

Blootstelling PFAS en de brandweer; een quickscan van de recente literatuur



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs	R. Heus
Review	F. Greven, toxicoloog Medische Milieukunde GGD Groningen
Contactpersoon	R. Heus

Datum	12 augustus 2024
-------	------------------

Foto cover	NIPV
------------	------

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Abstract

PFAS is a collective term for poly- and perfluoroalkyl substances. This term includes thousands of substances made for their beneficial properties. PFAS are water- and grease-repellent and heat-resistant. Because of these properties, they have been widely used in all kinds of consumer products and industrial processes. A problem is, however, that they are hardly degradable and are therefore a growing environmental and health problem. People are exposed to PFAS on a daily basis. In addition to this background exposure, some people are also exposed to PFAS at their work. Based on recent scientific publications, this knowledge document discusses what PFAS are, which products contain PFAS, how people are exposed to PFAS, what the adverse consequences of (exposure to) PFAS are and whether the exposure to PFAS can be reduced.

Because PFAS are ubiquitous, we find them in almost everyone. Based on current knowledge, safety limits have been set on what is still permissible of PFAS in the body. Besides regular exposure to PFAS, occupational exposure sometimes occurs. This applies also to firefighters, whose protective clothing contains PFAS and who may have worked with PFAS-containing firefighting foam in the past.

However, studies show that firefighters do not have higher blood PFAS concentrations than reference populations. For this reason, it does not seem necessary at this moment to conduct large-scale studies on PFAS concentrations in blood among fire service personnel. However, it is important to keep up with developments on PFAS exposure, as new findings are published daily.

Samenvatting

PFAS is een verzamelnaam voor poly- en perfluoralkylstoffen. Hier vallen duizenden stoffen onder die door de mens gemaakt zijn vanwege hun gunstige eigenschappen. PFAS zijn water- en vetafstotend en hittebestendig. Omdat ze deze eigenschappen hebben, worden ze veelvuldig toegepast in allerlei consumentenproducten en industriële processen. Een probleem is dat ze nauwelijks afbreekbaar zijn en daarmee een groeiend milieu- en gezondheidsprobleem vormen. Mensen worden dagelijks blootgesteld aan PFAS. Naast deze 'achtergrondblootstelling' worden sommige mensen ook nog beroepsmatig blootgesteld aan PFAS. In deze publicatie wordt op basis van recente wetenschappelijke publicaties ingegaan op wat PFAS zijn, welke producten PFAS bevatten, hoe mensen aan PFAS worden blootgesteld, wat de nadelige gevolgen daarvan zijn en of de blootstelling aan PFAS verminderd kan worden.

Doordat PFAS alom aanwezig zijn, vinden we bij bijna iedereen in de samenleving PFAS terug in het lichaam. Op basis van de huidige kennis zijn er veiligheidsgrenzen opgesteld aan wat nog toelaatbaar is aan PFAS in het lichaam. Naast de reguliere blootstelling aan PFAS is er soms ook sprake van beroepsmatige blootstelling. Dit geldt bijvoorbeeld voor brandweermensen, wier beschermende kleding PFAS bevat en die in het verleden mogelijk met PFAS-houdend blusschuim hebben gewerkt.

Onderzoek laat echter zien dat brandweerpersoneel geen hogere concentraties PFAS in het bloed heeft dan referentiepopulaties. Om die reden lijkt het nu niet nodig om grootschalig onderzoek uit te voeren bij het voltallige brandweerpersoneel naar PFAS-concentraties in het bloed. Wel is het belangrijk om de ontwikkelingen over PFAS-blootstelling bij te houden, omdat er dagelijks nieuwe kennis wordt gepubliceerd.

Inhoud

	Abstract	3
	Samenvatting	4
	Inleiding	6
1	Wat zijn PFAS en waar zitten ze in?	8
	1.1 Wat zijn PFAS?	8
	1.2 Waar zitten PFAS in?	9
2	Blootstelling aan PFAS	10
	2.1 Wie worden blootgesteld?	10
	2.2 Hoe word je blootgesteld?	11
	2.3 Wat zijn acceptabele waarden voor blootstelling aan PFAS?	11
	2.4 Hoe meet je (blootstelling aan) PFAS?	13
	2.5 PFAS en brandweerpersoneel	14
3	Gevolgen van PFAS	16
	3.1 Wat doen PFAS met je?	16
	3.2 Raak je PFAS in je lichaam ook weer kwijt?	17
	3.3 Kunnen we blootstelling beperken?	17
4	Wat weten we nog niet?	19
5	Conclusies	20
	Bronnen	21

Inleiding

Achtergrond

Poly- en perfluoralkylstoffen ofwel PFAS komen steeds vaker voor in ons leefmilieu. Zo is de jaarlijkse productie van PFAS toegenomen van 500 ton per jaar in de jaren 70 tot bijna 5000 ton per jaar in 2000 (Pancras et al., 2018). Hoewel we weten dat brandweerpersoneel net als de rest van de Nederlandse bevolking wordt blootgesteld aan PFAS in ons leefmilieu¹, weten we niet of brandweermensen extra risico lopen op eventuele gezondheidsschade door het gebruik van PFAS-houdende middelen. Op dit moment is ook niet bekend wat de blootstelling van Nederlands brandweerpersoneel aan PFAS is. Wel zijn er richtlijnen voor een toelaatbare inname van PFAS per dag opgesteld door de European Food Safety Authority (EFSA). Deze richtlijnen zijn door het RIVM overgenomen voor de Nederlandse situatie.

Om te kunnen bepalen of er voor brandweerpersoneel een *beroepsrisico* is op gezondheidseffecten als gevolg van blootstelling aan PFAS, moeten we weten of de blootstellingsniveaus van brandweerpersoneel verschillen van die van de rest van de Nederlandse bevolking en, zo ja, aan welke (andere) PFAS-bronnen brandweermensen vaker blootgesteld worden.

Doel en vragen die centraal staan

Het doel van deze verkennende publicatie is om de brandweer te informeren over de blootstellingsbronnen van PFAS in de werkomgeving en de mogelijke gezondheidsrisico's van blootstelling aan PFAS. Hiervoor zullen gegevens gebruikt worden die zijn gevonden via een quickscan van de beschikbare wetenschappelijke literatuur. Er is naar antwoorden gezocht op de volgende vragen:

- > Wat zijn PFAS?
- > Wat zijn bronnen van PFAS?

- > Wie worden blootgesteld aan PFAS?
- > Hoe word je blootgesteld aan PFAS?
- > Wat zijn (nog) acceptabele blootstellingsniveaus van PFAS?
- > Hoe meet je blootstelling aan PFAS?
- > Hoe bepaal je de hoeveelheid PFAS die in het lichaam zit?
- > Hebben brandweermensen met meerdere of andere blootstellingsbronnen te maken?
- > Wijkt de brandweerpopulatie qua blootstelling af van de 'gewone' populatie?

- > Wat zijn de gezondheidseffecten van PFAS?
- > Kun je PFAS in je lichaam ook weer kwijtraken?
- > Kunnen we de blootstelling beperken?

