

PFAS – ‚Ewige‘ Chemikalien und kein Ende

Teil 2 Toxikologie, Humanexposition, Forderungen

von Klaus Günter Steinhäuser und Ingo Valentin

Zusammenfassung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind langlebig und gefährlich für Mensch und Umwelt. Bereits bei geringen Konzentrationen schädigen sie Leber, Niere, Gehirn und das Immunsystem. Sehr niedrige Grenz- und Richtwerte für einige Vertreter unter anderem in Trinkwasser, Lebensmitteln und Blutserum spiegeln die Gefährlichkeit wider. Ein vollständiger Ausstieg aus den vermeidbaren Verwendungen dieser Stoffgruppe ist dringend erforderlich.

Schlüsselwörter: PFAS, Persistenz, Toxikologie, Humanexposition, Altlasten, Regulation

Abstract

PFAS - Forever chemicals and no end

Klaus Günter Steinhäuser and Ingo Valentin

Per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) are persistent and hazardous to humans and the environment. Very low limit and guideline values for some representatives in drinking water, food and blood serum, among others, reflect their hazardousness. A complete phase-out of the avoidable uses of this group of substances is urgently needed.

Keywords: PFAS, persistence, human exposure, contaminated sites, regulation

UMWELT & GESUNDHEIT 1 (2023) 7-12

In Teil 1 dieser Veröffentlichung wurden die Verwendungen, Anwendungen und Umweltaspekte der PFAS dargestellt. Nachfolgend werden die Wirkungen auf den Menschen, die Exposition des Menschen sowie regulatorische Anforderungen dargestellt.

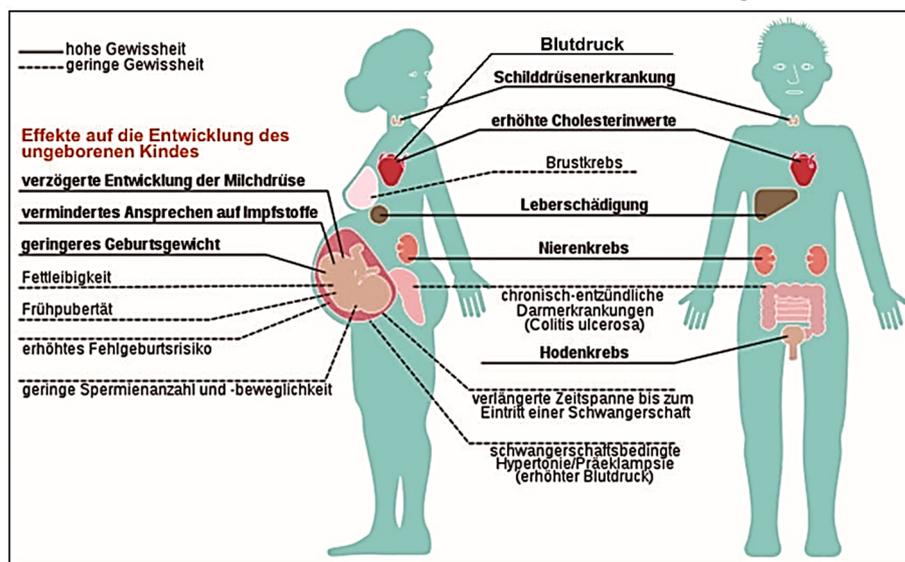
Toxikologie der PFAS

Bislang am besten untersucht sind perfluorierte Alkylcarbonsäuren und -sulfonsäuren mit einer Kettenlänge C6–C14. Für andere PFAS – zum Beispiel kurzkettige Vertreter, Telomeralkohole und -säuren sowie fluorierte Oxocarbonsäuren – liegen bislang nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. Die Wirkungen der PFAS sind sehr zahlreich und

[Spektrum 2020] Auch im enterohepatischen Kreislauf findet eine Rückführung von der Gallenflüssigkeit ins Blut statt. [Cao 2022] Dies trägt zur Bioakkumulation der PFAS im Körper bei.

Hervorzuheben sind die **Wirkungen der PFAS auf das Immunsystem**. Epidemiologische Studien an Kindern haben gezeigt, dass die Bildung von Impfantikörpern in Abhängigkeit von PFAS-Gehalten im Serum deutlich herabgesetzt ist. Die Resultate dieser Studien haben unter anderem zur toxikologischen Bewertung von vier PFAS (PFOA, PFOS, PFHxS und PFNA) durch die EFSA geführt. [EFSA 2020]

Ein wichtiges **Zielorgan** für PFAS ist die **Leber**. Untersuchungen von sieben



Toxikologische Wirkungen von PFAS auf den Menschen © <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7906952/>

Abbildung 1: Besonders relevante Wirkungen von PFAS auf den Menschen

Hintergrund

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind nicht-aromatische organische Chemikalien, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder großenteils (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind. Seit Ende der 1940er Jahre werden sie synthetisch hergestellt. PFAS kommen nicht natürlich vor, sondern sind ausschließlich anthropogenen Ursprungs. Insgesamt werden mehr als 4.700 Chemikalien zu den PFAS gezählt. [OECD 2018] Die Gesamtmenge allein der produzierten Fluorpolymere wird weltweit auf 238.000 t jährlich geschätzt.

unterschiedlich. Mehrere Reviews stellen die zahlreichen biologischen Wirkungen von PFAS auf Versuchstiere sowie auf den Menschen dar [Abbildung 1, Fenton et al. 2021, Stahl et al. 2011, US EPA 2021] Die PFAS Tox-Datenbank aus den USA enthält zahlreiche Angaben zu toxikologischen Untersuchungen mit PFAS: <https://pfastoxdatabase.org/>.

