek gedaan naar technieken om PFAS uit water te verwijderen. Het aantal wetenschappelijke publicaties hierover neemt exponentieel toe (afbeelding 1).



Afbeelding 1. Aantal publicaties in Scopus met de trefwoorden 'PFAS' en '(drinking) water' (d.d. 16 okt. 2026)

Verwijdering van PFAS uit water

Over het algemeen zijn waterbehandelingstechnieken voor PFAS te verdelen in 'verwijdering en opconcentreren' (via adsorptie op een vaste stof, schuimfractionering of membraanfiltratie) en 'chemische afbraak'. Bij grondwaterzuivering vindt meestal eerst beluchting plaats, waarbij ijzer en mangaan geoxideerd worden en als oxiden neerslaan. Bij dit proces worden ook andere deeltjes ingevangen en met de neerslag verwijderd. Bij

oppervlaktewater wordt een vergelijkbaar proces op gang gebracht door bijvoorbeeld ijzer- of aluminiumzouten te doseren. Voor de verwijdering van PFAS blijken deze conventionele processen echter niet geschikt.

Adsorptieprocessen

Adsorptie op actieve kool wordt bij veel drinkwaterbedrijven al standaard toegepast. Actieve kool heeft een enorm oppervlak van 500 – 2000 m²/g van micro- en mesoporiën en is in staat heel veel ongewenste (organische) verbindingen, waaronder de schadelijkste PFAS, te adsorberen. Helaas blijken kleine PFAS als trifluorazijnzuur (TFA) ongehinderd de filters te passeren en als ze wel worden geadsorbeerd, worden ze al snel verdrongen door grotere PFAS-moleculen. Maar ook die grotere slaan vier tot tien keer sneller door de filters dan ‘gewone’ organische microverontreinigingen als medicijnresten. Langere verblijftijden, ofwel hogere filterbedden of lagere snelheden, geven een beperkte verbetering.

Als de koolfilters verzadigd zijn met PFAS en andere microverontreinigingen, worden ze gereactiveerd. Die reactivatie wordt uitgevoerd door de koolleverancier, die de kool zonder zuurstof verhit tot ongeveer 800 °C. Hierdoor vallen de geadsorbeerde verbindingen uiteen en kan de kool opnieuw worden gebruikt. Het is aangetoond dat PFAS hiermee worden afgebroken [7]. Bij verbranding, door verhitting in aanwezigheid van zuurstof, zijn hiervoor temperaturen boven 1200 °C nodig.

Voor drinkwaterbedrijven betekent die snellere doorslag dat ze hun filters veel vaker moeten laten reactiveren, waardoor ze meer filterbedden en dus ruimte nodig hebben, dat het duurder is, en dat de totale milieu-impact van de zuivering significant toeneemt. En bovendien kunnen ze kleinere PFAS op deze manier niet verwijderen. TFA uit rivierwater vult, hoewel het minder toxisch is, al de helft van de RIVM-richtwaarde op.

Vanwege de beperkingen van actieve kool wordt er veel onderzoek gedaan naar alternatieve adsorbentia. Het eenvoudigste is proberen of actieve kool van een ander uitgangsmateriaal een beter resultaat geeft. Meestal wordt steenkool als grondstof gebruikt, wat uiteraard niet echt duurzaam is. In principe kan van elke organische grondstof actieve kool worden gemaakt. Kokosnootschalen worden al veel gebruikt, maar die leveren een actieve kool met een andere verhouding micro-/mesoporiën, die daardoor minder effectief is voor PFAS-verwijdering. De adsorptie vindt in principe plaats in microporiën, maar de mesoporiën zijn nodig voor het transport ernaartoe. Andere grondstoffen zijn afvalstoffen uit bijvoorbeeld de landbouw, zoals stro, snoeihout of abrikozenpitten. Die hebben meestal geen betere eigenschappen en zijn bovendien niet in constante aanvoerstromen beschikbaar, wat voor de drinkwatervoorziening wel noodzakelijk is.

Bepaalde soorten gemodificeerde klei blijken ook geschikt te zijn om PFAS te adsorberen, maar over het algemeen is hun adsorptiecapaciteit toch lager dan die van actieve kool, en geven ze een grote afvalstroom. Hetzelfde geldt voor cyclodextrines en zeolieten. Een aparte categorie vormen metal organic frameworks (MOFs). Die kunnen inderdaad PFAS adsorberen, maar zijn alleen op labschaal te produceren en blijken vaak instabiel te zijn in water. Toepassing op grote schaal is voor deze materialen voorlopig nog niet in beeld.