¹ Bron: <https://www.rivm.nl/pfas/vraag-antwoord/efsa#Algemeen>.

In dit document wordt de algemene term PFAS gebruikt, maar daar waar het gaat om specifieke PFAS wordt de specifieke stofnaam gebruikt. Naast deze publicatie is er door de Raad van Commandanten en Directeuren Veiligheidsregio een notitie uitgebracht met vragen en antwoorden over PFAS².

Leeswijzer

In het vervolg van deze publicatie wordt aan de hand van bovenvermelde vragen ingegaan op de blootstelling aan PFAS voor mensen en brandweerpersoneel in het bijzonder. Hoofdstuk 1 gaat in op PFAS zelf en de producten en stoffen waarin ze te vinden zijn. In hoofdstuk 2 staat de blootstelling aan PAS centraal en in hoofdstuk 3 de gevolgen van PFAS na blootstelling. Hoofdstuk 4 stipt een aantal zaken aan die we nog niet weten over PFAS, en hoofdstuk 5 bevat een aantal conclusies.

² Q&A PFAS, 11 juli 2024

1 Wat zijn PFAS en waar zitten ze in?

1.1 Wat zijn PFAS?

Poly- en perfluoralkylstoffen (vaak afgekort als PFAS) is een verzamelnaam voor inmiddels enkele duizenden stoffen³ waarin onder andere een combinatie van fluorverbindingen en alkylgroepen voorkomt (zie tabel 1.1). PFAS worden al meer dan zestig jaar door de mens gemaakt en komen van nature in het milieu niet voor. Bekende stoffen die tot de PFAS behoren, zijn onder andere perfluorooctaanzuur (PFOA of C8) en perfluorooctaansulfonaat (PFOS). PFAS hebben handige eigenschappen: ze zijn onder andere water-, vet- en vuilafstotend en kunnen tegen hoge temperaturen (Nilsson, 2022). Het nadeel van PFAS is dat de molecuulverbinding zo sterk is, dat deze nauwelijks tot niet meer los te krijgen is. Dat zorgt ervoor dat PFAS zo goed als niet afbreken in het milieu en dat ze de neiging hebben zich op te hopen in organismen en dus ook in mensen. Ze worden daarom ook wel 'forever chemicals' genoemd.

Tabel 1.1 Overzicht van de belangrijkste PFAS-categorieën en subgroepen (Panieri et al., 2022)

Perfluorinated		Polyfluorinated	
Subgroup	Example	Subgroup	Example
Perfluoroalkyl acids (PFAAs)			
Perfluoroalkane sulfonic acids & sulfonates (PFSAs)			
Perfluoroalkane sulfonic acids (PFSIAs)	PFBS, PFHxS, PFOS	Fluorotelomer compounds (FT)	6:2 FTO, 8:2 FTI
Perfluorocarboxylic acids & carboxylates (PFCAs)	PFOA C8-PFPA C8/C8-		
Perfluoroalkyl phosphonic acids (PFPAAs)			
Perfluoroalkyl phosphinic acids (PFPIAs)			
Perfluoroalkyl ether acids (PFEAs)	GenX, Adona, F-53B	Perfluoroalkane sulfonamido compounds (Me/Et/Bu-FASAs)	MeFOSA, FOSE 4,8-Dioxa-3H-perfluorononanoate
Perfluoroalkane sulfonamides (FASA)	FOSA	Miscellaneous)	

³ Schattingen in de literatuur lopen uiteen van meer dan 4000 (Van Tol, 2021) tot wel 9000 (Plassman et al., 2022).

Perfluorinated		Polyfluorinated	
Subgroup	Example	Subgroup	Example
Perfluoroalkane sulfonyl fluorides (PASFs)	PBSF, POSF		
Perfluoroalkyl iodides (PFAIs) PFHxI	PFHxI		
Perfluoroalkanonyl fluorides (PAFs)	POF		
Perfluoroalkyl aldehydes (PFALs)	PENAL		
Polymeric PFAS	Subgroup	Example	
	Fluoropolymers	PVDF, FEP, PFA, ETFE, PTFE	
	Side-chain Fluorinated Polymers	Fluorinated urethane/acrylate/methacrylate/oxetane polymers	
	Perfluoropolyethers (PFPEs)	PEPE-BP, Fluorolink-PFPE	

1.2 Waar zitten PFAS in?

PFAS zitten in verschillende alledaagse producten, zoals smeermiddelen, voedselverpakkingsmaterialen, bakpapier, blusschuim, antiaanbaklagen van pannen, kleding, textiel en cosmetica. Veel gewasbeschermingsmiddelen (pesticiden) bevatten ook PFAS, omdat ze vanwege hun vuil- en waterafstotende werking langer werkzaam blijven. Verder worden PFAS gebruikt in verschillende industriële toepassingen en processen zoals verchroming en de productie van inkt en vernissen (Paul et al., 2009) (Paul, Jones, & Sweetman, 2009). Omdat PFAS wijdverbreid aanwezig zijn in de leefomgeving, komen ze in bijna alle voedselproducten voor, zoals koffie, thee, graanproducten, melkproducten, vlees, eieren, vis, groente en fruit. De hoogste hoeveelheden zitten in vis. In onderzoek van het RIVM zijn er geen PFAS aangetroffen in suiker, suikermais, margarine en olijfolie.⁴

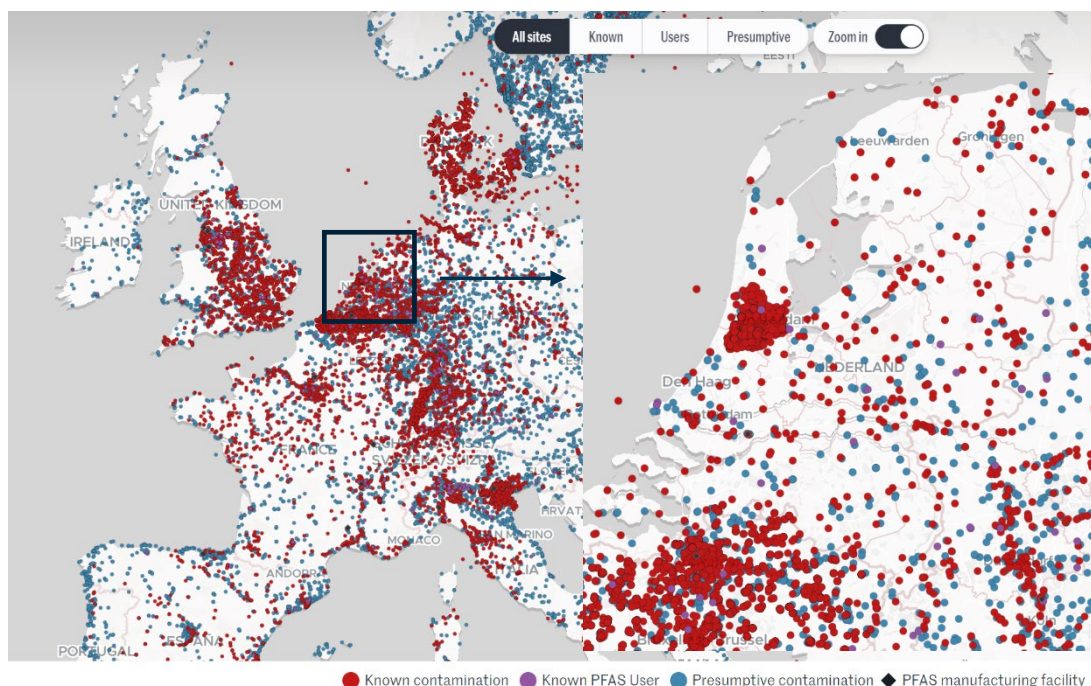
In nieuwe brandweerkleding is PFAS vooral terug te vinden in de (na)behandelde buitenlaag en het membraan (de tussenlaag). De binnenlaag bevat nauwelijks PFAS (Maizel et al., 2023), maar is er volgens ander onderzoek ook niet vrij van, waardoor direct contact met de huid kan plaatsvinden (Mazumder et al., 2023). Door het (intensieve) gebruik van brandweerkleding neemt de hoeveelheid waarneembare PFAS sterk toe (Maizel et al., 2024).