Insbesondere langkettige PFAS reichern sich im Körper an. Zwar sind die Nieren das Hauptausscheidungsorgan für PFAS, jedoch werden etwa 99,9% in den Nierenkanälchen erneut aufgenommen.

bis neunzehn Jahre alten Kindern und Jugendlichen weisen darauf hin, dass eine Exposition gegenüber PFAS mit dem Auftreten einer nicht alkoholischen Fettlebererkrankung (NAFLD) assoziiert ist. [Jin et al. 2020] Bereits die pränatale Exposition mit PFAS führt dosisabhängig vermehrt zu Lebererkrankungen bei Kindern. Allgemein wird ein Zusammenhang mit dem Auftreten von Leberkrebs gesehen.

Die Häufigkeit der anfangs symptomlosen **chronischen Nierenerkrankung (CKD)** ist weltweit im Anstieg begriffen

Schwerpunkt

und betrifft in Europa je nach Region etwa 1-17 % der Bevölkerung. [Brück et al. 2016] Fallkontrollstudien weisen auf eine Beeinträchtigung der Reinigungsfunktion der Niere hin, da mit zunehmenden PFAS-Werten im Blut die geschätzte glomeruläre Filtrationsrate abnimmt. Darüber hinaus gelten PFAS als Verursacher von Nierenkrebs und Hodenkrebs.

PFAS beeinflussen insbesondere die Spiegel der Schilddrüsen-, aber auch der Sexualhormone. [Xiao et al. 2020] PFAS zählen daher zu den **endokrinen Disruptoren**.

Besondere Beachtung verdienen die Auswirkungen auf die **Gehirnfunktion**. So berichten Chen et al. nach PFOS-Einwirkung vor der Geburt über eine verzögerte Entwicklung der Bewegungsabläufe (Grobmotorik) bei zweijährigen Kindern. [Chen et al. 2013] In epidemiologischen Untersuchungen wurde eine Beeinträchtigung der intellektuellen Leistungsfähigkeit nachgewiesen, vor allem bei vorgeburtlicher Exposition gegenüber PFAS. [Gallo et al. 2013]

Die EFSA wählte für Studien am Menschen vier Endpunkte als potenziell kritische Effekte von PFOS und/oder PFOA aus; dies sind ein Anstieg der LDL-Spiegel und des Gesamtcholesterins im Serum (Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen), ein Anstieg des Alanin Aminotransferase-Spiegels als ein Marker für Wirkungen auf die Leberzellen, reduzierte Geburtsgewichte sowie eine Beeinflussung des Immunsystems im Sinn der verminderten Bildung von Impfantikörpern. [EFSA 2020]

2008 publizierte die EFSA erstmals tolerierbare Werte für die tägliche Aufnahme (TDI) von PFOA und PFOS und erniedrigte die Werte bei einer Neubewertung 2018. 2020 erfolgte die vorläufige letzte Bewertung, basierend auf den Wirkungen auf das Immunsystem. [EFSA 2020] Dabei wurden PFOA, PFOS, PFNA und PFHxS zusammengefasst. Der tolerierbare Wert für die wöchentliche Aufnahme (TWI) für die Summe dieser vier PFAS wurde auf 4,4 ng/kg Körpergewicht (KG) pro Woche festgelegt. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der von der EFSA festgelegten TWI-Werte vom Jahr 2008 bis zum Jahr 2020. Diese Entwicklung zeigt, dass das übliche System, bei unvollständiger Datenlage die Unsicherheit durch Sicherheitsfaktoren zu minimieren, zumindest in diesem Fall nicht hinreichend funktionierte.

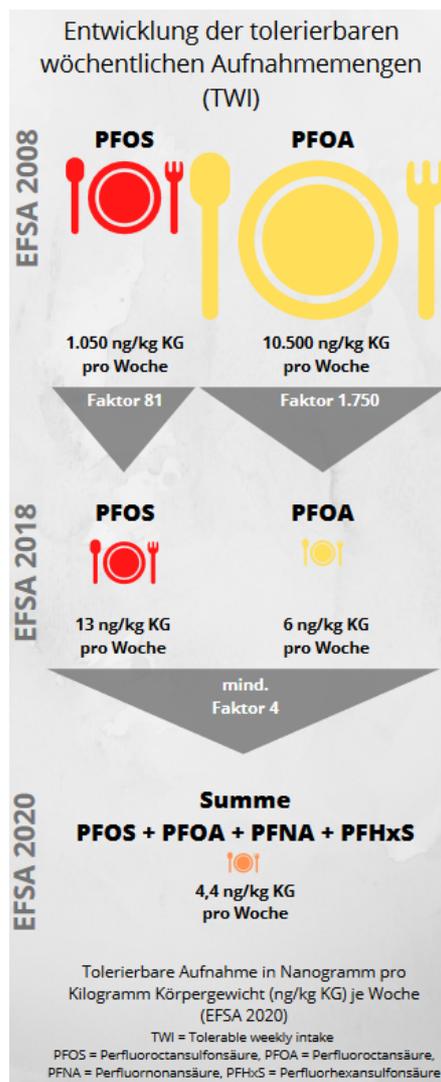


Abbildung 2: Mit zunehmendem Wissen über die schädlichen Wirkungen der PFAS wurden die Werte für die tolerierbare wöchentliche Aufnahme (TWI) kleiner. ©Eigene Darstellung nach Kowalczyk, BfR

Auch diese EFSA-Bewertung muss nicht das letzte Wort sein: Beispielsweise ist der Ansatz von Bil et al. zu prüfen und fortzuentwickeln; sie ermittelten für die Lebertoxizität die relativen Wirkstärken von 16 PFAS und schlugen vor, mit Hilfe von „Relative Potency Factors“ (RPF) die Wirkung von PFAS-Gemischen zu bestimmen. [Bil 2020] Das wissenschaftliche Komitee SCHEER der EU stimmte der Anwendung der RPF für die Ableitung von Umweltqualitätsnormen (UQN) zu und empfahl, sie auf den empfindlicheren Endpunkt Immuntoxizität zu beziehen. [SCHEER 2022] Aktuell schlägt die EU-Kommission im Rahmen der Novelisierung der UQN für Grundwasser und Oberflächengewässer vor, die RPF auf 24 PFAS anzuwenden und die UQN auf 4,4 ng/l PFAS für die gewichtete Summe festzulegen. [EU 2022]

Dringlich erscheint auch eine Bewertung der anderen im Serum vorkommenden PFAS. Hier wären insbesondere die kurzkettigen PFAS zu betrachten. Auch verdienen die zunehmend verwendeten perfluorierten Oxosäuren wie HFPO-DA, C6O4 und ADONA stärkere Beachtung.

