

Vorkommen und Quellen von PFAS in der Umwelt und aktuelle Regelungsansätze

Occurrence and sources of PFAS in the environment and current regulatory approaches

ZUSAMMENFASSUNG

PFAS kommen nicht natürlich vor. Durch ihre vielfältigen Verwendungen und durch ihre Persistenz reichern sie sich in der Umwelt an und verteilen sich weltweit. Sie gelangen während der Herstellung, der Ausrüstung und des Gebrauches von PFAS-haltigen Produkten sowie über Abwasser und Abluft in die Umwelt – und aus der Umwelt in Nahrungsmittel. Bei einigen PFAS sind schädliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit nachgewiesen. Da Menschen PFAS vorrangig über Nahrungsmittel aufnehmen, hat die Europäische Nahrungsmittelbehörde EFSA tolerierbare wöchentliche Aufnahmeraten und Grenzwerte für bestimmte Lebensmittel abgeleitet. Der Artikel enthält zudem Informationen zu weiteren neuen Regelungen, zum Beispiel in Bezug auf Trinkwasser, Grundwasser und Boden.

ANNEGRET BIEGEL-
ENGLER, ALEXANDER
KÄMPFE, CHRISTOPH
SCHULTE

ABSTRACT

PFASs do not occur naturally. Due to their multiple uses and their persistence, they accumulate in the environment and spread worldwide. They enter the environment during the manufacture, finishing and use of products containing PFAS, as well as through wastewater and exhaust air - and from the environment into food. Some PFASs have been shown to have adverse effects on human health. Because humans primarily ingest PFASs through food, the European Food Safety Authority (EFSA) has derived tolerable weekly intake rates and limits for specific foods. The article also provides information on other new regulations, such as those related to drinking water, groundwater and soil.

PFAS-EINTRÄGE IN DIE UMWELT

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS, früher mit PFC (per- und polyfluorierte Chemikalien) oder mit PFT (perfluorierte Tenside) abgekürzt) werden seit den 1950er Jahre in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Nach einer Definition der OECD/UNEP Global PFC Group zählen alle chemischen Verbindungen mit mindestens einem vollständig fluorierten Methyl- oder Methylenkohlenstoffatom (ohne Bindung zu Wasserstoff- oder weiteren Halogenatomen) zur

Stoffgruppe PFAS (OECD, 2021). Die Stoffe zeigen sowohl wasser- als auch fettabweisende Eigenschaften bei gleichzeitig sehr hoher chemischer Widerstandsfähigkeit gegen verschiedenste Einflüsse. PFAS mit zusätzlichen polaren funktionellen Gruppen wurden und werden auch als Spezialtenside, zur Oberflächenmodifizierung, in Feuerlöschschäumen, in der Galvanik und vielem anderen mehr eingesetzt. Die aus technischer Sicht vorteilhafte Beständigkeit erweist sich in Bezug auf das Umweltverhalten als großer Nachteil dieser Stoffe, da ihre Persistenz und ihre „Nichtzurückholbarkeit“ aus der Umwelt in



Quelle: adragan/stock.
adobe.com.

Verbindung mit zum Teil schädliche Wirkungen und einem Potenzial zur Anreicherung im menschlichen Körper und in Nahrungsketten ein lange Zeit unterschätztes Risiko darstellen. Daher wird die Diskussion um die sichere Verwendung der PFAS und Optionen, die Einträge in die Umwelt zu minimieren, immer intensiver. Die Mannigfaltigkeit dieser Substanzen stellt Regulierungsansätze vor zahlreiche Herausforderungen. Bislang sind nur wenige der mehr als 4.700 PFAS international oder auf EU-Ebene reguliert, das heißt ein Großteil der Stoffe wird in der Industrie verwendet und kann während der Herstellung, der Weiterverarbeitung, des Gebrauches und der Entsorgung von Produkten in die Umwelt ausgetragen werden (ABBILDUNG 1).

Über das häusliche und gewerbliche Abwasser gelangen PFAS in Kläranlagen (Toshovski, 2020). Von dort werden manche PFAS über behandeltes Abwasser in Oberflächengewässer eingetragen oder im Klärschlamm gebunden. PFAS-haltige Abfälle auf Deponien können bei unzureichender Deponieabdichtung, Leckagen oder unzureichender Sickerwasseraufbereitung punktuell zu Einträgen in die Umwelt führen (LAWA/LABO, 2021).