⁴ Bron: <https://www.rivm.nl/pfas/vraag-antwoord/efsa>.

2 Blootstelling aan PFAS

2.1 Wie worden blootgesteld?

Via voedsel, kraanwater en consumentenproducten wordt iedereen blootgesteld PFAS; ze zijn alom aanwezig in het leefmilieu (zie Figuur 1.1). Onderzoek laat zien dat meer dan 95 procent van de Amerikaanse bevolking meerdere soorten PFAS in het lichaam heeft (Trowbridge et al., 2020; Zhang et al., 2024).



Figuur 2.1 Vastgestelde PFAS verontreiniging in het milieu⁵

Er zijn Europese studies waarin bij de algemene bevolking de concentratie van PFOA (perfluorooctaanzuur, een van de vele PFAS-stoffen) in het bloed bepaald is. Uit dergelijke onderzoeken blijkt volgens het Europees Chemicaliën Agentschap (ECHA) dat mensen in de EU gemiddeld 3,5 nanogram PFOA per milliliter bloedserum⁶ hebben (Van Poll et al., 2017).

In een RIVM-onderzoek uit 2016 is in het bloed van een groep Nederlandse volwassenen een vergelijkbaar gemiddelde van 3,4 nanogram PFOA per milliliter bloedserum aangetroffen. De Europese Voedselveiligheidsautoriteit (EFSA) vermeldt een gemiddelde waarde van 2,1 nanogram PFOA per milliliter bloedserum in volwassenen.⁷ Kortom, vrijwel iedereen heeft PFAS in het bloed.

⁵ Bron: https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination_6016905_8.html.

⁶ Bloedserum is de vloeistof die overblijft als men bloed laat stollen en het stolsel afcentrifugeert. De samenstelling is in grote lijnen vergelijkbaar met die van bloedplasma, behalve dat de stollingseiwitten (zoals fibrinogeen) grotendeels verwijderd zijn.

⁷ Bron: <https://www.rivm.nl/pfas/vraag-antwoord/>.

De meeste wetenschappelijke studies gaan enkel over blootstelling aan PFOA en PFOS; slechts een beperkt aantal gaat over blootstelling aan andere PFAS zoals PFNA, PFHxS, GenX en in mindere mate PFBS (Van Tol, 2021). Voor de overige PFAS (enkele duizenden stoffen) zijn voor mensen nauwelijks toxicologische studies uitgevoerd. Toch worden deze overige PFAS steeds meer gebruikt als alternatieven voor inmiddels uitgefaseerde toepassingen van PFOS en PFOA, waarvoor inmiddels wereldwijd en specifiek ook in Europa beperkingen gelden (Van Tol, 2021).

2.2 Hoe word je blootgesteld?

De belangrijkste blootstellingsroute voor PFAS is via voedsel (vis en wild) (Nilsson, 2022; Stahl et al., 2011) en drinkwater. Daarnaast kan blootstelling ook via inademing van verontreinigde (indoor) lucht en in mindere mate via huidcontact plaatsvinden (DeLuca et al., 2021). In een onderzoek van Poothong et al. (2020) bleek dat meer dan 90 procent van de PFAS via het voedsel binnenkomt en slechts 0,3 procent via de huid, maar dat er wel grote individuele verschillen kunnen zijn (Poothong et al., 2020). Daarentegen wordt in een recent artikel van Ragnarsdóttir et al. (2024) de huid wél als een belangrijke opnameroute wordt genoemd. Dit geldt dan vooral voor de PFAS met een korte koolstofketen vanwege hun kleinere molecuulgrootte (Ragnarsdóttir et al., 2024). Daarvan weten we momenteel echter nog onvoldoende.

De bijdrage van de verschillende blootstellingsroutes is ongeveer als volgt (Van Tol, 2021):

- > oraal: circa 75-95 procent
- > inademing (dampen en stof): circa 5-25 procent
- > via de huid: < 5 procent.

2.3 Wat zijn acceptabele waarden voor blootstelling aan PFAS?

De EU heeft grenswaarden gesteld voor voedingsmiddelen waarvan de kans aanwezig is dat ze PFAS bevatten (Europese Unie, 2023). Als verontreiniging met PFAS wordt verondersteld, is het altijd mogelijk om deze voedingsmiddelen in gecertificeerde laboratoria te laten testen. In het algemeen kan worden gesteld dat het eten van bepaalde voedingsmiddelen met een verhoogde kans op PFAS-besmetting geen kwaad kan, zolang je maar geen grote hoeveelheden gedurende een langere tijd nuttigt. Om er desondanks voor te zorgen dat het innemen van PFAS niet tot gezondheidsschade leidt, worden er normen gehanteerd. Als we het over een maximale blootstelling hebben die niet mag worden overschreden, spreken we van de toelaatbare dagelijkse, wekelijkse of zelfs maandelijkse inname (TDI/TWI/TMI)⁸.

⁸ Stoffen die in voeding terechtkomen maar daar eigenlijk niet in thuishoren, zoals milieuverontreinigingen en natuurlijke gifstoffen, hebben een toelaatbare dagelijkse inname (TDI). De TDI is de hoeveelheid van een dergelijke stof die je levenslang elke dag binnen mag krijgen zonder dat dit slecht is voor je gezondheid. Voor milieuverontreinigingen zoals zware metalen en dioxines wordt een toelaatbare wekelijkse inname (TWI) of een toelaatbare maandelijkse inname (TMI) vastgesteld. (<https://www.voedingscentrum.nl/encyclopedie/toelaatbare-dagelijkse-inname-tdi.aspx>).