Humanexposition

Die Belastung des Menschen mit PFAS lässt sich an den Gehalten im Blutserum erkennen. In einer groß angelegten Studie in neun europäischen Ländern (HBM4EU) wurden Jugendliche im Alter von 12-18 Jahren auf 12 unterschiedliche PFAS untersucht. Die Resultate zeigen abnehmende Serumgehalte von PFOA und PFOS, jedoch eine Zunahme der Gehalte anderer PFAS. [HBM4EU 2022] Eine deutsche Humanbiomonitoring-Studie an Kindern im Alter von 3 bis 17 Jahren, deren Blutplasma auf 12 PFAS untersucht wurde, zeigte, dass die Konzentrationen im Blutplasma bei 21 % der Kinder und Jugendlichen den HBM-I Wert von 2 ng/ml für PFOS und 7,3 % den HBM-I Wert von 5 ng/ml für PFOA überschritten. [Duffek et al. 2020] Unterhalb des HBM-I Wertes ist mit keiner gesundheitlichen Beeinträchtigung zu rechnen. Die HBM-II-Werte, oberhalb derer gesundheitliche Folgen möglich sind, wurden überwiegend nicht erreicht, lediglich bei 0,2 % der Teilnehmenden lagen die Konzentrationen von PFOS im Plasma über dem HBM-II Wert.

Hauptaufnahmequellen sind Lebensmittel einschließlich Trinkwasser sowie Innenraumluft einschließlich Hausstaub. Kürzlich wurde nachgewiesen, dass PFOA in einem Sonnenschutzmittel die Hautbarriere überwinden kann. [Abraham et al. 2022]

Kritisch ist auch die Weitergabe von PFAS in der Stillzeit von der Mutter auf das Kind. Studien in Deutschland [Fromme et al. 2010] und den USA [Zheng et al. 2021] zeigten Belastungen, bei denen sich gesundheitliche Folgen für die Säuglinge nicht ausschließen lassen.

Fisch, Fleisch und Erzeugnisse daraus sowie Eier und Eiprodukte tragen über deren alimentäre Aufnahme am meisten zur Exposition des Menschen bei. [EFSA 2020] Wegen der Anreicherung vor allem kurzkettiger PFAS in Nutzpflanzen ist auch diesem Aufnahmepfad verstärkte Beachtung zu widmen.

Schwerpunkt

Trinkwasser leistet mit etwa zehn Prozent einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Exposition des Menschen gegenüber PFAS, wobei Trinkwasserversorgungen im Abstrom von kontaminierten Flächen eine besondere Rolle spielen können.

Besonders gravierend sind die Einträge in die Umwelt bei Betrieben, die PFAS herstellen oder industriell verwenden, zum Beispiel bei der Verchromung und Bereichen, wo fluorhaltige Feuerlöschschäume eingesetzt wurden, zum Beispiel Flugplätzen. Trinkwasserversorgungen im Umkreis solcher Standorte sind besonders gefährdet. Nach umfangreichen Recherchen eines europaweiten Recherchekollektivs wurde im Februar 2023 erstmals eine interaktive Karte mit bekannten PFAS-Kontaminationen in Europa veröffentlicht. [Le Monde 2023]

Altlasten – Kontaminierte Standorte

Neben diffusen Einträgen über den Luftpfad sowie über Abwasser und Abfälle ist es in den letzten Jahrzehnten zu zahlreichen, teilweise massiven PFAS-Einträgen in Boden und Grundwasser durch sogenannte Punktquellen gekommen.

[Held et al. 2020] Eine besondere Bedeutung haben hierbei wasserfilmbildende **Löschschäume** (*Aqueous Film Forming Foam*, **AFFF**) mit PFOS als Filmbildner. Der Einsatz PFAS-haltiger Löschschäume bei der Brandbekämpfung hat weltweit vielerorts zu massiven Boden- und Grundwasserunreinigungen geführt, insbesondere an zivilen und militärischen Flughäfen. Auch im Rahmen von zivilen Löschübungen sind in der Vergangenheit große Mengen PFAS-haltiger Löschschäume freigesetzt worden. Ein weiterer großer Einsatzbereich von PFOS bestand als Netzmittel bei der **Verchromung** von Metall- und Kunststoffoberflächen in Galvaniken. In beiden Fällen werden nun häufig polyfluorierte Chemikalien anstelle von PFOS eingesetzt. Bei einer Bestandsaufnahme von PFAS-Kontaminationen des Bodens und Grundwassers in Nordrhein-Westfalen konnten 73 % der bis Mai 2021 gemeldeten Fälle nachweislich oder vermutlich dem Einsatz von Löschmitteln zugeordnet werden. 12 % der Fälle ließen sich auf Galvaniken zurückführen. [Mersmann 2021] Damit stammen 85 % der nachgewiesenen Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFAS aus einer dieser beiden Anwendungsbereiche.

Gelangen die PFAS über den Boden in das Grundwasser, können sie je nach

Beschaffenheit des Grundwasserleiters aufgrund ihrer Mobilität zu mehreren Kilometer langen Kontaminationsfahnen führen, Trinkwasserversorgungen gefährden sowie andere Nutzungen des Grundwassers, zum Beispiel zur Beregnung, beeinträchtigen.