PFAS-Einträge in Böden können aus vielfältigen Quellen resultieren, zum Beispiel aus der Ausbringung mit PFAS-verunreinigten Düngemitteln wie Klärschlamm auf Ackerflächen, der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit belastetem Grundwasser oder umgelagertem PFAS-belasteten

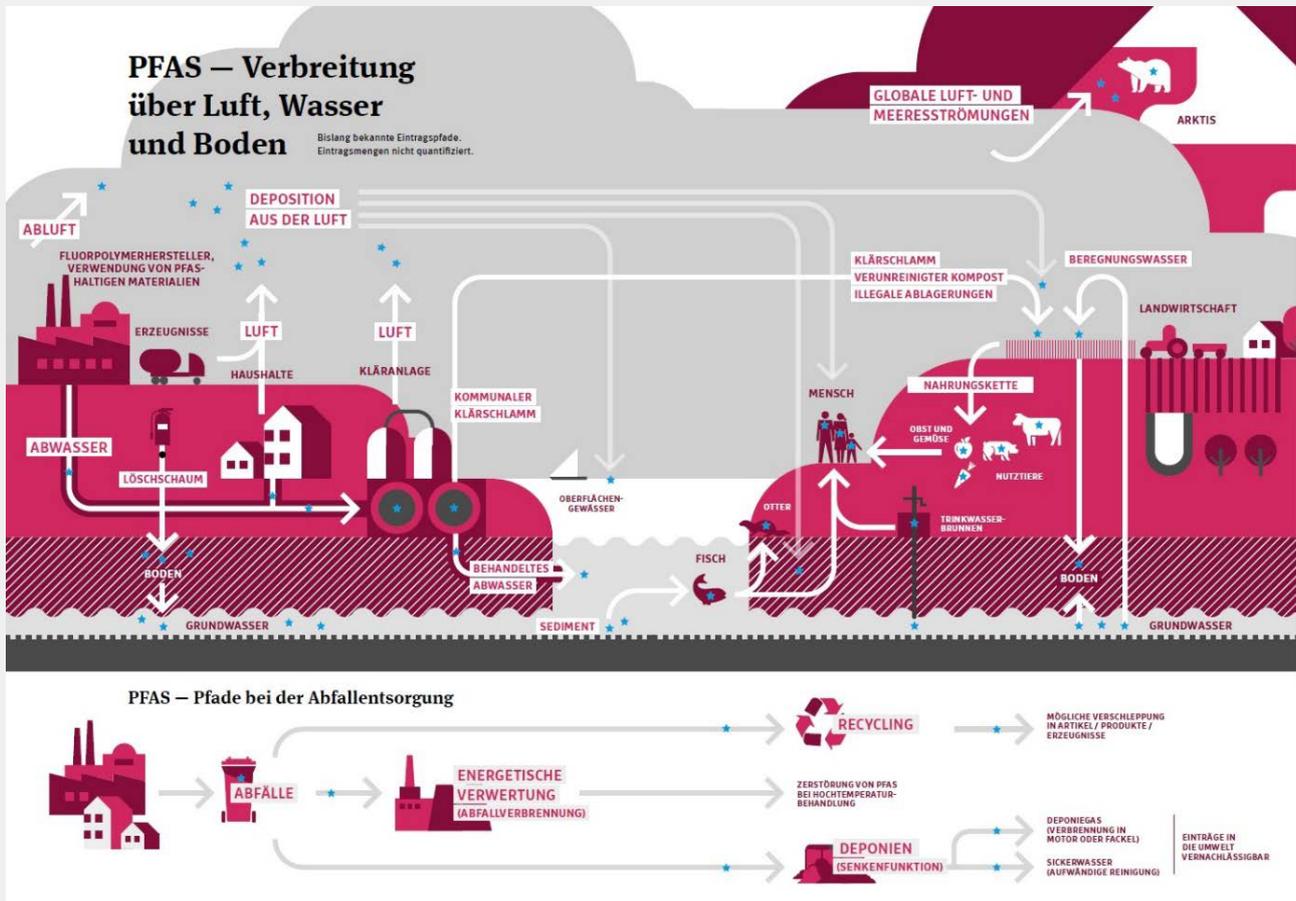


ABBILDUNG 1
 PFAS-Verbreitung über Luft, Wasser und Boden (UBA, 2020b).