2.3.1 Blootstellingsnormen

De EFSA heeft een Tolerable Weekly Intake (TWI) voor PFAS vastgesteld van 4,4 nanogram per kilogram lichaamsgewicht (ng/kg) per week. Deze TWI geldt voor PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS samen (Shrenk et al., 2020). Hierbij is aangenomen dat deze vier PFAS even toxisch zijn. Deze TWI is veel lager dan de in 2016 door het RIVM afgeleide Tolerable Daily Intake (TDI) van 12,5 ng/kg lichaamsgewicht per dag voor de stof PFOA alleen. Ook voor een aantal andere afzonderlijke PFAS hanteerde het RIVM aanvankelijk lage TDI-waarden.⁹ In 2020 heeft het RIVM de substantieel lagere vastgestelde TWI (0,63 ng/kg lichaamsgewicht per dag) van de EFSA overgenomen vanwege het effect van PFAS op het immuunsysteem (zie paragraaf 3.1), zodat mensen geen onnodige gezondheidsrisico's lopen (RIVM, 2020).

De blootstellingsdosis in de thuissituatie van Nederlandse volwassenen als gevolg van consumptie van voedsel en drinkwater is een aanzienlijk deel van de toegestane dagelijkse dosis. Voor PFOS en PFOA samen bedraagt de bijdrage van alleen het dieet zo'n 80-95 procent van de TDI die volgens de EFSA is toegestaan. Indien andere manieren van blootstelling hierbij worden opgeteld, zou een volwassene in de thuissituatie al te maken hebben met een overschrijding van de EFSA-waarde. Dit geeft aan dat elke extra blootstelling aan PFAS kan leiden tot een overschrijding van de grenswaarde, met mogelijk gezondheidseffecten tot gevolg (Van Tol, 2021). Ook andere onderzoeken laten zien dat de normwaarden overschreden kunnen worden. Zo ligt volgens Stahl et al. (2011) de totale blootstelling aan PFOS tussen 2 en 200 ng/kg lichaamsgewicht per dag en voor PFOA tussen 3 en 14 ng/kg lichaamsgewicht per dag afhankelijk van bijvoorbeeld de hoeveelheid vis die men dagelijks consumeert (Stahl et al., 2011).

Omdat inhalatie naast voedselinname ook een mogelijke blootstellingsroute voor PFAS is, noemt Van Tol (2022) ook indicatieve inhalatiegrenswaarden voor PFAS in de orde grootte van 0,002 - 35 µg/m³ (Van Tol, 2021). Deze zijn zeer laag en spelen een ondergeschikte rol in de totale blootstelling aan PFAS (Van Tol, 2021).

2.3.2 Grenswaarden van PFAS in bloed

Naast blootstellingsnormen zijn er ook grenswaarden voor opgeslagen PFAS in het bloed. De huidige grenswaarden die door het RIVM worden gehanteerd zijn voor:

- > PFOA 89 µg per liter bloed
- > PFOS 64 µg per liter bloed.

(Ex-)medewerkers van DuPont in Dordrecht van wie het bloed is getest op de hoeveelheid PFOA, bleken waarden te hebben die meer dan twee maal hoger zijn dan de door het RIVM gehanteerde grenswaarde.¹⁰

Hoewel de acceptabele grenswaarde voor PFOS lager is dan voor PFOA, wordt in het bloed van mensen juist meer PFOS aangetroffen dan PFOA (Stahl et al., 2011). Het is nog niet duidelijk wat dat betekent voor de gezondheid op de lange(re) termijn.

⁹ PFOS van 6,25 ng/kg lichaamsgewicht per dag, PFOA van 12,5 ng/kg lichaamsgewicht per dag en GenX van 21 ng/kg lichaamsgewicht per dag (Van Tol, 2021).

¹⁰ Bron: <https://www.chemiemediacentrum.nl/c8-en-genx...-hoe-zit-het-nou-eigenlijk>.

2.4 Hoe meet je (blootstelling aan) PFAS?

2.4.1 In producten

Om PFAS te kunnen aantonen zijn verschillende chemische analyse technieken noodzakelijk. Vloeistofchromatografie-massaspectrometrie (LC-MS) is een analytische chemische techniek die de fysieke scheidingsmogelijkheden van vloeistofchromatografie (of HPLC) combineert met de massa-analysemogelijkheden van massaspectrometrie (MS). Met deze gecombineerde methode is het mogelijk om PFAS in voedsel en dranken aan te tonen. Het is mogelijk om zelf monsters te nemen en die op te sturen naar gecertificeerde laboratoria als vervuiling van voedsel of vloeistoffen wordt verondersteld.

Om PFAS in kleding en textiel aan te tonen wordt gebruikgemaakt van gaschromatografie/elektron impact massaspectrometrie van geëxtraheerde PFAS uit textiel (Van der Veen, 2022). Voor een gedetailleerde uitleg over deze technieken wordt verwezen naar het proefschrift van Van der Veen (2022).

2.4.2 In de omgeving

PFAS kunnen op vier manieren in de lucht, water en bodem terecht komen, namelijk via emissie door (Van Tol, 2021):

1. productie van PFAS-houdende grondstoffen en producten
2. het gebruik van PFAS-houdende producten
3. het verbranden en storten van PFAS-houdende afvalstoffen
4. recycling van PFAS-houdende materialen en producten.

Blusschuim is een van de belangrijke oorzaken voor grondwatervervuiling (Mazumder et al., 2023). PFAS-houdend blusschuim is in Nederland vooral gebruikt op en rondom vliegvelden, oefenterreinen, raffinaderijen en bulkopslag van chemicaliën (Pancras et al., 2018). Daarom zien we op en rond (militaire) vliegvelden in Nederland een ernstige verontreiniging van het grondwater.¹¹ Sinds 4 juli 2020 is het niet meer toegestaan PFAS-houdend blusschuim te produceren en sinds 1 januari 2023 is het gebruik van PFAS-houdend blusschuim alleen nog toegestaan op locaties waar alle vrijkomende schuimvloeistof opgevangen en verwerkt kan worden (bijvoorbeeld in tankopslag en de chemische industrie) (European Union, 2020). Ten slotte mag PFAS-houdend blusschuim vanaf 4 juli 2025 niet meer worden gebruikt en dient het als gevaarlijk afval verwerkt te worden (European Union, 2020).¹²

Voor PFAS in het milieu is er in Nederland nog geen gestandaardiseerde analysemethode opgesteld.¹³ Analyse van PFAS in het milieu is mogelijk na een aantal bewerkingen van de te analyseren lucht, water en/of bodem. Luchtanalyse wordt uitgevoerd met monsters die zijn gefilterd en waarbij stofdeeltjes op een kwartsfilter achterblijven. Het extract daarvan wordt in een laboratorium geanalyseerd op aanwezigheid van PFAS met vloeistofchromatografie-massaspectrometrie (LC-MS) (Peters et al., 2022). Bodemonsters worden eerst gedroogd om er vervolgens de PFAS uit te extraheren, waarna eveneens met hoogwaardige vloeistofchromatografie, gekoppeld aan massaspectrometrische (LC-MS), de hoeveelheid PFAS wordt bepaald (DIN 38414-14:2011-08, 2011).

¹¹ Bron: <https://pointer.kro-ncrv.nl/vliegbasis-gilze-rijen-en-11-andere-defensierreinen-ernstig-verontreinigd-met-giftig-pfas>.

¹² Bron: <https://www.saval.nl/kennisplatform/aangescherpte-eu-regelgeving-pfas-blusschuim/>.