Über derartige Punktquellen hinaus zählen einige großflächige PFAS-Belastungen von Boden und Grundwasser zu den massivsten bekannten Altlasten („*Mega Sites*“). Durch die Aufbringung von Kompost, der mit kontaminierten Papierschlammern hergestellt wurde, kam es im Raum Rastatt und Baden-Baden (Baden-Württemberg) zu massiven Verunreinigungen landwirtschaftlicher Böden, die sich über mehr als 1.000 ha erstrecken. [Klatt 2021] Auch von Produktionsstätten für Fluorpolymere in Gendorf (Bayern) und in Zentral-Venetien gehen sehr umfangreiche Boden- und Grundwasserkontaminationen aus, die zu einer regionalen PFAS-Belastung der Anwohner geführt haben. Eine Sanierung ist dort nicht mehr möglich, sondern nur eine Begrenzung des Schadens und der Ausbreitung.

Grundsätzlich ist die Sanierung von PFAS-Altlasten außerordentlich teuer, langwierig und meist wenig effektiv. Bei Grundwasserschäden wird häufig auf „*pump and treat*“ gesetzt, das heißt das Fördern des kontaminierten Grundwassers und dessen Behandlung zum Beispiel durch die Adsorption der PFAS an Aktivkohle.

Der neue Grenzwert der EU-Trinkwasser-Richtlinie von 0,1 µg/l wird für die Summe von 20 Einzelsubstanzen (Perfluoralkylcarbon- und -sulfonsäuren, C4–C13) gebildet. [EU 2020b] Schätzungen zufolge überschreiten diesen Wert etwa 3,8 % der Trinkwassergewinnungen in Deutschland. [Borchers 2023] Abgeleitet aus dem TWI-Wert der EFSA würde sich ein Grenzwert von nur 2,2 ng/l für die Summe der vier Einzelsubstanzen ergeben, wovon deshalb deutlich mehr Trinkwasserversorgungen betroffen wären. In der Novelle der deutschen Trinkwasserverordnung, die dem Bundesrat vorliegt, ist nun ein Grenzwert von 20 ng/l für die Summe der vier PFAS vorgesehen. Die US EPA geht noch weiter und hat für PFOA und PFOS vorläufige Orientierungswerte im Bereich von wenigen Pikogramm je Liter erarbeitet, die allerdings nicht verbindlich sind [US EPA 2022]. Der Vorschlag der WHO, für PFOA und PFOS jeweils 100 ng/l zuzulassen, liegt deutlich höher und wird mit der Schwierig-

keit der Wasseraufbereitung begründet. [WHO 2022] Im Rahmen der öffentlichen Konsultationen zu diesem Vorschlag wurde von Seiten des BUND deutliche Kritik daran geäußert. Auf Initiative des *Green Science Policy Institute* haben 116 Wissenschaftler diesen WHO-Vorschlag abgelehnt [Green Science Policy Institute 2022], darunter auch die Autoren dieses Beitrags.

Trifluoressigsäure (TFA)

Ultrakurze PFAS mit einer Kettenlänge C1 – C3 haben lange Zeit wenig Beachtung gefunden und werden auch durch die meisten Messprogramme nicht erfasst. Besonders verbreitet ist die Trifluoressigsäure (TFA), die eine Sonderstellung unter den PFAS einnimmt. TFA findet sich überall: in Niederschlägen, oberirdischen Gewässern, Grundwasser, Trinkwasser, Böden und in der Luft. Selbst in entlegenen Gewässern, in Bergregionen und in den Weltmeeren werden inzwischen Konzentrationen von 100 bis 600 ng/l gemessen. [Scheurer et al. 2017, Behringer et al. 2021] Das meiste TFA wird durch thermische Zersetzung von Fluorpolymeren wie PTFE [Ellis et al. 2001] und vor allem durch Abbauprozesse teilfluorierter Fluor (chlor)kohlenwasserstoffe wie 2,3,3,3-Tetrafluorpropen (R1234yf) – ein Kälte- und Treibmittel – gebildet.

Die diffusen Einträge von TFA in die Umwelt, insbesondere über Niederschläge, nehmen augenscheinlich zu. Modellierungen des UBA haben ergeben, dass sich in einem „*Business as usual*“-Szenario die TFA-Fracht über Niederschläge in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf 4 kg je km² und Jahr verzehnfachen würde. [Behringer et al. 2021] In Zeitreihen der Umweltprobenbank wurde ein Anstieg der TFA-Konzentrationen in Pappel- und Buchenblättern sowie Fichten- und Kiefernnadeln an verschiedenen Standorten in Deutschland festgestellt, seit zirka 1990 um den Faktor 5. [Freeling et al. 2022] Die Anreicherung auch in Nahrungspflanzen ist Anlass zur Besorgnis im Hinblick auf die Exposition des Menschen. [Zhang et al. 2019] Auch im Blutserum des Menschen finden sich vergleichsweise erhebliche Konzentrationen von TFA. Duan et al. [Duan et al. 2020] maßen im Serum chinesischer Erwachsener zirka 8,5 ng/ml TFA (Median). Da inzwischen der Verdacht auf Reproduktionstoxizität besteht, sind diese Befunde kritisch zu bewerten.

Regulation der PFAS

Die Erkenntnis, dass Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) die Ozonschicht in der Stratosphäre schädigen, führte bereits 1987 zur Verabschiedung des Montreal-Protokolls, des erfolgreichsten globalen Übereinkommens zur Beschränkung von Stoffen. Mit dem Beschluss von Kigali (Kigali Amendment) im Oktober 2016 wurden auch klimaschädliche (teilfluorierte) Fluorkohlenwasserstoffe durch dieses Abkommen erfasst. Das Stockholm-Übereinkommen, das persistente organische Schadstoffe (POPs) beschränkt oder verbietet, zählt inzwischen PFOA, PFOS und PFHxS samt mehrerer Vorläufersubstanzen zu den Stoffen, deren Produktion und Verwendung weltweit beendet werden soll. In der Basel Konvention, welche die grenzüberschreitende Verbringung gefährlicher Abfälle regelt, werden Maximalwerte für POP-haltige Abfälle festgelegt.