Ionenwisseling

Ionenwisseling is een speciaal soort adsorptie. Hierbij worden opgeloste ionen uitgewisseld tegen ionen die aan een polymeerhars zijn gebonden. De drijvende kracht achter dit proces is de elektrostatische aantrekking tussen de geladen functionele groepen op de hars en de ionen in het water. Veel PFAS komen bij de pH van waterbronnen voor als anionen en kunnen daardoor worden verwijderd met anionenwisselaars. Ook hier worden grotere PFAS beter verwijderd dan kleinere moleculen.

Een groot nadeel van de gebruikte harsen is dat ze meestal niet geregenereerd kunnen worden, omdat - naast de elektrostatische interactie - de staart van de PFAS een interactie aangaat met het polymere harsdeeltje zelf. Om de PFAS te verwijderen is dan een extractie nodig met ethanol of methanol, in combinatie met loog of ammoniak. Dergelijke alcoholen zijn echter toxisch, brandbaar en carcinogeen. Voor grootschalige toepassing in drinkwaterzuivering is dit op zijn minst een 'aandachtspunt'. Bovendien hebben deze harsen op dit moment nog geen KIWA-Watermark, een bij wet noodzakelijke goedkeuring voor gebruik in contact met drinkwater in Nederland. Sommige harsen hebben wel al internationale certificaten voor gebruik in drinkwater, maar dit is formeel niet afdoende. Bovendien is gebleken dat uit sommige harsen stoffen lekken, wat voor drinkwater niet acceptabel is.

Membraanfiltratie

Nanofiltratie is een scheidingsproces gebaseerd op poriegrootte en elektrostatische effecten, en is geschikt om bepaalde PFAS uit water te verwijderen. Ongeveer de helft van het kleine TFA kan met deze techniek worden verwijderd. Met behulp van omgekeerde osmose (RO) zijn ook deze kleinste PFAS uit water te verwijderen. Nu worden enkele procenten drinkwater met RO behandeld, maar dit neemt toe. Helaas is RO niet eenvoudig te implementeren. Naast het hoge energieverbruik in een land met 'netcongestie', is de 'recovery' van RO-processen maximaal 80 procent. Dit betekent dat van elke 1.000 liter die gefilterd wordt, 800 liter schoon water overblijft, maar ook een reststroom (het concentraat) van 200 liter, die een vijf keer zo hoge concentratie aan verontreinigingen bevat. Op dit moment wordt deze reststroom (in)direct geloosd op oppervlaktewater. Daarmee komen de PFAS weer in het milieu terecht. Idealiter zou het concentraat behandeld worden, inclusief afbraak van PFAS. Ondanks onderzoek hiernaar is de ideale oplossing nog niet gevonden. Een bijkomend probleem is dat drinkwaterbedrijven 25 procent meer water moeten innemen én voorzuiveren dan ze nodig hebben (1.000 liter als ze 800 liter drinkwater willen maken) en lang niet alle drinkwaterbedrijven kunnen hun winningsvergunning uitbreiden. Er is momenteel zelfs al een tekort van bijna 10 procent vergunningscapaciteit om de verwachte drinkwaterbehoefte in 2030 te dekken. Drinkwaterbedrijven ervaren grote problemen met het verkrijgen van nieuwe en vervangende waterwincapaciteit. Om het geproduceerde water na RO aan de drinkwaternormen te laten voldoen moeten er mineralen aan worden toegevoegd. Membraanfiltratie is dus geen eenvoudige oplossing.

Schuimfractioneren

Tegenwoordig is er veel aandacht voor schuimfractioneren. PFAS zijn oppervlakteactief, dus als een vloeistof met PFAS kan worden opgeschuimd, zullen PFAS zich bij voorkeur ophouden aan het lucht/vloeistofgrensvlak in het schuim. Dit is ook de reden dat er in kustgebieden veel PFAS neerdaalt vanuit zeeschuim. Een groot nadeel van deze techniek is dat die het beste werkt met een kationische surfactant, en dat de meeste van die surfactanten toxisch zijn (er wordt wel onderzoek gedaan naar bioafbreekbare surfactants). Een ander nadeel is dat deze techniek goed werkt voor grotere PFAS-moleculen, maar niet voor de hele kleine als TFA. Bovendien blijft ook nu de vraag staan: wat moet er met het gevormde schuim gebeuren, hoe kunnen PFAS hierin worden afgebroken? Doordat de concentratie PFAS met schuimfractionering wel duizend keer kan worden verhoogd, wordt de te behandelen afvalstroom wel hanteerbaarder.