¹³ Bron: <https://www.tauw.nl/op-welk-gebied/pfas/pfas-onderzoek-en-analyse.html>.

2.4.3 Biomonitoring (in mens en dier)

De 'Agency for Toxic Substances and Disease Registry' in de VS heeft onlangs aangegeven dat PFAS weliswaar ook in urine gemeten kunnen worden, maar dat de concentratie PFAS in het bloed de geaccepteerde biomarker voor blootstelling aan PFAS is. Nadat bloed is afgenomen bij testpersonen, wordt de concentratie PFAS in het bloedserum bepaald (Trowbridge et al., 2020). Mogelijk dat PFAS ook opgeslagen worden in weefsels en organen, maar dat is lastig te meten in levende mensen en dieren. Analyse van plotseling overleden mensen heeft aangetoond dat de concentraties in het lichaam goed corresponderen met bloedserumanalyses (Nielsen et al., 2024).

2.4.4 Is meten noodzakelijk?

Het is niet nodig (en uiteraard niet haalbaar) om van iedereen bloed af te nemen om PFAS aan te tonen, omdat we weten dat iedereen met een grote waarschijnlijkheid PFAS in zijn of haar bloed heeft. Uit meerdere onderzoeken blijkt dat de hoeveelheid PFAS in het bloed van brandweerpersoneel niet significant verschilt van die hoeveelheid in het bloed van de rest van de bevolking (Nilsson, 2022; Team KAM, 2019; Zhang et al., 2019). Daarom is er geen aanleiding om nu alle brandweermensen te onderzoeken. Als er een vermoeden bestaat dat zij wel meer dan normaal blootgesteld zijn aan PFAS (bijvoorbeeld doordat ze in het verleden veelvuldig met PFAS-houdend schuim hebben gewerkt), dan kan worden onderzocht of de grenswaarden in hun bloed (zie paragraaf 2.3) worden overschreden en of we ze moeten volgen in de tijd. Met de huidige kennis is het echter nog niet mogelijk om hiermee de individuele gevolgen op de lange(re) termijn van PFAS-blootstelling te weten te komen.¹⁴ Kanttekening hierbij is ook dat vastleggen van de waarden zonder handelingsperspectief tot bezorgdheid bij individuele brandweermensen kan leiden.¹⁵

2.5 PFAS en brandweerpersoneel

Hoewel iedereen in de samenleving wordt blootgesteld aan PFAS, is die blootstelling natuurlijk van veel factoren afhankelijk. Een van die factoren is beroepsmatige blootstelling, bijvoorbeeld wanneer er gewerkt wordt op productielocaties van PFAS of in PFAS-verwerkende industrieën, of omdat er gewerkt wordt met PFAS-houdende middelen. PFAS is een van de vele gevaarlijke stoffen waarmee de brandweer dagelijks in aanraking komt. De vraag is of die beroepsmatige blootstelling leidt tot hogere waarden in het lichaam en of die waarden de veilige normwaarden overschrijden.

2.5.1 Vormen van blootstelling

De onderstaande beroepsmatige blootstellingen aan PFAS van de brandweer worden genoemd in (Mazumder et al. (2023):

- > persoonlijke beschermingsmiddelen (beschermende kleding)
- > blusschuim
- > de omgevingslucht van brandweerkazernes
- > de omgevingslucht van de plaats van het (brand)incident.

In onderzoek van Van der Veen (2022) is aangetoond dat tijdens het wassen en tijdens het gebruik van tegen regen en vuil gecoate outdoor kleding onder bepaalde weersomstandigheden PFAS kunnen vrijkomen (Van der Veen, 2022). Aangezien brandweerkleding

¹⁴ Frans Greven, persoonlijke communicatie 06-08-2024.

¹⁵ Frans Greven, persoonlijke communicatie 06-08-2024.

dezelfde behandeling ondergaat als outdoor kleding, is het aannemelijk dat ook bij brandweerkleding PFAS vrijkomen. Ook is de omgeving van kazernes sterker verontreinigd met PFAS-‘afbraakproducten’ (mogelijk uit de kleding), die vervolgens weer ingeademd kunnen worden (Mazumder et al., 2023). Deze PFAS komen uiteindelijk ook in het milieu terecht, waaruit ze door hun slechte afbreekbaarheid niet of nauwelijks meer verdwijnen.

2.5.2 PFAS-waardes in het bloed van brandweermensen

Er is aangetoond dat brandweerpersoneel voor sommige PFAS¹⁶ hogere concentraties in het lichaam heeft dan een vergelijkbare groep kantoorpersoneel. Daarnaast zijn er verschillen in concentratie tussen diverse functies bij de brandweer. Chauffeurs hebben lagere PFAS-waarden dan brandbestrijders en officieren, en brandweerpersoneel dat veelvuldig met schuim heeft gewerkt, heeft weer hogere PFAS-waarden dan brandweermensen die dat niet hebben (Trowbridge et al., 2020). Trowbridge et al. (2020) vonden opmerkelijk genoeg ook dat personeel dat vaker adembescherming gebruikte, vaker de handen waste en/of vaker douchte, hogere bloedconcentraties PFAS (PFNA, PFUnDA, PFHxS) had. Een vergelijking met eerdere bevolkingsonderzoeken laat echter niet zien dat brandweerpersoneel significant hogere concentraties heeft voor *alle* onderzochte PFAS (Trowbridge et al., 2020).

In Australisch onderzoek is aangetoond dat voor sommige PFAS (onder andere PFOS) oudere brandweermensen hogere bloedwaarden hebben dan de rest van de bevolking, maar dat er voor andere PFAS (onder andere PFOA) geen verschil te zien was. Mogelijk zijn de hogere concentraties van sommige PFAS in het bloed het gevolg van het gebruik van PFAS-houdend blusschuim door de oudere brandweermensen (Nilsson, 2022). Door Nilsson (2022) is er geen significant verschil gevonden tussen de totale beroepsgroep brandweerpersoneel en de rest van de Australische populatie, wat mogelijk komt door het uitfaseren van PFAS-houdend schuim (Nilsson, 2022). Ook Zhang (2024) vond geen significante verschillen tussen PFAS-concentraties in bloedserum van brandweerpersoneel en dat van de Amerikaanse populatie als geheel (Zhang, et al., 2024).