Die EU hat diese internationalen Vereinbarungen in europäisches Recht umgesetzt und darüber hinaus weitere PFAS wie PFBS und HFPO-DA gemäß REACH-Verordnung in die Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC) aufgenommen, was bedeutet, dass ihre Verwendungen künftig einer Zulassung bedürfen.

In Zukunft beabsichtigt die EU eine Regulierung der PFAS, die nicht mehr einzelstoffbezogen ist, sondern möglichst viele Vertreter umfasst. Die European Chemicals Agency (ECHA) unterbreitete im März 2022 einen Vorschlag, Herstellung und Verwendung sämtlicher PFAS in Schaumlöschmitteln in einer Konzentration > 1 ppm innerhalb von zehn Jahren stufenweise zu verbieten. [ECHA 2022]

Darüber hinaus hat die EU-Kommission bereits 2020 in ihrer Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit eine Beschränkung aller PFAS als Gruppe angekündigt [EU 2020a]. Am 07. Februar 2023 veröffentlichte die ECHA den Entwurf eines Beschränkungs dossiers für die gesamte Stoffgruppe der PFAS, der von Deutschland, Niederlande, Dänemark, Schweden und Norwegen ausgearbeitet wurde. [ECHA 2023] Danach ist vorgesehen, bis auf wenige befristete Ausnahmen Herstellung und Gebrauch aller PFAS zu verbieten. Fluorierte Gase sind ebenso einbezogen wie Fluorpolymere, nicht jedoch Wirkstoffe in Pestiziden,

Bioziden und Arzneimitteln, da sie anderen gesetzlichen Regelungen unterliegen. Zeitaufwändige und kontroverse Diskussionen sind zu erwarten. Falls die Regelung in Kraft tritt, wäre dies ein entscheidender erster Schritt zur Lösung des PFAS-Problems. Aufgrund der umweltoffenen Anwendung von Pestiziden und Bioziden müsste von Seiten der EU aber auch zum Beispiel über das Pflanzenschutzrecht ein Verbot von PFAS-Verbindungen vorangetrieben werden.

Da europäisches Recht Beschränkung und Verbot der Herstellung und des Gebrauchs von Chemikalien regelt, sind nationale Regulierungen durch die EU-Mitgliedstaaten selten. So hat Dänemark die Verwendung von PFAS in Lebensmittelkontaktmaterialien weitgehend verboten und einen Indikatorwert von 20 mg Fluor/kg im Verpackungsmaterial festgelegt. [Ministry of Environment and Food DK 2020] Bis europäische Verbote wirksam werden, wäre auch eine Kennzeichnungspflicht für Verbraucherprodukte sinnvoll.

Die Veröffentlichung einer maximal tolerierbaren Wochendosis von 4,4 ng/kg KG für die Summe der vier im Serum prominentesten PFAS durch die EFSA verdeutlicht die Notwendigkeit, bestehende Grenz- und Richtwerte auf ihre Vereinbarkeit mit dieser toxikologisch begründeten Festlegung zu überprüfen. Insgesamt stellen sich die Grenz- und Richtwerte uneinheitlich dar. Mal beziehen sie sich auf bestimmte Einzelsubstanzen (insbesondere PFOA und PFOS), mal ist es ein Summenwert oder wie oben beschrieben ein gewichteter Summenwert von bis zu 24 Einzelsubstanzen, der zu überwachen ist. Eine einheitliche Bewertungsgrundlage ist nicht zu erkennen.

Die Rolle der Umweltverbände

Weltweit warnen eine Vielzahl von Umweltorganisationen wie das oben bereits angesprochene *Green Science Policy Institute* vor PFAS. In Deutschland hat der BUND bereits 2015 mit seiner Publikation „Fluor: Praktisch, langlebig und giftig“ insbesondere die Konsumentinnen und Konsumenten nahen Produkte kritisch betrachtet. [BUND 2015] *CHEM Trust Europe* e.V. hat mit der Publikation „PFAS – die ewigen Chemikalien“ 2019 den Kenntnisstand über die Gesundheitsgefahren zusammengefasst, die von den PFAS ausgehen. [ChemTrust 2019]

Der BUND hat im Dezember 2021 im Hintergrundpapier „Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar“ als zentralen Punkt einen Ausstieg aus allen PFAS-Verwendungen bis 2030, vorrangig bei den verbrauchernahen Anwendungen, gefordert. [BUND 2021a] Diese und weitere Forderungen werden ausführlich begründet, die Eigenschaften, Anwendungen und Vorkommens der PFAS dargestellt sowie bestehende Regelungen und die analytischen Grenzen aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Problematik kontaminierter Standorte mit PFAS und bestehende Möglichkeiten zur Sanierung sowie der bestehende Forschungsbedarf benannt.

Im Mai 2021 hat der BUND gemeinsam mit europäischen Partnerorganisationen den „PFAS-Verpackungscheck“. [Straková et al. 2021] veröffentlicht. Im Ergebnis enthielten fast alle untersuchten Essensverpackungen aus europäischen Fast-Food-Restaurants PFAS in erheblichen Konzentrationen.

Auch das Thema PFAS in Kosmetika greift der BUND auf. So hat zum Beispiel eine Kosmetikfirma nach BUND-Intervention ein Produkt, das die verbotene Substanz PFOA freisetzt, vom deutschen Markt genommen. [BUND 2021b] Eine aktuell durchgeführte Marktrecherche des BUND belegt, dass heute noch zugelassene Fluorchemikalien Bestandteil vieler herkömmlicher Kosmetik- und Körperpflegeprodukte sind. [BUND 2022a] Einen solchern PFAS-Check kann man mit der aktuellen Version der ToxFox-App des BUND auch selbst durchführen. Kosmetik- und Körperpflegeprodukte können damit auf PFAS-Bestandteile überprüft werden. Sollte ein Produkt einen dieser Stoffe enthalten, können sich die Nutzerinnen und Nutzer über die App an den Hersteller oder die Drogerie wenden und den Verzicht auf den gefährlichen Stoff fordern: www.bund.net/toxfax. [BUND 2022b]

Aktuell fordern mehrere europäische Organisationen der Zivilgesellschaft die EU-Mitgliedstaaten und die Kommission nachdrücklich auf, alle PFAS in Konsumgütern bis 2025 zu verbieten und bis 2030 ein vollständiges Verbot zu implementieren. Bisher haben rund 80 Organisationen das Manifest für ein dringendes Verbot der „ewigen Chemikalien“ PFAS unterzeichnet. [Manifesto 2022]

Schlussfolgerungen

PFAS sind eine Stoffgruppe, die aus mehreren tausend Chemikalien besteht und in der Technosphäre vielfach eingesetzt wird. Sie haben eines gemeinsam: sie werden zu den „forever chemicals“ gezählt, weil sie sich durch eine außergewöhnlich hohe Persistenz über Jahrzehnte bis Jahrhunderte auszeichnen. Manche werden transformiert, aber immer bleibt ein perfluoriertes Molekül.