Chemische afbraak

Eigenlijk is het PFAS-probleem alleen oplosbaar als alle PFAS niet alleen uit water worden verwijderd, maar ook chemisch afgebroken. Om aan te tonen dat dit gelukt is, moet een massabalans worden gemaakt, die de vraag beantwoordt of alle fluor uit de PFAS daadwerkelijk in fluoride is omgezet. Een groot praktisch probleem hierbij is dat de detectielimiet voor PFAS weliswaar op ongeveer 0,5 ng/L ligt (of zelfs nog lager), maar die voor fluoride op ongeveer 20 microgram/L, een factor veertigduizend hoger. Dit maakt het opstellen van een betrouwbare massabalans vaak onmogelijk.

Om de sterke C-F-binding te verbreken zijn extreme omstandigheden nodig. Onderzoek heeft inmiddels uitgewezen dat tijdens de reactivatie van actieve kool PFAS worden afgebroken (zie ook hierboven) [7].

In 2022 presenteerden Trang et al. [8] de afbraak van PFAS onder 'milde omstandigheden'. Zij gebruikten hiervoor dimethylsulfoxide als oplosmiddel, voegden hier natriumhydroxide aan toe en verhitten de oplossing tot een temperatuur tussen 80 en 120 °C. Het moge duidelijk zijn dat een dergelijke aanpak rechtstreeks op drinkwater geen optie is.

Geavanceerde oxidatie, bijvoorbeeld met UV/H₂O₂, is heel effectief voor de afbraak van de meeste organische verbindingen, maar voor PFAS kan beter het omgekeerde proces, geavanceerde reductie, worden toegepast [9]. Dit proces vraagt echter ook om omstandigheden die voor rechtstreekse toepassing op drinkwater niet geschikt zijn: een pH-waarde tussen 10 en 12, toevoeging van sulfiet en jodide en heel hoge UV-doses, die dus heel veel energie vragen [10]. Het proces is effectief voor de afbraak van carboxylaten, maar veel minder voor die van sulfonaten. Bovendien kunnen er transformatieproducten worden gevormd, waarvan de toxiciteit onbekend is. Wel zou een dergelijk proces kunnen worden toegepast op bijvoorbeeld een ingedikte PFAS-stroom (als concentraat of schuim), maar uit onderzoek bleek ook dat het proces minder effectief is in aanwezigheid van hogere concentraties natuurlijk organisch materiaal (NOM) en nitraat [11].

Een alternatief afbraakproces is mogelijk anodische oxidatie [11]. Hiervoor is een speciaal type elektrode nodig: borium doped diamond (BDD). Op kleine schaal werkt dit proces goed, zelfs in bijvoorbeeld RO-concentraat, met hoge concentraties zout en NOM, en ook voor zowel carboxylaten en sulfonaten. Maar voor opschaling zijn er nog wat hordes te nemen,

bijvoorbeeld op het gebied van stoftransport van en naar de elektrodes. En ook in dit geval is de vorming van transformatieproducten aangetoond, waarvan de gevolgen nog onbekend zijn. De laatste tijd worden er ook meer exotische processen onderzocht, zoals afbraak via cavitatie of ultrasoon geluid, waarbij opschaling een uitdaging is. Vacuüm-UV (met een golflengte < 200 nm) lijkt effectiever te zijn dan UV-C dat bij geavanceerde reductie wordt toegepast, maar vanwege de zeer geringe doordringdiepte (in de orde grootte van 0,1 mm) zijn hier nog geen grootschalige reactoren voor ontworpen. Ook de opschaling van plasmareactoren is nog een uitdaging, waarbij er wel rekening mee moet worden gehouden dat het behandelen van water met plasma de pH laat dalen tot ongeveer 3 [12]. Er bestaan plannen om met een deeltjesversneller te proberen PFAS af te breken.

STOWA laat de afbraak van PFAS met behulp van een kogelmolen onderzoeken [13]. Hiervoor moeten de PFAS wel tot een vaste stof worden geconcentreerd, wat een uitdaging is als het gaat om concentraties in de orde grootte van ng/L. Dit kan bovendien alleen op geconcentreerde PFAS-stromen.

KWR doet ook onderzoek naar afbraak met behulp van superkritische processen, waarbij in testen geen PFAS-houdende transformatieproducten werden aangetroffen.