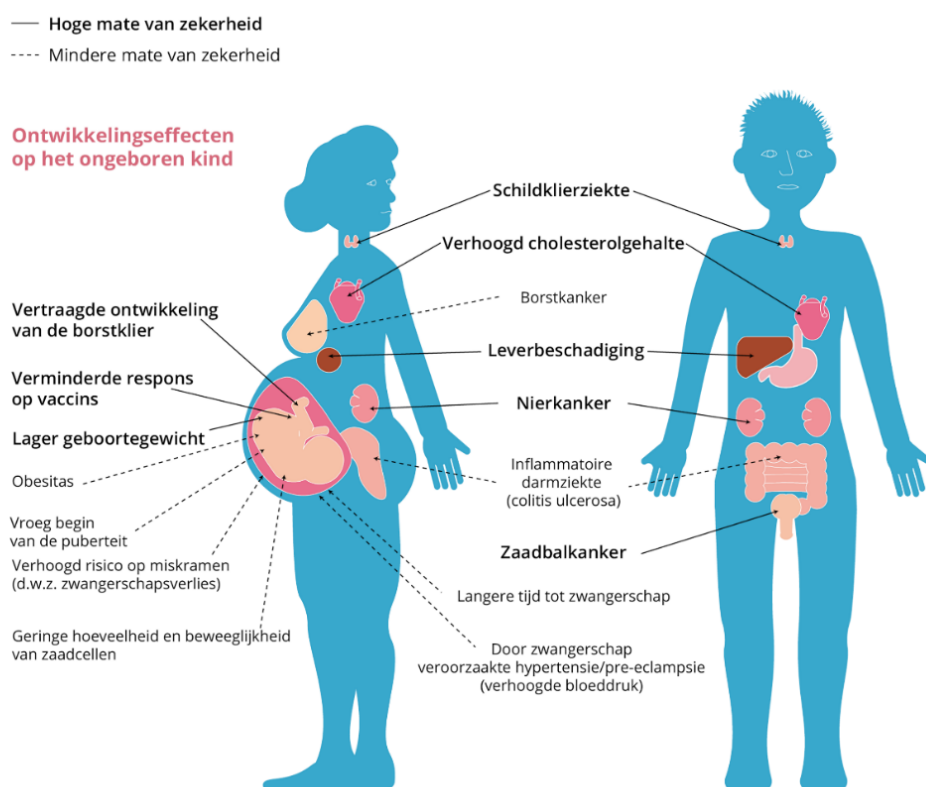
In onderzoeken uit 2018 en 2019 naar bloedwaarden van personeel van een Nederlands brandweerkorps is eveneens geen verschil aangetoond tussen de repressieve brandweermensen en een referentiepopulatie. Daarnaast is bij beide meetmomenten vastgesteld dat alle meetwaarden ver onder de gestelde norm zijn voor PFOA en de (onofficiële) norm van PFOS, zoals die door het RIVM zijn vastgesteld (Team KAM, 2019).

¹⁶ Getest is op: (PFHxS, PFOA, PFOS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFBuS, PBDaA, PFBA, PFHxA, PFHpA, PFOSA).

3 Gevolgen van PFAS

3.1 Wat doen PFAS met je?

Blootstelling aan PFAS wordt in verband gebracht met meerdere nadelige gevolgen voor de gezondheid, waaronder kanker (mesotheliom, prostaat-, teelbal-, nierkanker en non-Hodgkin-lymfoom) (Mazumder et al., 2023), onderdrukking van het immuunsysteem, verstoring van de schildklier en geslachtshormonen en een verminderde spermakwaliteit (Panieri et al., 2022). Studies geven ook aan dat blootstelling aan PFAS geassocieerd wordt met metabolische effecten, colitis ulcerosa (ontsteking van de dikke darm) en nadelige effecten op lever en nieren (Trowbridge et al., 2020). In Figuur 3.1 wordt een overzicht gegeven van de nadelige gezondheidseffecten van blootstelling aan PFAS, zoals deze op groepsniveau worden gevonden. Het is niet zo dat bepaalde bloedwaarden op individueel niveau altijd leiden tot PFAS-gerelateerde aandoeningen.¹⁷



Figuur 3.1 Effecten van de blootstelling aan PFAS op het menselijk lichaam¹⁸

¹⁷ Frans Greven, persoonlijke communicatie 06-08-2024.

¹⁸ Bron: https://nl.wikipedia.org/wiki/Poly- en_perfluoralkylstoffen.

3.2 Raak je PFAS in je lichaam ook weer kwijt?

Mensen kunnen PFAS weer kwijtraken nadat ze in het lichaam zijn gekomen, maar dat kan een langdurig proces zijn. De halfwaardetijd – de tijd die nodig is om de helft van de in het lichaam opgeslagen hoeveelheid PFAS weer kwijt te raken – is voor sommige PFAS enkele jaren. Stel dat de halfwaardetijd van PFAS 2 jaar is, dan is er na tien jaar nog 3 % over. Stel dat de halfwaardetijd 10 jaar is, dan duurt het 50 jaar om op dezelfde hoeveelheid uit te komen. Voor PFHxS kan het zelfs 175 jaar duren voordat de 3 % bereikt wordt. Als mensen ondertussen weer opnieuw met PFAS in aanraking komen, wat onvermijdelijk is, wordt er ook weer opnieuw PFAS opgeslagen in hun lichaam. In onderstaande tabel staan de halfwaardetijden voor een aantal PFAS aangegeven (Mazumder et al., 2023).

Tabel 3.1 Geschatte halfwaardetijden van een aantal PFAS

Perfluoralkyl (PFAS)	Geschatte halfwaardetijd
PFOA	2 – 10,1 jaar
PFOS	3,3 – 27 jaar
PFHxS	4,7 – 35 jaar
PFNA	2,5 – 4,3 jaar
PFBS	665 uur
PFBA	72 – 81 uur

3.3 Kunnen we blootstelling beperken?

De bevindingen van Nilsson (2022) laten zien hoe interventies ter beheersing van de blootstelling (bijvoorbeeld geen blusschuim gebruiken) in ieder geval de beroepsmatig verhoogde lichaamsconcentraties kunnen verminderen (Nilsson, 2022).

Verder kan drinkwater gefilterd worden door actieve koolfilters of membraanfilters (Panieri et al., 2022) te plaatsen die PFAS kunnen verwijderen.¹⁹

3.3.1 Stoppen met productie en gebruik

PFOS dat in blusschuim werd gebruikt, mag al sinds 2008 niet meer geproduceerd worden. Het alternatief PFOA mag sinds 2020 niet meer geproduceerd en gebruikt worden, vanwege de inmiddels bekende gezondheidsschade. Ondanks het verbod worden deze stoffen nog steeds teruggevonden in producten en in het milieu, en worden mensen er dus nog steeds aan blootgesteld. PFOA is vervangen door GenX, maar daarvan is nog niet bekend wat de mogelijke gezondheidsschade is.

Vervangen van de ene PFAS-verbinding door een andere PFAS-verbinding zou eigenlijk moeten worden vermeden. Niet alleen omdat vaak onduidelijk is of ze tot gezondheidsschade leiden (Panieri et al., 2022), maar ook omdat PFAS kunnen migreren naar vormen

¹⁹ Bron: <https://www.drinkwaterplatform.nl/7-vragen-over-pfas-in-drinkwater/>.

waarvan de schadelijkheid voor de gezondheid wel degelijk is vastgesteld (Van Tol, 2021). Er zou dus eigenlijk bepaald moeten worden welke PFAS verboden moeten worden en of alternatieven niet ook gezondheids-schade tot gevolg hebben. Het is echter de vraag of dit zinvol is, ten eerste omdat het niet mogelijk is voor elke afzonderlijke PFAS een onderzoek naar de schadelijkheid te starten (Van der Veen, 2022), en ten tweede omdat van PFAS bekend is dat ze persistent zijn en dus nauwelijks verdwijnen uit het milieu (Panieri et al., 2022). Een verbod op productie en gebruik van de groep PFAS als geheel lijkt dus zinniger. In sommige gevallen is er echter geen alternatief voorhanden. Dit geldt bijvoorbeeld voor PFAS in brandweerkleding, omdat een van de eisen bescherming tegen O-xyleen is. Dat is zonder PFAS (nog) niet mogelijk²⁰.