Einige PFAS sind inzwischen welt- oder europaweit beschränkt oder verboten. Allerdings sind Maßnahmen zur Risikoreduzierung einzelner PFAS keine Lösung angesichts der Vielzahl der Verwendungen in nahezu allen Produktions- und Lebensbereichen und eingedenk der Neigung der Hersteller, PFAS, die in Verruf geraten, durch andere, weniger gut untersuchte Vertreter dieser Stoffgruppe zu ersetzen. Die Eigenschaften der PFAS verdeutlichen, dass diese Stoffe nicht beherrschbar sind und alles unternommen werden muss, PFAS zu vermeiden. Letztlich muss der vollständige Verzicht das ultimative Ziel sein. Richtigerweise beabsichtigt die EU eine Regulierung der gesamten Stoffgruppe.

Folgende Argumente sprechen für eine umfassende Regulierung:

- PFAS sind nicht abbaubar und verbleiben in der Umwelt Jahrzehnte bis Jahrhunderte.
- PFAS schädigen den Menschen und die Lebewesen in der Umwelt bereits bei sehr niedrigen Konzentrationen.
- PFAS breiten sich vom Ort ihres Eintrags weiträumig aus und werden heute auch in emissionsfernen Gebieten in allen Umweltmedien, Biota und Menschen nachgewiesen.
- Die dabei festgestellten Kontaminationen überschreiten sehr häufig toxikologisch begründete Grenz- und Richtwerte, zum Beispiel für Trinkwasser, im Serum oder Qualitätsnormen für Grundwasser.
- PFAS verhindern ein schadstoffreies Recycling durch Verschleppung in Sekundärrohstoffe und eine gesicherte Abfallentsorgung.
- Die Sanierung eingetretener Schäden ist aufwändig, teuer und häufig wenig wirksam.

PFAS und ihr Ersatz durch fluorfreie Alternativen sind eine Herausforderung für die wissenschaftliche Forschung. Dies betrifft die Entwicklung fluorfreier Alternativen für heute noch essentielle Anwendungen ebenso wie die wissenschaftliche Ableitung von Grenz- und Richtwerten für weitere expositionsrelevante PFAS, insbesondere auch im Hinblick auf die tolerierbare wöchentliche Aufnahme (TWI) für kurzkettige PFAS und fluorierte Oxocarbon- und -sulfonsäuren in Zusammenhang mit deren Anreicherung in Nutzpflanzen.

Eine möglichst rasche Reduktion des Einsatzes der PFAS ist aber nicht nur durch staatliche Verbote und Beschränkungen zu erreichen. Die PFAS-Hersteller und gewerblichen Verwender sowie Handelsfirmen sind aufgerufen, verzichtbare PFAS-Anwendungen zu identifizieren sowie Alternativen anzubieten und zu verwenden. Die Identifizierung fluorfreier Alternativen wird nur mit einer gemeinsamen Anstrengung von Herstellern, gewerblichen Verwendern und Forschung gelingen. Staatliche Vorgaben und Anreize, zum Beispiel auch eine Produktkennzeichnung für verbraucher-nahe Anwendungen, können den Prozess beschleunigen.

Dank

Wir danken den Arbeitskreisen Umweltchemikalien und Toxikologie und Bodenschutz/Altlasten des BUND sowie der Bundesgeschäftsstelle für zahlreiche Diskussionen und Anregungen, insbesondere *Gottfried Arnold, Hubertus Brunn, Manuel Fernández, Wolfgang Körner* und *Gerd Rippen*.

Korrespondenzadresse

Dr. Klaus Günter Steinhäuser

Derfflingerstr. 14

12249 Berlin

Tel.: +491727607739

Email: klaus.guenter.steinhaeuser@bund.net

Literatur:

Abraham K, Monien B: Transdermal absorption of 13C4-perfluorooctanoic acid (13C4-PFOA) from a sunscreen in a male volunteer – What could be the contribution of cosmetics to the internal exposure of perfluoroalkyl substances (PFAS)? *Environ Int* **169** (2022) 107549. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107549>

Behringer D, Heydel F, Gschrey B, Osterheld S, Schwarz W, Warncke K, Freeling F, Nödler K, Blepp M, Jörß W, Liu R, Ludig S, Rüdener I,

Gartiser S: Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential. *Umweltbundesamt* (ed): *Texte 73/2021*, (Dessau-Roßlau Mai 2021) 259 p. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistent-degradation-products-of-halogenated>

Bil W, Zeilmaier M, Fragki S, Lijzen J, Verbruggen E, Bokkers B: Risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substance mixtures: A relative potency factor approach. *Environ Toxicol Chem* **40** 3 (2020) 859–70

Borchers U: PFAS im Trinkwasser – gesetzliche Regelung, Toxikologie und Überblick über Befunde. *Mitt Umweltchem Ökotox* **29** 1 (2023) 3-8