Bodenaushub. Werden mit PFAS verunreinigte Materialien bodenbezogen genutzt, ist anzunehmen, dass sich PFAS in Abhängigkeit von ihrer Kettenlänge über unterschiedliche Zeiträume in tiefere Bodenschichten verlagern (Chromatographie-Effekt der Bodenpassage). Während der Verweil- und Verteilungszeit in Böden können PFAS auch von (Nutz-) Pflanzen aufgenommen werden (LAWA/LABO, 2021). PFAS in Böden können in das Grundwasser verlagert werden. Derzeit wird das Grundwasser anlassbezogen auf PFAS untersucht. Die Stoffe werden an einer Vielzahl der beprobten Messstellen nachgewiesen. PFAS treten auch europaweit – teils in erhöhten Konzentrationen – im Grundwasser auf (Voluntary „Groundwater Watch List“

(GWWL) Group of WFD CIS Working Group Groundwater, 2020).

Durch die Abluft von Industriebetrieben und Verflüchtigungen aus Erzeugnissen können PFAS in die Luft eingebracht werden und sich über die Luftströmungen verteilen. PFAS können in der Luft sowohl in der Gasphase als auch partikelgebunden vorkommen und so über weite Strecken in der Luft bis in entlegene Gebiete transportiert werden. PFAS werden daher auch in den Polargebieten und alpinen Seen, weit weg von industrieller Produktion und menschlichen Siedlungen, gefunden. Über Niederschläge gelangen PFAS aus der Luft wiederum in Böden und Oberflächengewässer. PFAS sind weltweit in Spuren im Regenwasser nachweisbar, teilweise

in Konzentrationen, die über den von der US-Umweltschutzbehörde (EPA) empfohlenen Werten für die lebenslange Trinkwasserversorgung liegen (Cousins, 2022). Der Nachweis von PFAS im Regenwasser ist ein Indiz dafür, dass PFAS, die über die Atmosphäre, das heißt den Luftpfad, in Böden und Gewässer gelangen, zu einer unspezifischen Hintergrundbelastung führen können (Biereth, 2021). Welche Menge an PFAS in der Atmosphäre vorhanden sind, ist bisher jedoch kaum untersucht worden. Erhöhte PFAS-Gehalte in Böden, Gewässern und Grundwasser können im Umkreis von Produktionsstätten/Industrieanlagen durch Luftemissionen auftreten (Evich et al., 2022).

Durch die vielfältigen Eintragsszenarien, die extreme Persistenz und die Mobilität der Verbindungen ist anzunehmen, dass PFAS ubiquitär in allen Umweltkompartimenten verbreitet sind und das Potenzial für eine übergreifende Problemverlagerung aufweisen.

BELASTUNG DES MENSCHEN

Menschen nehmen PFAS hauptsächlich durch Nahrungsmittel, aber auch Luft, Wasser und Aerosole auf. Im menschlichen Körper können manche PFAS an Proteine in Blut, Leber und Niere binden. Im Vergleich zu anderen Chemikalien werden einige PFAS sehr langsam ausgeschieden und können sich deshalb im Körper anreichern. Besonders kritisch ist die Weitergabe einiger PFAS von der Mutter zum Kind während der Schwangerschaft und Stillzeit.

Für die Einschätzung der Relevanz der PFAS-Gehalte in menschlichem Blut für die Gesundheit hat die Humanbiomonitoring-Kommission am Umweltbundesamt sogenannte HBM I- und HBM II-Werte für PFOS und PFOA abgeleitet. HBM I-Werte kennzeichnen die PFAS-Konzentration im menschlichen Blut unterhalb derer nach dem HBM-Modell keine gesundheitlichen Folgen zu erwarten sind. Für Konzentrationen, die oberhalb der HBM II-Werte liegen, kann

nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, dass Effekte im Laufe des Lebens auftreten (UBA, 2016; UBA, 2020a).

Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen untersuchten Blutproben, die in der Umweltprobenbank (UPB) des Bundes aufbewahrt werden. Unter den 37 untersuchten PFAS fanden die Forschenden zwei prominente PFAS (PFOA und PFOS) in jeder Probe des Datensatzes 2009–2019. Die Ergebnisse dieser Studie deuten darüber hinaus darauf hin, dass die Exposition des Menschen gegenüber diesen bekannten PFAS in Deutschland in den letzten drei Jahrzehnten zurückgegangen ist (Göckener et al., 2020). In einer offiziellen deutschen Human-Biomonitoring-Studie an Blut von Kindern und Jugendlichen wurde jedoch festgestellt, dass immer noch ein Fünftel der Teilnehmenden an dieser Studie PFOA-Konzentrationen im Blut hatte, die über dem sogenannten Human-Biomonitoring-Wert (HBM-I) lagen (Duffek et al., 2020).

PFAS sind im Blut der Allgemeinbevölkerung nachweisbar, in den meisten Fällen jedoch in Spuren. Die PFAS-Gehalte können bei höherer Exposition zum Beispiel in sogenannten PFAS-Hotspots erhöht sein. Die PFAS-Verunreinigungen sind auf verschiedene Arten der Kontamination zurückzuführen, meist sind es Standorte Fluorchemischer Industrie (z. B. Altötting, Zwijndrecht in Belgien, Dordrecht in den Niederlanden), Feuerlöschübungsplätze (z. B. auf Militärstandorten, Flughäfen, vermutlich (illegale) Ausbringung von PFAS-haltigen Bodenverbesserungs- und Düngemitteln (z. B. Arnsberg, Rastatt). Durch die unbekanntere Verunreinigung von Trinkwasser und lokalen Lebensmitteln können Menschen in solchen Hotspotregionen PFAS in erhöhten Mengen aufnehmen. Die Hotspot-Gebiete können relativ klein sein oder eine beträchtliche Größe der betroffenen Gemeinden erreichen. Bei Bekanntwerden der PFAS-Belastungen führen Behörden oftmals Human-Biomonitoring-Studien durch, um die PFAS-Belastung der Bevölkerung zu untersuchen und zu bewerten. Die Bewertungsergebnisse der Untersuchungen in Deutschland sind auf den Internetseiten

der zuständigen Gesundheitsämter verfügbar. Studien aus Italien und Schweden zeigen, dass Menschen an den Hotspots teilweise einem Vielfachen der „Hintergrundbelastung“ der allgemeinen Bevölkerung ausgesetzt sind (Ingelido et al., 2020; Ingelido et al., 2018; Li et al., 2020).

NEUE REGULATIONSANSÄTZE

NAHRUNGSMITTEL

Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) gibt mit der tolerierbaren wöchentlichen Aufnahmemenge (TWI) die Höchstwerte der für die menschliche Gesundheit relevanten chemischen Substanzen vor. Sie leitete 2020 einen TWI für die Summe von vier Verbindungen (Perfluoroktancarbonsäure [PFOA], Perfluorononansäure [PFNA], Perfluorhexansulfonsäure [PFHxS] und Perfluoroktansulfonsäure [PFOS], in Höhe von 4,4 ng/kg Körpergewicht ab. Erstmals wurde auch der Gesichtspunkt der Mischtoxizität berücksichtigt. Damit hat sie ihre Empfehlung gegenüber 2009 und 2018 durch die Einführung eines Summenparameters aus vier Einzelstoffen erweitert und den TWI an neue Erkenntnisse zur toxischen Wirkung angepasst (TABELLE 1). Die EFSA begründet diese Anpassung mit der Erkenntnis, dass PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS die Entwicklung beeinflussen und schädliche Auswirkungen auf den Cholesterinspiegel, die Leber, das

Immunsystem und das Geburtsgewicht haben können. Sie erachtete die Auswirkungen auf das Immunsystem als kritischsten Effekt.

Die PFAS-Konzentrationen in der Umwelt sind mancherorts bereits so hoch, dass der TWI durch Aufnahme bestimmter Nahrungsmittel schnell erreicht ist und Behörden regional von zum Beispiel Fischverzehr oder dem Verzehr von Wildschweinlebern abraten (LGL, 2022; BfR, 2020; Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, 2020). Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Exposition einiger Bevölkerungsgruppen, zum Beispiel von Kindern, den TWI teilweise überschreitet (BfR, 2021).

Die EFSA führt die Ernährung als wichtigste Quelle der Exposition gegenüber PFAS auf, da die Verunreinigung von Lebensmitteln mit diesen Substanzen hauptsächlich auf Bioakkumulation in aquatischen und terrestrischen Lebensmittelketten zurückzuführen ist. Die EFSA verdeutlicht zudem, dass auch die Verwendung PFAS-haltiger Lebensmittelkontaktmaterialien zur Exposition des Menschen gegenüber diesen Substanzen beitragen kann.