3.3.2 Contact vermijden

Als stoffen alom in het milieu voorkomen, is het onmogelijk om contact te vermijden. Maar als bekend is dat een gebied ernstig vervuild is met PFAS, is het wel van belang dit zo veel mogelijk te mijden, totdat het schoongemaakt is. (Panieri et al., 2022)

3.3.3 Omgeving reinigen

De kosten om drinkwaterbronnen, oppervlaktewater en bodem te reinigen, zijn hoog. Er wordt internationaal steeds meer onderzoek gedaan naar verschillende technieken om de bodem te saneren. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van thermische technieken of van verschillende stoffen die zich moeten binden aan PFAS. Een deel van de oplossing zit in het afschermen van de grond met een ondoordringbare laag, zodat de PFAS niet in het grondwater terecht kunnen komen, maar dat is natuurlijk nog geen definitieve oplossing (Panieri et al., 2022).

Volgens Panieri et al. (2022) wordt verwacht dat er aanzienlijke vooruitgang zal worden geboekt bij het ontwikkelen van steeds effectievere saneringstechnologieën om PFAS uit het milieu te halen op een kosteneffectieve en ecologisch duurzame manier (Panieri et al., 2022). Koolfilters, omgekeerde osmose en nanofiltratie zijn tot nu toe de meest effectieve methoden om PFAS uit het water te halen (Panieri et al., 2022). Verder toont recent onderzoek aan dat hennepplanten in staat zijn grote hoeveelheden PFAS uit de grond op te nemen (Nason et al., 2024).²¹

3.3.4 Persoonlijke bescherming

Persoonlijke (adem)beschermingsmiddelen kunnen ervoor zorgen dat de kans kleiner wordt dat PFAS via de ademhalingsroute binnenkomen in een omgeving waarvan bekend is dat er veel PFAS in de lucht zitten. Het moet dan wel zeker zijn dat er geen PFAS in de adembeschermingsmiddelen zitten. Beschermende kleding om huidopname te voorkomen is niet nodig, omdat de huid van ondergeschikt belang lijkt in de opname van PFAS door het lichaam (Van Tol, 2021).

²⁰ Bron: <https://www.vdp.com/NL/Nieuws/date/desc/1/3474/0/pfas-en-pbms-hoe-zit-dat-nu-precies.html>.

²¹ Bron: <https://www.uhasselt.be/nl/over-uhasselt/actueel/hennepplanten-kunnen-pfas-en-pfos-uit-de-grond-halen>.

4 Wat weten we nog niet?

Omdat PFAS-blootstelling sterk in de belangstelling staat, worden er vrijwel dagelijks nieuwe onderzoeksresultaten gepubliceerd. We komen dus steeds meer te weten over PFAS. Toch weten we, ook vanwege de enorme hoeveelheid aan PFAS zelf, nog heel veel niet en moeten we ook dagelijks onze kennis bijstellen. Hieronder wordt een willekeurige opsomming gegeven van dingen die we nu nog niet weten:

- > Meer inzicht is nodig in het grote aantal (potentiële) bronnen van PFAS en de mate van (achtergrond)blootstelling aan PFAS.
- > Het is onduidelijk wat de bijdrage is op de werkplek van orale, inhalatie en dermale blootstelling.
- > Het is onbekend hoeveel PFAS via ons dieet en de leefomgeving (met name via de binnen- en buitenlucht en huisstof) daadwerkelijk wordt opgenomen.
- > Er is nog weinig bekend over de giftigheid en schadelijke gezondheidseffecten voor mensen op de langere termijn van de nieuwere PFAS-verbindingen die inmiddels op grote schaal worden toegepast als vervangers van bijvoorbeeld PFOS of PFOA. Deze nieuwere PFAS-verbindingen kunnen in sommige gevallen in onze leefomgeving of het menselijk lichaam alsnog worden omgezet in bekende persistente PFAS-verbindingen zoals PFOS en PFOA (Van Tol, 2021).
- > Blootstelling aan hoge gehalten PFAS via de huid. Deze route is mogelijk relevanter dan tot op heden gedacht (Van Tol, 2021).

Dit document zal indien nodig worden geüpdatet met nieuwe informatie uit de wetenschappelijke literatuur.

5 Conclusies

PFAS zijn een groep chemische stoffen, die nauwelijks afbreekbaar zijn. PFAS worden gebruikt vanwege hun gunstige eigenschappen als vet- en waterafstotendheid en hittebestendigheid. Ze komen voor in allerlei producten die we dagelijks gebruiken. Doordat PFAS nauwelijks afbreekbaar zijn, vinden we ze niet alleen terug in onze omgeving, maar ook in ons voedsel. Inmiddels weten we dat PFAS kunnen leiden tot gezondheidsschade; daarom worden steeds meer stoffen uit de PFAS-familie verboden.

Doordat PFAS alom aanwezig zijn, vinden we bij bijna iedereen in de samenleving PFAS terug in het lichaam. Op basis van de huidige kennis zijn er veiligheidsgrenzen opgesteld aan wat nog toelaatbaar is aan PFAS in het lichaam. Naast de reguliere blootstelling aan PFAS is er soms ook sprake van beroepsmatige blootstelling. Dit geldt bijvoorbeeld voor brandweermensen, wier beschermende kleding PFAS bevat en die in het verleden mogelijk met PFAS-houdend blusschuim hebben gewerkt.

Onderzoek laat echter zien dat brandweerpersoneel geen hogere concentraties PFAS in het bloed heeft dan referentiepopulaties. Om die reden lijkt het nu niet nodig om grootschalig onderzoek uit te voeren bij het voltallige brandweerpersoneel naar PFAS-concentraties in het bloed. Wel is het belangrijk om de ontwikkelingen over PFAS-blootstelling bij te houden, omdat er dagelijks nieuwe kennis wordt gepubliceerd.