Brück K, Stel VS, Gambaro G, Hallan S, Völzke H, Ärnlov J, Kastarinen M, Guessous I, Vinhas J, Stengel B, Brenner H, Chudek J, Romundstad S, Tomson C, Gonzalez AO, Bello AK, Ferrieres J, Palmieri L, Browne G, Capuano V, van Biesen W, Zoccali C, Gansevoort R, Navis G, Rothenbacher D, Ferraro PM, Nitsch D, Wanner C, Jager KJ: CKD prevalence varies across the European general population. *J Am Soc Nephrol* **27** 7 (2016) 2135-47. <https://doi.org/10.1681/ASN.2015050542>

BUND (2015): Praktisch, langlebig, giftig – Organische Fluorverbindungen in Alltagsprodukten, in der Umwelt und im menschlichen Körper: Bewertung und Konsequenzen für Politik und VerbraucherInnen. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/fluor_studie.pdf (abgerufen 18. November 2022)

BUND (2021a): Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_fluorchemikalien_hintergrund.pdf (abgerufen 18. November 2022)

BUND (2021b): Gefährliche Fluorchemikalien: Kosmetikfirma nimmt Produkt nach BUND-Intervention vom Markt. <https://www.bund.net/themen/aktuelles/detail-aktuelles/news/gefahrlische-fluorchemikalien-kosmetikfirma-nimmt-produkt-nach-bund-intervention-vom-markt/> (abgerufen 18. November 2022)

BUND (2022a): So können Sie Fluorchemikalien in Kosmetik vermeiden. <https://www.bund.net/bund-tipps/detail-tipps/tip/so-koennen-sie-fluorchemikalien-in-kosmetik-vermeiden/> (abgerufen 18. November 2022)

BUND (2022b): Chemie auf der Haut: Die Tox Fox-App des BUND erkennt jetzt Ewigkeits-Chemikalien PFAS in Kosmetik- und Körperpflegeprodukten. <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/chemie-auf-der-haut-die-toxfox-app-des-bund-erkennt-jetzt-ewigkeits-chemikalien-pfas-in-kosmetik-und-koerperpflegeprodukten/?wc=20553> (abgerufen 18. November 2022)

Cao H, Zhou Z, Hu Z, Wei C, Li J, Wang L, Liu G, Zhang J, Wang Y, Wang T, Liang Y: Effect of enterohepatic circulation on the accumulation of per- and polyfluoroalkyl substances: evidence from experimental and computational studies. *Environ Sci Technol* **56** (2022) 3214-24. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07176>

ChemTrust (2019): PFAS, die 'ewigen Chemikalien' - Unsichtbare Bedrohung durch persistente Chemikalien. https://chemtrust.org/de/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/CHEM-Trust-PFAS_Briefing_German_final.pdf (abgerufen 18. November 2022)

Chen MH, Ha EH, Liao HF, Jeng SF, Su YN, Wen TW, Lien GW, Chen CY, Hsieh WS, Chen PC: Perfluorinated compound levels in cord blood and neurodevelopment at 2 years of age. *Epidemiology* **24** 6 (2013) 800-8, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24036611>

Duan Y, Sun H, Yao Y, Meng Y, Li Y: Distribution of novel and legacy per-/ polyfluoroalkyl substances in serum and its associations with two glycaemic biomarkers among Chinese adult men and women with normal blood glucose levels. *Environ Int* **134** (2020)105295. doi.org/10.1016/j.envint.2019.105295

Duffek A, Conrad A, Kolossa-Gehring M, Lange R, Rucic E, Schulte C, Wellmitz J: Per- and polyfluoroalkyl substances in blood plasma – Results of the German Environmental Survey for children and adolescents 2014–2017 (GerES V). *Int J Hyg Environ Health* **228** (2020)113549. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113549>

ECHA (2022): Annex XV Restriction report, Proposal for a restriction (of) per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in firefighting foams, Version number 2.0, Date 23 March 2022. 211 p. https://echa.europa.eu/documents/10162/0/rest_pfas_fff_axvreport_en.pdf/5ee6f85d-8339-cf1c-34c8-cfcb2861bde7?t=1645608390512 (abgerufen 18. November 2022)

ECHA (2023): Registry of restriction intentions until outcome – Per- and polyfluorinated substances (PFAS). <https://echa.europa.eu/en/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b> (abgerufen 24. Februar 2023)

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM): Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal* **18** 9 (2020) 6223. 1931p <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6223> (abgerufen 18. November 2022)

EU (2020a): Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit, Für eine schadstofffreie Umwelt, 14. Oktober 2020, COM (2020) 667 final, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f815479a-0f01-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (abgerufen 18. November 2022)

Ellis DA, Mabury SA, Martin JW, Muir DC: Thermolysis of fluoropolymers as a potential source of halogenated organic acids in the environment, *Nature* **412** 6844 (2001) 321-4. DOI: 10.1038/35085548

EU (2020b): Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&from=DE> (abgerufen 18. November 2022)

EU (2022): Proposal for a directive of the European Parliament and of the council amending directive 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy, Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration and Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy – Annex III and V, COM (2022) final, https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12662-Integrated-water-management-revised-lists-of-surface-and-groundwater-pollutants_en (abgerufen 18. November 2022)

Fenton SE, Ducatman A, Boobis A, DeWitt JC, Lau C, Ng C, Smith JS, Roberts SM: Per and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: current state of knowledge and

strategies for informing future research. *Environ Toxicol Chem* **40** 3 (2021) 606-30. <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etc.4890> (abgerufen 18. November 2022)

Freeling F, Scheurer M, Koschorreck J, Hoffmann G, Ternes TA, Nöddler K: Levels and Temporal Trends of Trifluoroacetate (TFA) in Archived Plants: Evidence for Increasing Emissions of Gaseous TFA Precursors over the Last Decades. *Environ Sci Technol Lett* **9** (2022) 400-5. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00164>

Fromme H, Mosch C, Morovitz M, Alba-Alejandre I, Boehmer S, Kiranoglu M, Faber F, Hannibal I, Genzel-Boroviczeny O, Koletzko B, Völkel W: Pre- and postnatal exposure to perfluorinated compounds (PFCs). *Environ Sci Technol* **44** 18 (2010) 7123-9. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20722423/> (abgerufen 18. November 2022)

Gallo V, Leonardi G, Brayne C, Armstrong B, Fletcher T: Serum perfluoroalkyl acids concentrations and memory impairment in a large cross-sectional study. *BMJ Open* **3** (2013) e002414. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-002414>

Green Science Policy Institute (2022): 116 scientists reject WHO's draft PFAS guidelines, <https://greensciencepolicy.org/news-events/press-releases/116-scientists-reject-whos-draft-pfas-guidelines> (abgerufen 18. November 2022)

HBM4EU (European Human Biomonitoring Initiative) (2022): Policy Brief PFAS. https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2022/06/HBM4EU_Policy-Brief-PFAS.pdf (abgerufen 18. November 2022)

Held T, Reinhard M: Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen. in: Umweltbundesamt Texte 137 (2020), <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sanierungsmanagement-fuer-lokale-flaechenhafte-pfas> (abgerufen 18. November 2022)

Jin R, McConnell R, Catherine C, Xu S, Walker LI, Stratakis N, Jones DP, Miller GW, Peng C, Conti DV, Vos MB, Chazai L: Perfluoroalkyl substances and severity of nonalcoholic fatty liver in children: An untargeted metabolomics approach. *Environ Int* **134** (2020) 105220. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105220>

Klatt P: PFAS/PFC in Mittelbaden – Globale Umweltgifte werden zum regionalen Problem. (2021) 45 p. <https://pfas-dilemma.info/images/PFAS-Broschuere.pdf> (abgerufen 18. November 2022)

Manifesto (2022): Manifest für ein dringendes Verbot der „ewigen Chemikalien“ PFAS. <https://banpfasmanifesto.org/de/> (abgerufen 18. November 2022)

Le Monde (2023): 'Forever pollution': Explore the map of Europe's PFAS contamination. (23. Februar 2023) https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination_6016905_8.html (abgerufen 24. Februar 2023)

Mersmann M: PFAS-Situation in NRW: Bestandsaufnahme punktueller Fälle und Hintergrundbelastungen. Fälle mit PFAS-Belastungen im Boden und Grundwasser in Nordrhein-Westfalen (Stand: Mai 2021). BEW-Seminar PFAS in Boden und Grundwasser. (Duisburg: 2021). https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/uploads/PFAS-Bestandsaufnahme_Bericht_f%C3%BCr_Homepage.pdf (abgerufen 18. November 2022)

Ministry of Environment and Food Denmark, Danish Veterinary and Food Administration: Ban on fluorinated substances in paper and board food contact materials (FCM). Fact Sheet (June 2020). <https://www.foedevarestyrelsen.dk/english/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/UK-Fact-sheet-fluorinated-substances.pdf> (abgerufen 18. November 2022)

<https://www.foedevarestyrelsen.dk/english/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/UK-Fact-sheet-fluorinated-substances.pdf> (abgerufen 18. November 2022)

Scheurer M, Nöddler K, Freeling F, Janda J, Hapfel O, Riegel M, Müller U, Storck FR, Fleig M, Lange FT, Brunsh A, Brauch HJ: Small, mobile, persistent: trifluoroacetate in the water cycle - overlooked sources, pathways, and consequences for drinking water supply. *Water Res* **126** (2017) 460-71

Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER): Scientific opinion on "draft environmental quality standards for priority substances under the water framework directive" – PFAS. (2022) https://health.ec.europa.eu/publications/scheer-scientific-opinion-draft-environmental-quality-standards-priority-substances-under-water_en (abgerufen 18. November 2022)

Spektrum: PFAS: Umweltgifte für die Ewigkeit. (20. April 2020) <https://www.spektrum.de/wissen/pfas-umweltgifte-fuer-die-ewigkeit/1724648> (abgerufen 18. November 2022)

Stahl T, Mattern D, Brunn H: Toxicology of Perfluorinated Compounds. *Environ Sci Eur* **23** (2011) 38 <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-23-38>. DOI:10.1186/2190-4715-23-38

Straková J, Schneider J, Cingotti N: Throwaway Packaging, Forever Chemicals: European wide survey of PFAS in disposable food packaging and tableware. (2021) https://chemtrust.org/wp-content/uploads/CHE_PFAS_FCM_15July2021_Final.pdf (abgerufen 18. November 2022)

US EPA (2021): Our current understanding of the human health and environmental risks of PFAS. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are a group of manufactured chemicals. <https://www.epa.gov/pfas/our-current-understanding-human-health-and-environmental-risks-pfas> (abgerufen 18. November 2022)

US EPA, Office of Water: Lifetime drinking water Health advisories for four perfluoroalkyl substances [FRL 9855-01-OW]. Federal Register **87** 118 (2022) 36848-9. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-06-21/pdf/2022-13221.pdf>

WHO (2022): PFOS and PFOA in drinking-water - background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. Version for public review. WHO/SDE/WSH/XXX. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/pfos-pfoa-gdwq-bd-working-draft-for-public-review-29.9.22.pdf?sfvrsn=eac28c23_3 (abgerufen 18. November 2022)

Xiao C, Grandjean P, Valvi D, Nielsen F, Jensen TK, Weihe P, Oulhote Y: Associations of exposure to perfluoroalkyl substances with thyroid hormone concentrations and birth size. *J Clin Endocrinol Metab* **105** 3 (2020) 735-45. DOI:10.1210/clinem/dgz147

Zhang L, Sun H, Wang Q, Chen H, Yao Y, Zhao Z, Alder AC: Uptake mechanisms of perfluoroalkyl acids with different carbon chain lengths (C2-C8) by wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sci Total Environ* **654** (2019) 19–27. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.443

Zheng G, Schreder E, Dempsey JC, Uding N, Chu V, Andres G, Sathyanarayana S, Salamova A: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in breast milk: concerning trends for current-use PFAS. *Environ Sci Technol* **55** 11 (2021) 7510-20. DOI:10.1021/acs.est.0c06978