Kürzlich hat die EFSA für vier PFAS Höchstgehalte in Fisch, Fleisch und Eiern festgelegt. Die EFSA gibt jeweils Einzelwerte für PFOA, PFOS, PFHxA und PFNA und auch Summenparameter an. Diese Höchstgehalte in Lebensmitteln gelten ab dem 01.01.2023 (Verordnung (EU) 2022/2388; TABELLE 2).

	TWI IN NG/KG KÖRPERGEWICHT		
	2009*	2018#	2020#
PFOA	10.050	6	
PFOS	1.050	13	
Summe PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS			4,4

*2009: Ableitung auf Grundlage chronischer Endpunkte aus Tierversuchen;
 #ab 2018: Ableitung auf Grundlage epidemiologischer Studien.

TABELLE 1
 Tolerierbare wöchentliche Aufnahmeraten (TWI) für PFAS abgeleitet durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA), (<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.653>, <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223> bzw. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5194>)

TABELLE 2
 Beispiele für Höchstgehalte der Summe von PFOS, PFHxS, PFOA und PFNA (Verordnung (EU) 2022/2388 L_2022316DE.01003801.xml (europa.eu)).

LEBENSMITTEL	SUMME PFOS, PFHXS, PFOA, PFNA IN µG/KG FRISCHGEWICHT
Eier	1,7
Muskelfleisch von Fischen (Auflistung verschiedener Arten)	2,0–45
Krebstiere	5,0
Fleisch von Rindern, Schweinen und Geflügel	1,3
Fleisch von Schafen	1,6
Schlachtnebenerzeugnisse von Rindern, Schafen, Schweinen und Geflügel	8,0
Fleisch von Wild, ausgenommen Fleisch von Bären	9,0
Schlachtnebenerzeugnisse von Wild, ausgenommen Schlachtnebenerzeugnisse von Bären	50

OBERFLÄCHENGEWÄSSER UND GRUNDWASSER

Mögliche Eintragspfade von PFAS in Flüsse, Seen und Meere sind Abwasser, Auswaschungen aus verunreinigten Böden, Vermischung mit verunreinigtem Grundwasser, atmosphärische Deposition und direkte Einträge zum Beispiel bei Löscheinsätzen (Evich et al., 2022; LAWA/LABO, 2021; Toshovski, 2020).

PFAS in Oberflächengewässern reichern sich in Fischen und Sedimenten an. Untersuchungen der Umweltprobenbank des Bundes (UPB) in Schwebstoffen zeigen, dass ein wesentlicher Teil der PFAS-Belastung der Flüsse aus polyfluorierten Verbindungen besteht, die mit den analytischen Standardverfahren nicht bestimmt werden können. Ihr Anteil nimmt beständig zu, während die PFAS-Belastung der Gewässer insgesamt rückläufig ist (Göckener et al., 2021; Umweltbundesamt, 2023). Sedimente können für manche PFAS als Senke angesehen werden. Aufgrund der hohen Persistenz der PFAS können derartige Senken langfristig jedoch auch wieder zu Quellen werden, welche PFAS freisetzen. Flüsse sind bedeutende Eintragspfade von PFAS in die Meere, für Deutschland vor allem für die Nordsee. Küstennahe Proben sind stärker belastet als Proben aus der offenen See. Über Meeresströmungen werden PFAS

bis in die Polargebiete transportiert (Muir & Miaz, 2021).

Das Vorkommen von PFAS in Grundwasserkörpern ist meist auf Auswaschungen aus kontaminierten Böden zurückzuführen. Dies ist insbesondere dann von großer Relevanz, wenn Grundwasser als Ressource für die Trinkwassergewinnung dient. Um Oberflächengewässer und Grundwasser zu schützen, sollen bei der Überarbeitung der Grundwasserrichtlinie und der Umweltqualitätsnormen-Richtlinie (UQN-Richtlinie) verbindliche Parameterwerte für die Stoffgruppe der PFAS eingeführt werden. Für beide Richtlinien, in welche die jüngsten EFSA-Empfehlungen bereits eingeflossen sind, liegen Überarbeitungsentwürfe vor. Sie berücksichtigen eine ähnliche Auswahl an PFAS-Einzelstoffen wie die Trinkwasserrichtlinie, allerdings mit voraussichtlich deutlich niedrigeren Parameterwerten.

TRINKWASSER

Trinkwasser wird aus verschiedenen Wasserressourcen gewonnen, wobei in Deutschland vor allem auf Grundwasser, Uferfiltrat und Oberflächengewässer, wie etwa Talsperren, zurückgegriffen wird. Daher ergeben sich unmittelbare Abhängigkeiten vom Vorkommen chemischer Stoffe in den Ressourcen, welche

zur Trinkwasseraufbereitung herangezogen werden und der resultierenden Trinkwasserqualität. Nach Infektionsschutzgesetz (IfSG) § 37 Absatz 1 muss Trinkwasser so beschaffen sein, dass „durch seinen Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit [...] nicht zu besorgen sein“ darf. In Umsetzung der Trinkwasserrichtlinie EU 2020/2184 in nationales Recht werden durch die Novellierung der Trinkwasserverordnung auch erstmals eine Auswahl von 20 PFAS (jeweils C₄- bis C₁₃-Perfluorcarbon und -sulfonsäuren) in die Trinkwasserüberwachung aufgenommen, die in ihrer Summe einen Grenzwert von 0,1 µg pro Liter nicht überschreiten dürfen. Der Grenzwert gilt ab 12. Januar 2026. Eine Untergruppe von vier ausgewählten PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS), die von der EFSA für die maximal zulässige Aufnahmemenge gesondert bewertet wurden, wird zusätzlich mit einem Summengrenzwert von 0,02 µg pro Liter in die Trinkwasserverordnung aufgenommen. Dieser Grenzwert tritt mit zwei Jahren Abstand zum PFAS-Summe-20-Grenzwert in Kraft.

BODEN

PFAS-Verunreinigungen in Böden können eine Quelle für PFAS-Gehalte im menschlichen Blut sein: Durch Auswaschungen in das Grundwasser können Grundwasserressourcen, die zur Herstellung von Trinkwasser genutzt werden, verunreinigt werden (s. o.). PFAS können aus Böden in Nutzpflanzen aufgenommen werden und so über die

Nahrungskette den Menschen erreichen. Menschen können PFAS auch direkt aus dem Boden aufnehmen, dieser Pfad wird aber für den Großteil der Bevölkerung als nicht relevant angesehen.

Der Verlagerung in das Grundwasser wird die größte Bedeutung gegeben, deshalb enthält die novellierte Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser (TABELLE 3). Sie tritt zum 01.08.2023 in Kraft. Die kürzlich abgeleiteten neuen TWI der EFSA sind in diesen Werten jedoch noch nicht berücksichtigt.

Den Behörden steht ein [bundeseinheitlicher Leitfaden zur Bewertung von PFAS in Boden und Grundwasser](#) zur Verfügung der in den meisten Bundesländern eingeführt wurde. Damit können Behörden über Nutzung beziehungsweise Sanierung von verunreinigten Böden und Bodenmaterial entscheiden (BMUV, 2022).

Ein Großteil der Nahrungs- und Futtermittel wird auf Böden produziert. Deshalb sollten die von der EFSA festgelegten Höchstwerte in Nahrungsmitteln (zumindest in Fleisch und Eiern) auch für die Ableitung von tolerierbaren PFAS-Gehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden einbezogen werden. Auch weitere PFAS für die bislang keine Höchstgehalte in Lebensmitteln vorliegen, sollten in landwirtschaftlich genutzten Böden betrachtet werden. In Baden-Württemberg wurde auf PFAS-belasteten Agrarflächen ein Vorerntemonitoring etabliert, um die PFAS-Belastung des Menschen durch Nahrungsmittel vorsorglich zu vermindern.

PFAS	PRÜFWERT [µG/L]
Perfluorbutansäure (PFBA)	10
Perfluorhexansäure (PFHxA)	6
Perfluoroktansäure (PFOA)	0,1
Perfluornonansäure (PFNA)	0,06
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	6
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	0,1
Perfluoroktansulfonsäure (PFOS)	0,1

TABELLE 3
 PFAS-Prüfwerte für organische Stoffe für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser am Ort der Probenahme und im Sickerwasser am Ort der Beurteilung.

EUROPÄISCHE CHEMIKALIENVERORDNUNG REACH

Die EU-Kommission hat im Green Deal einen [PFAS-Action Plan](#) vorgelegt. Darin ist dargestellt, die Emissionen aus Herstellung und Verwendung von PFAS drastisch zu senken sind, indem nicht-essenzielle Nutzungen der Stoffe verboten werden sollen. Ein Vorschlag zum Verbot von PFAS-haltigen Feuerlöschmitteln wurde 2021 eingereicht. Die Stellungnahmen der wissenschaftlichen Komitees der Europäischen Chemikalienbehörde (ECHA) werden bis Juni 2023 erwartet. Den Vorschlag zur Beschränkung aller PFAS haben verschiedene Behörden aus Deutschland, den Niederlanden, Schweden, Dänemark und Norwegen erarbeitet und kürzlich bei der Europäischen Chemikalienbehörde ECHA eingereicht.

FAZIT

PFAS-Einträge durch industrielle Prozesse oder die Nutzung von Produkten in verschiedene Umweltkompartimente, wie Oberflächengewässer, Grundwasser, Luft und Böden müssen effektiv reduziert oder idealerweise so weit wie möglich vermieden werden. Die entsprechenden Maßnahmen müssen zeitnah umgesetzt und streng auf Einhaltung kontrolliert werden. Dazu sind Gesetzgebungen zu entwickeln, anzupassen und national sowie international zu harmonisieren. Unvermeidbare Verwendungen von PFAS müssen auf ein Minimum reduziert werden und gleichzeitig umweltfreundliche Alternativen für PFAS entwickelt werden. Einheitliche Regelungen zum Umgang mit PFAS-verunreinigten Böden und Gewässern sind durchzusetzen. Wo notwendig sind Verfahren zur Entfernung von PFAS bei der Trinkwasseraufbereitung zu etablieren. Sichere und nachhaltige Entsorgungswege für PFAS-verunreinigte Materialien sind festzulegen. Absehbare Regulationsansätze, wie etwa in der Trinkwasserüberwachung, im Bodenschutz oder in der Ableitung von Umweltqualitätsnormen

für Oberflächen- und Grundwasser sind sehr zu begrüßen, aber hinsichtlich ihrer Konsistenz noch ausbaufähig. In künftigen Überarbeitungsrunden der entsprechenden Regelwerke muss auch dann vorliegenden neuen Erkenntnissen zur Relevanz der aktuell getroffenen Parameterauswahl Rechnung getragen werden. ●

LITERATUR

- Bierreth, C., Dreher, P., Nöltner, T. et al. (2021). *Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen; Ergebnisse aus drei Untersuchungsphasen*. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10215>
- BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung. (2020). *Verzehr von Schaf- oder Rinderleber kann erheblich zu Gesamtaufnahme von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) beitragen* (Stellungnahme, Issue 028/2020). <https://www.bfr.bund.de/cm/343/verzehr-von-schaf-%20oder-rinderleber-kann-erheblich-zu-gesamtaufnahme-von-per-und-polyfluoralkylsubstanzen-beitragen.pdf>
- BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung. (2021). *PFAS in Lebensmitteln: BfR bestätigt kritische Exposition gegenüber Industriechemikalien* (020/2021). <https://www.bfr.bund.de/cm/343/pfas-in-lebensmitteln-bfr-bestaetigt-kritische-exposition-gegenueber-industriechemikalien.pdf>
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2022). *Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials*. Stand: 21.02.2022. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf
- Cousins, I., Johansson, J. H., Salter, M. E. et al. (2022). *Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)*. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11172–11179. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>
- Duffek, A., Conrad, A., Kolossa-Gehring, M. et al. (2020). *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, 113549. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113549>
- Evich, M. G., Davis, M. J. B., McCord, J. P. et al. (2022). *Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment*. *Science*, 375(6580), eabg9065. <https://doi.org/10.1126/science.abg9065>

- Göckener, B., Fliedner, A., Rüdél, H. et al. (2021). Exploring unknown per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – The total oxidizable precursor assay as helpful tool in research and regulation. *Science of The Total Environment*, 782, 146825. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146825>
- Göckener, B., Weber, T., Rüdél, H. et al. (2020). Human biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. *Environment International*, 145, 106123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106123>
- Ingelido, A. M., Abballe, A., Gemma, S. et al. (2020). Serum concentrations of perfluorinated alkyl substances in farmers living in areas affected by water contamination in the Veneto Region (Northern Italy). *Environ Int*, 136, 105435. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105435>
- Ingelido, A. M., Abballe, A., Gemma, S. et al. (2018). Biomonitoring of perfluorinated compounds in adults exposed to contaminated drinking water in the Veneto Region, Italy. *Environ Int*, 110, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.026>
- LAWA/LABO – Bund/Länderarbeitsgemeinschaften Wasser und Bodenschutz. (2021). *Fachbericht der PFAS-Koordinierungsgruppe - Fragestellungen zur konsistenten Ableitung von Bewertungskriterien für die Medien Grund- und Oberflächenwasser sowie Boden vor dem Hintergrund neuer EFSA-Empfehlungen*. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, & M. Rosenkavalierplatz 2, © München, September 2021. https://www.lawa.de/documents/lawa-labo-fachbericht-umk-fassung-211125-2_2_1649169943.pdf
- LGL – Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittel. (2022). *Untersuchung von Wildfleisch und -innereien sowie Wildschweinfleisch und -innereien auf per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS)-Untersuchungsergebnisse 2009–2019*. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittel. Abgerufen am 01. Februar 2023 von https://www.lgl.bayern.de/lebensmittel/chemie/kontaminanten/pfas/ue_2010_pft_lebensmittel_wild_sonstigesbayern.htm
- Li, Y., Barregard, L., Xu, Y. et al. (2020). Associations between perfluoroalkyl substances and serum lipids in a Swedish adult population with contaminated drinking water. *Environ Health*, 19(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00588-9>
- Muir, D., & Miaz, L. T. (2021). Spatial and Temporal Trends of Perfluoroalkyl Substances in Global Ocean and Coastal Waters. *Environmental Science & Technology*, 55(14), 9527–9537. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08035>
- Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, L. u. V. (2020). *Verzehrempfehlung für Fisch aus Flüssen in Niedersachsen*. https://www.ml.niedersachsen.de/download/155522/Verzehrempfehlung_fuer_Flussfische_in_Niedersachsen_Stand_20_Mai_2020_PDF_283_KB_barrierefrei.pdf
- OECD – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2021). *Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: recommendations and practical guidance (OECD Series on Risk Management, Issue)*. [https://www.oecd.org/official-documents/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/CBC/MONO\(2021\)25&docLanguage=En](https://www.oecd.org/official-documents/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/CBC/MONO(2021)25&docLanguage=En)
- Toshovski, S., Kaiser, M., Fuchs, S. et al. (2020). *Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen – Ein deutschlandweit harmonisiertes Vorgehen* (Texte, Issue 173/2020). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/prioritaere-stoffe-in-kommunalen-klae-anlagen>
- UBA – Umweltbundesamt (2023). *Umweltprobenbank des Bundes*. Abgerufen am 01. Februar 2023 von <https://www.umweltprobenbank.de/de>
- UBA – Umweltbundesamt. (2020a). HBM-II-Werte für Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) in Blutplasma – Stellungnahme der Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, 63(3), 356–360. <https://doi.org/10.1007/s00103-020-03101-2>
- UBA – Umweltbundesamt. (2020b). PFAS – Gekommen um zu bleiben. *Schwerpunkt*, 01. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2020-pfas-gekommen-um-zu-bleiben>
- UBA – Umweltbundesamt. (2016). HBM-I-Werte für Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) in Blutplasma Stellungnahme der Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes. *Bundesgesundheitsblatt*, 59, 1362–1363. <https://doi.org/10.1007/s00103-016-2434-4>
- Voluntary “Groundwater Watch List” (GWWL) Group of WFD CIS Working Group Groundwater. (2020). *Study on Per- and Polyfluoroalkyl substances (PFAS) – Monitoring Data Collection and Initial Analysis –(Draft V.2.5 / 31st March 2020)*. <https://circabc.europa.eu/ui/group/9ab5926d-bed4-4322-9aa7-9964bbe8312d/library/a547839e-c8ef-4a0d-b4f5-0cb877cdd17e/details>

KONTAKT

Dr. Alexander Kämpfe
Umweltbundesamt
Fachgebiet II 3.2 „Schwimm- und Badebeckenwasser,
chemische Analytik“
Heinrich-Heine-Straße 12
08645 Bad Elster

[UBA]