Bronnen

- Dahlbom, S., Bjarneemark, F., Nguyen, B., Petronis, S., & Mallin, T. (2024). Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) extraction from contaminated firefighting materials: Effects of cleaning agent, temperature, and chain-length dependencies. *Emerging Contaminants*, 10(3), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100335>
- DeLuca, N. M., Angrish, M., Wilkins, A., Thayer, K., & Hubal, E. A. C. (2021). Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review protocol. *Environment International*, 146, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106308>
- DIN 38414-14:2011-08. (2011). *German standard methods for the examination of water, waste water and sludge - Sludge and sediments (group S) - Part 14: Determination of selected polyfluorinated compounds (PFC) in sludge, compost and soil - Method using high performance liquid chromatography and mass spectrometric detection (HPLC-MS/MS) (S 14)*. DIN.
- European Union. (2017). COMMISSION REGULATION (EU) 2017/1000. *amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds*.
- European Union. (2020). COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2020/784. *amending Annex I to Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council as regards the listing of perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds*.
- Europese Unie. (2023). *Verordening (EU) 2023/915 van de Commissie van 25 april 2023 betreffende maximumgehalten aan bepaalde verontreinigingen in levensmiddelen en tot intrekking van Verordening (EG) nr. 1881/2006 (Voor de EER relevante tekst)*.
- Gezondheidsraad. (2024). *Meetprogramma voor blootstelling aan chemische stoffen 2024/07*. Den Haag: Gezondheidsraad.
- Maizel, A., Thompson, A., Tighe, M., Escobar Veras, S., Rodowa, A., Falkenstein-Smith, R., Benner Jr., B., Hoffman, K., Donnelly, M., Hernandez, O., Wetzler, N., Ngu, T., Reiner, J., Place, B., Kucklick, J., Rimmer, K., & Davis, R. (2024). *Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighter turnout gear textiles exposed to abrasion, elevated temperature, laundering, or weathering*. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.tn.2260>
- Maizel, A., Thompson, A., Tighe, M., Veras, S. E., Rodowa, A., Falkenstein-Smith, R., Benner, B. A., Jr, Hoffman, K., Donnelly, M. K., Hernandez, O., Wetzler, N., Ngu, T., Reiner, J., Place, B., Kucklick, J., Rimmer, K., & Davis, R. D. (2023). *Per- and polyfluoroalkyl substances in new firefighter turnout gear textiles*. <https://doi.org/10.6028/nist.tn.2248>
- Mazumder, N., Hossain, M. T., Jahura, F. T., Girase, A., Hall, A. S., Lu, J., & Ormond, R. B. (2023). Firefighters' exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as an occupational hazard: A review. *Frontiers in Materials*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1143411>

- Nason, S. L., Thomas, S., Stanley, C., Silliboy, R., Blumenthal, M., Zhang, W., Liang, Y., Jones, J. P., Zuverza-Mena, N., White, J. C., Haynes, C. L., Vasiliou, V., Timko, M. P., Berger, B. W. (2024). A Comprehensive Trial on PFAS Remediation: Hemp Phytoextraction and PFAS Degradation in Harvested Plants. *Environmental Science Advances*, 3(2), 304–313. <https://doi.org/10.1039/d3va00340j>
- Nielsen, F., Fischer, F. C., Leth, P. M., & Grandjean, P. (2024). Occurrence of Major Perfluorinated Alkylate Substances in Human Blood and Target Organs. *Environmental Science & Technology*, 58(1), 143-149. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06499>
- Nilsson, S. (2022). *Exposure of firefighters to PFAS (per and polyfluoroalkyl substances): serum concentrations and temporal trends after exposure control*. <https://doi.org/10.14264/d0f4a00>
- Pancras, T., Van Bentum, E., & Slenders, H. (2018). *Poly- en PerFluor Alkyl Stoffen (PFAS): Kennisdocument over stoffeigenschaften, gebruik, toxicologie, onderzoek en sanering van PFAS in grond en grondwater*. Expertisecentrum PFAS.
- Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Djordjevic, A. B., & Saso, L. (2022). PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment. *Toxics*, 10(2), 44. <https://doi.org/10.3390/toxics10020044>
- Paul, A. G., Jones, K. C., & Sweetman, A. J. (2008). A first global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate. *Environmental Science & Technology*, 43(2), 386–392. <https://doi.org/10.1021/es802216n>
- Peters, J., Berghmans, P., Jacobs, G., Voorpoels, S., Spruyt, M., Bertels, D., De Bouwere, K., Hofman, J., Hufkens, N., Poelmans, E., & Van Deun, M. (2022). *Studie naar PFAS in de lucht en deposities in de omgeving van 3M en Zwijndrecht*. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek.
- Plassmann, M., Benskin, J. P., Ankarberg, E. H., & Gyllenhammar, I. (2022). *Levels of ultra-short chain perfluoroalkyl substances (PFAS) in urine samples from first-time mothers in Uppsala, Sweden*. Department of Environmental Science and Analytical Chemistry (ACES), Stockholm University.
- Poothong, S., Papadopoulou, E., Padilla-Sánchez, J. A., Thomsen, C., & Haug, L. S. (2020). Multiple pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs): From external exposure to human blood. *Environment International*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105244>
- Ragnarsdóttir, O., Abdallah, M. A., & Harrad, S. (2024). Dermal bioavailability of perfluoroalkyl substances using in vitro 3D human skin equivalent models. *Environment International*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108772>
- Řiháčková, K., Pindur, A., Komprdová, K., Pálešová, N., Kohoutek, J., Šenk, P., Navrátilová, J., Andrášková, L., Šebejová, L., Hůlek, R., Ismael, M., & Čupr, P. (2023). The exposure of Czech firefighters to perfluoroalkyl substances and polycyclic aromatic hydrocarbons: CELSPAC – FIREexpo case-control human biomonitoring study. *Science Of The Total Environment*, 881, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163298>
- RIVM (2020). Conclusie RIVM gebruik EFSA-TWI PFAS, RIVM, Bilthoven.
- Rosenfeld, P. E., Spaeth, K. R., Remy, L. L., Byers, V., Muerth, S. A., Hallman, R. C., Summers-Evans, J., & Barker, S. (2023). Perfluoroalkyl substances exposure in firefighters: Sources and implications. *Environmental Research*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115164>
- Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., Del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L., Leblanc, J., Nebbia, C. S., Nielsen, E., Ntzani, E.,

- Petersen, A., Sand, S., Vleminckx, C., Wallace, H., Barregård, L., Ceccatelli, S., Cravedi, J., . . . Schwerdtle, T. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18(9).
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- Stahl, T., Mattern, D., & Brunn, H. (2011). Toxicology of perfluorinated compounds. *Environmental Sciences Europe*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/2190-4715-23-38>
- Team KAM. (2019). Resultaten uitgebreider bloedonderzoek C8. Gezamenlijke Brandweer.
- Trowbridge, J., Gerona, R. R., Lin, T., Rudel, R. A., Bessonneau, V., Buren, H., & Morello-Frosch, R. (2020). Exposure to Perfluoroalkyl Substances in a Cohort of Women Firefighters and Office Workers in San Francisco. *Environmental Science & Technology*, 54(6), 3363–3374. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05490>
- Van Tol, J. (2021). PFAS een groep stoffen van blijvende zorg. *NVvA Nieuwsblad*, 32(1), 10–17.
- Van Poll, R., Jansen, E., & Janssen, R. (2017). *PFOA measurements in blood: Measurements in the serum of people living near DuPont/Chemours in Dordrecht*. RIVM.
- Van der Veen, I. (2022). *Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in outdoor wear* [PhD-proefschrift]. Vrije Universiteit Amsterdam.
- Zhang, X., Sands, M., La Frano, M., Spinella, M. J., Masoud, F., Fields, C., Madak-Erdogan, Z., Jensen, T., & Irudayaraj, J. (2024). MicroRNAs and PFAS: A Pilot Study in Blood Collected from Firefighters. *bioRxiv (Cold Spring Harbor Laboratory)*.
<https://doi.org/10.1101/2024.04.05.588341>