De meeste hierboven genoemde technieken staan echter, wat betreft toepassing in de drinkwaterzuivering, nog in de kinderschoenen. Er lopen diverse pilotonderzoeken met verschillende technieken en het lijkt ook wel mogelijk te worden om specifieke PFAS te verwijderen of zelfs af te breken. Het is dan de vraag in hoeverre de kosten, het verbruik van energie en chemicaliën en de milieu-impact zullen opwegen tegen de lagere PFAS-concentraties alleen in drinkwater. Door verwijdering aan de lozingsbron kan lozing worden voorkomen en uitstoot naar voedsel worden gereduceerd.

Conclusies en vooruitblik

Drinkwaterbedrijven zetten in de drinkwaterproductie al op grote schaal actieve kool en membraanfiltratie in om PFAS te verwijderen. Het is echter moeilijk om op een duurzame wijze veel meer PFAS uit bronnen voor drinkwater te verwijderen en vervolgens uit het milieu te houden. Dit lukt niet met één enkele techniek. PFAS verwijderen leidt tot de vorming van een afvalstroom, waarin de PFAS bij voorkeur worden afgebroken. Dit betekent dat een effectieve PFAS-behandeling waarschijnlijk zal bestaan uit na elkaar geschakelde technieken, waarbij PFAS eerst zo ver mogelijk worden geconcentreerd, en daarna chemisch kunnen worden afgebroken. Hier wordt weliswaar wereldwijd onderzoek naar gedaan, maar de ideale aanpak is nog niet gevonden, mocht die al bestaan. Zeer waarschijnlijk zal het maatwerk worden, afhankelijk van lokale omstandigheden, mogelijkheden en waterkwaliteit.

Gezien de noodzakelijke zware zuiveringsinspanning is volledige verwijdering van PFAS uit drinkwaterbronnen toekomstmuziek. De benodigde processen zullen zeker veel energie, water en chemicaliën kosten, een hoge milieu-impact hebben en erg duur zijn. Bovendien pakken we zo slechts één zeer beperkte blootstellingsroute aan, terwijl we ondertussen doorgaan steeds meer van deze probleemstoffen in het milieu te brengen. Een totaalverbod op het gebruik van PFAS is op de lange termijn de enige goede strategie, als we onze leefomgeving, onze eigen gezondheid en die van onze (klein)kinderen willen beschermen.

Met dank aan Nicole van Veldhoven (Dunea), Koen Zuurbier (PWN) en Onno Kramer (Waternet)

Referenties

1. Greenpeace (2026). *Uitleg en verantwoording bij de PFAS kraanwater postcodechecker*. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-netherlands-stateless/2026/09/7f7a499b-260922-uitleg-en-verantwoording-bij-de-pfas-kraanwater-postcodechecker.docx.pdf>, geraadpleegd op 9 oktober 2026.
2. Saaltink, R. (2024). *Grondwaterkwaliteit Nederland 2024*. Platform Meetnetbeheerders Grondwaterkwaliteit.
3. Bil, W., et al. (2025). *PFAS in bloed van de Nederlandse Bevolking*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
4. Schymanski, E.L., et al. (2023). 'Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in PubChem: 7 Million and Growing'. *Environmental Science and Technology*, 2023. **57**(44): p. 16918-16928.
5. European Food Safety Authority (2020). *PFAS in food: EFSA assesses risks and sets tolerable intake*.
6. European Food Safety Authority (2020). 'Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food'. *EFSA Journal*, 2020. **18**(9).
7. Van Veggel, M., Hofman-Caris, C. H. M. (2024). *Afbraak van PFAS tijdens de thermische reactivatie van actieve kool*. 2024, KWR Water Research Institute.
8. Trang, B., et al. (2022). 'Low-temperature mineralization of perfluorocarboxylic acids'. *Science*, 2022. **377**(6608): p. 839-845.
9. Hofman-Caris, C.H.M., Harmsen, D.H. , Wols, B.A. (2021). 'UV/sulphite as alternative for UV/H₂O₂ for micropollutant degradation in drinking water'. *Water Supply*, 2021. **21**(8): p. 4109-4120.
10. Hofman-Caris, C.H.M. et al. (2024). *Verwijdering van PFAS uit drinkwater met behulp van geavanceerde reductie; mogelijke vorming van transformatieproducten*. KWR Water Research Institute.
11. Hofman-Caris, C.H.M., Harmsen, D., Siegers, W. (2024). *Geavanceerde reductie en anodische oxidatie voor de verwijdering van PFAS uit concentraatstromen*. KWR Water Research Institute.
12. Bruggeman, P.J., et al. (2016). 'Plasma-liquid interactions: A review and roadmap'. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016. **25**(5).
13. Wevers, J., et al. (2024) *Haalbaarheidsstudie PFAS-vernietiging met een ball mill*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer