

PFAS im Trinkwasser – gesetzliche Regulierung, Toxikologie und Überblick über Befunde

Ulrich Borchers (u.borchers@iww-online.de)

Zusammenfassung und Einführung

Die neue Trinkwasserverordnung (TrinkwV), die im Frühjahr 2023 in Kraft treten wird, wird erstmalig Grenzwerte für Perfluoralkylsubstanzen (PFAS) enthalten. Dazu ist nun die Bundesratsdrucksache 68/23 veröffentlicht worden. Sie wird vom Bundesrat am 31. März behandelt. Trotz der Übergangsfristen ist aufgrund der z.T. toxikologischen bzw. hygienischen Relevanz und dem ubiquitären Vorkommen aufgrund chemisch-physikalischer Eigenschaften einiger dieser Stoffe zu fordern, bereits kurzfristig mit der Überwachung zu beginnen. Im Fall von gehäuften, bzw. wiederholten Befunden ist damit zu rechnen, dass Maßnahmen zu ergreifen sind, um die Verbraucher*innen zu schützen.

Es zeigt sich, dass es in einigen Fällen in deutschen Wasserwerken Probleme mit PFAS gibt bzw. geben dürfte, da analytische Befunde für einzelne Vertreter dieser Stoffgruppe nicht selten sind. Ein Überblick über die verfügbaren Ergebnisse aus Trinkwasseranalysen zu PFAS, der im Rahmen einer Datensammlung für die Trinkwasserkommission erstellt wurde, zeigt ein aktuelles Bild der Betroffenheit der Wasserversorgung in Deutschland. Es ist damit zu rechnen, dass insbesondere bei Beeinflussungen der Rohwasserressourcen aus punktuellen Kontaminationsquellen, beispielsweise aus der Industrie oder der Umgebung von Flughäfen, eine Aufbereitung des Rohwassers zur Minimierung der PFAS-Konzentrationen angezeigt sein wird.

Ausgangssituation

Die neue EU-Trinkwasserrichtlinie (drinking water directive, DWD) [1] ist nach ihrer Veröffentlichung im Dezember 2020 am 12. Januar 2021 in Kraft getreten. Aufgrund der zweijährigen Übergangsfrist wird in Deutschland im Frühjahr mit einigen Monaten Verspätung eine neue Trinkwasserverordnung in Kraft gesetzt werden, um die seit 2019 geltende Fassung der TrinkwV [2] abzulösen. Angesichts der zum Teil massiven Änderungen, die in die EU-Gesetzgebung eingeflossen sind, darf mit zum Teil erheblichen Veränderungen gerechnet werden. Der bisher stark qualitätsorientierten Fokussierung der Richtlinie wurde nun in der neuen Fassung auch ein prägender Schwerpunkt des „Wassermanagements“ sowie noch umfangreicherer Verbraucherinformationsrechte hinzugefügt. Dennoch ist und bleibt das Hauptziel der Richtlinie die menschliche Gesundheit vor nachteiligen Einflüssen durch die Aufnahme von Trinkwasser zu schützen.

In diesem Beitrag soll auf die neueingeführten Grenzwerte für die per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) eingegangen werden, die sowohl für die Analytik als auch für die Wasserversorgung und -aufbereitung eine große Heraus-

forderung darstellen. PFAS sind – neben weiteren neuen Parametern und Regelungen in der EU-Richtlinie – wegen der Verbreitung der Stoffgruppe in der aquatischen Umwelt sowie der z.T. bestehenden toxikologischen Relevanz von besonderer Bedeutung. Ein Schwerpunkt des Beitrags ist die Auswertung einer breit angelegten Datensammlung von Befunden an PFAS, die im Auftrag einer Unterarbeitsgruppe der Trinkwasserkommission durchgeführt wurde.

Herausforderungen bei der analytischen Überwachung der PFAS

Für die trinkwasserhygienisch und toxikologisch relevante Gruppe der PFAS werden zwei Summengrenzwerte in die neue TrinkwV 2023 aufgenommen:

1. Summe der PFAS (PFAS-20) = 0,10 µg/L für die Summe von 20 explizit im Anhang der Verordnung genannten Stoffen, wobei diese eine Kettenlänge von C4 bis C13 haben und jeweils Carbon- und Sulfonsäuren umfassen. In Tabelle 1 sind die Stoffnamen und gebräuchlichen Abkürzungen aufgeführt. Der Grenzwert wird ab dem 12.01.2026 einzuhalten sein.
2. Daneben wird ein rein nationaler und toxikologisch bedingter Grenzwert für die Summe der EFSA-PFAS (PFAS-4, siehe Tabelle 1) = 0,020 µg/l eingeführt. Dieser Grenzwert wird ab dem 12.01.2028 einzuhalten sein.

C-Atome	Carbonsäuren	Sulfonsäuren
4	Perfluorbutansäure (PFBA)	Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)
5	Perfluorpentansäure (PFPeA)	Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS)
6	Perfluorhexansäure (PFHxA)	Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)*
7	Perfluorheptansäure (PFHpA)	Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS)
8	Perfluoroctansäure (PFOA)*	Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)*
9	Perfluorononansäure (PFNA)*	Perfluorononansulfonsäure (PFNS)
10	Perfluordekansäure (PFDA)	Perfluordekansulfonsäure (PFDS)
11	Perfluorundecansäure (PFUnDA)	Perfluorundecansulfonsäure
12	Perfluordodekansäure (PFDoDA)	Perfluordodekansulfonsäure
13	Perfluortridekansäure (PFTrDA)	Perfluortridekansulfonsäure

Tabelle 1: 20 Stoffe, die in die Summe der PFAS (PFAS-20) nach EU-Trinkwasserrichtlinie Anhang III [1] eingehen, * vier PFAS für die die EFSA einen zulässige tägliche Aufnahmemenge (ADI) abgeleitet hat (PFAS-4) [5]

Bis zum 12. Januar 2024 wird die EU-Kommission für den Parameter „Summe der PFAS“ (PFAS-20) die Analyseverfahren einschließlich Nachweisgrenzen und Häufigkeit der Probenahmen festlegen.

Toxikologische Bewertung der PFAS

Zur Bewertung der PFAS gibt es vom Umweltbundesamt mehrere Empfehlungen aus den letzten Jahren, in denen die toxikologische Relevanz der Stoffgruppe beschrieben wird [3, 4], da die European Food Safety Authority (EFSA) in den letzten Jahren die Bewertungen für bestimmte PFAS-Einzelsubstanzen [5] zunehmend verschärft hat. Aufgrund einer Aktualisierung der toxikologischen Bewertung einiger PFAS wird der von der EFSA empfohlene Wert für die tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI) für die vier Einzelverbindungen PFOA, PFOS, PFHxS und PFNA (PFAS-4, siehe Tabelle 1) in Deutschland auch für das Medium Trinkwasser Bedeutung erlangen. Die bisherigen vorübergehenden Maßnahmenwerte für PFOS und PFOA [6] wurden im Hinblick auf die Neubewertung durch die EFSA festgelegt und tragen dem Vorsorgegedanken ausreichend Rechnung.

Bei einer Ableitung von Grenzwerten für Trinkwasser gemäß dem in Deutschland üblichen Vorgehen bei der Regulierung (70 kg Körpergewicht, 2 Liter Trinkwasserkonsum pro Tag, 10% Allokation) ergäbe sich aus dem TWI-Wert der EFSA [5] für die vier zu betrachtenden PFAS ein Summengrenzwert (PFAS-4) in Höhe von lediglich gerundet 2 ng/l (= 0,002 µg/l). Hierbei ist zu beachten, dass eine toxikologische Tolerierbarkeit von Werten mit einer analytischen, aufbereitungstechnischen sowie finanziellen Machbarkeit kombiniert werden muss. Daher ist ein Stufenplan wahrscheinlich, bei dem der jetzt beschlossene Grenzwert von 20 ng/l für die PFAS-4 weiter abgesenkt wird. Eine konkrete Stufung sowie ein Zeitplan sind derzeit vom Umweltbundesamt noch nicht kommuniziert.

Nach einer Anfangsphase des Sammelns von realen Daten aus deutschen Trinkwässern wird man angesichts der Betroffenheit der Wasserversorger sowie der sich entwickelnden analytischen und technischen Möglichkeiten entscheiden müssen, inwieweit Anpassungen der Grenzwerte nötig, möglich und umsetzbar sind. Da die Diskussion weiterhin dynamisch ist und immer neue Erkenntnisse und Daten zur Bewertung hinzukommen, ist auch anzunehmen, dass weiterhin zunächst untergesetzliche Regelungswerte (Leitwerte, vorübergehende Maßnahmenwerte, allgemeine Vorsorgewerten) in Richtung geringerer Werte angepasst werden müssen.

Normung der Analyseverfahren für PFAS

Im Jahr 2021 wurde beim Europäischen Normungsgremium CEN TC 230 ein neues Normungsprojekt unter deutscher Leitung gestartet, um auf Basis der deutschen DIN 38407-42 [7] aus dem Jahr 2011 sowie der ISO 21675 [8] aus 2019 eine neue Europäische Norm für die Einzelstoffanalytik der 20 Stoffe zu erarbeiten, die von der Kommission als verbindliches Verfahren festgelegt werden soll. Hier wird es insbesondere

darum gehen, dass alle 20 Stoffe mit ausreichender Empfindlichkeit und akzeptabler Messunsicherheit in der Matrix Trinkwasser gemessen werden können.

Hierfür fordert die Trinkwasserrichtlinie [1] im Anhang III, Teil B eine Bestimmungsgrenze für die PFAS Σ 20 von 30 ng/L und eine Messunsicherheit von 50 % am Parameterwert. Das bedeutet, dass ein einzelner Stoff mit einer Bestimmungsgrenze von 1,5 ng/L zu messen ist. Für die vier EFSA-PFAS (PFAS Σ 4) wird sogar eine Bestimmungsgrenze angestrebt, die bei circa 0,2 ng/l liegt, damit ein eventueller neuer, sehr niedriger Leit- oder Grenzwert im Nanogramm-pro-Liter-Bereich auch sicher überwacht werden kann. Der aktuelle Entwurf der neuen Europäischen Norm sieht eine flüssigchromatografische Methode mit Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) vor, wobei sowohl das Direkt-Injektions- als auch ein SPE (Festphasenextraktion)-Anreicherungs-Verfahren als Optionen vorgesehen sind. Dabei muss insbesondere für die PFAS mit einer Kettenlänge von mehr als 10 C-Atomen aufgrund der starken Adsorption der Stoffe an Gefäßwandungen eine geeignete Vorgehensweise gefunden werden. Im Mai 2022 ist das Verfahren als Europäischer Norm-Entwurf bei CEN in Brüssel als prEN 17892 in die Umfrage und Abstimmung zu einer Vornorm (prEN) gegangen. Das Verfahren dürfte damit Ende 2023 als fertige europäische und deutsche Norm zur Verfügung stehen.

Für die Summenmethode für den Parameterwert „PFAS, gesamt“ (Konventionmethode) besteht dagegen keine Perspektive für eine sinnvolle und ausreichend empfindliche Methode, so dass davon ausgegangen werden kann, dass nur der Parameter PFAS Σ 20 in die neue Trinkwasser-Verordnung Eingang finden wird.

Erster Überblick über PFAS in deutschen Trinkwässern Sammlung und Auswertung von PFAS-Analysendaten

Um einen größeren, möglichst umfassenden Überblick über die Befundlage an PFAS in Trinkwässern und damit über die Betroffenheit der deutschen Wasserversorgung zu bekommen, konnten bisher in einer Datenbank rund 1.600 Ergebnis-Datensätze für PFAS aus verschiedenen deutschen Laboratorien gesammelt werden. Die Daten für die folgenden Betrachtungen wurden von den Laboratorien der Autoren zusammengetragen:

- | | |
|-------------------|---------------|
| • IWW | (686 Proben) |
| • LGL Bayern | (89 Proben) |
| • Umweltbundesamt | (583 Proben) |
| • TZW | (208 Proben) |
| • Gesamt | (1566 Proben) |

Es handelt sich um Trink- und zum Teil um Rohwasserproben, die aus mehreren Bundesländern stammen und ein breites Spektrum an größeren und kleineren Wasserwerken abdecken, und teilweise auch aus Trinkwasserinstallationen stammen. Die Daten sind in den Jahren 2015 bis 2022 erhoben worden, wobei etwa 50 % der Daten aus 2020 bis 2022 stammt. Es ist zu beachten, dass anfangs nicht die kompletten 20 PFAS gemessen werden konnten, zum Teil wegen noch

fehlender Standard-Referenzmaterialien. Diese fehlenden Werte gehen mit „Null“ in die Berechnung der Summenkonzentration ein. Bei den 4 EFSA-PFAS (PFAS Σ 4) ist zu erwähnen, dass anfangs die Bestimmungsgrenzen wegen der im Aufbau befindlichen Analytik für diese Stoffe noch nicht im unteren einstelligen Nanogramm pro Liter-Bereich lagen. Dies konnte durch Optimierung der Analytik erst in den letzten beiden Jahren zunehmend erreicht werden. Durch beide Randeffekte kommt es eher zu einer leichten Unterschätzung der mittleren Gehalte. Mit Hilfe der von der Trinkwasserkommission des UBA angeregten, möglichst flächendeckenden Untersuchungen sollen relevante Eintragsquellen von PFAS in die Trinkwasserressourcen (wie bspw. Flughäfen, Militäreinrichtungen, Klärschlammasubstrat, Industrieanlagen) frühzeitig identifiziert werden [3, 4].

Zu den Analysendaten wurden in der Datensammlung – soweit verfügbar – den Proben auch Metadaten zugeordnet, um die Bewertung zu verbessern. Dabei handelte es sich um Informationen zur Matrix der Proben, zur Herkunft des Wassers (z.B. Grundwasser, von Oberflächenwasser beeinflusstes Wasser, Uferfiltrat, Wasser aus Talsperren, Wasser nach Aufbereitung...) und schließlich zu bekannten oder vermuteten Kontaminationsquellen im Einzugsgebiet.

Zur Vermeidung einer statistischen Verzerrung wurden die Daten von Mehrfachbestimmungen bereinigt, insbesondere bei Standorten, die aufgrund von bekannten Belastungen und Kontaminationen („Hotspots“) regelmäßig oder gehäuft beprobt wurden. Für diese wurden nur die jeweils aktuellsten Werte für eine weitere Auswertung verwendet. Dieser bereinigte Datensatz umfasst die Messwerte von 1119 Proben. Wenn man so eine Selektion nicht durchführte, würden die gemittelten Ergebnisse zu schlechteren Werten verzerrt und mit zunehmender Zeit durch weitere Häufung der Daten im Umfeld der Problemstandorte scheinbar immer höher.

Ergebnisse

In Abbildung 1 wird die Summe der 20 PFAS nach Konzentrationsklassen dargestellt. Es wird deutlich, dass mit rund 57% der Proben der überwiegende Teil der in die Auswertung geflossenen Daten unter der Bestimmungsgrenze liegt. Das bedeutet, dass für alle 20 PFAS (siehe Tabelle 1) kein Nachweis erfolgte, so dass die Summe der Konzentrationen aus formalen Gründen gleich Null gesetzt wird. Entsprechend der Vorgabe der bisherigen TrinkwV [2] werden im Falle von Summenbildungen bei Parametern, die aus Konzentrationen von Einzelstoffen (z.B. PAK, HKW, PSM) berechnet werden, die Gehalte als Null gewertet, wenn die Bestimmungsgrenze unterschritten wird (Konvention).

Bei lediglich 3,8% der Proben wurden Gehalte über dem zukünftigen Summengrenzwert von 0,10 $\mu\text{g/l}$ gefunden. Im Vergleich zu vorangegangenen Auswertungen kleinerer Stichproben [9, 10], in denen circa 13,5 % der Proben über 0,10 $\mu\text{g/l}$ lagen, zeigt sich ein deutlich positiveres Bild. Dies dürfte im

Wesentlichen auf den umfangreicheren und bereinigten Datensatz zurückzuführen sein, in welchen – wie oben erläutert – nur die aktuellen Werte eines Standortes eingeflossen sind, auch wenn dieser Standort z.B. wegen bekanntem PFAS-Vorkommen mehrfach beprobt wurde. In der Summe haben nur 5,0% der Proben PFAS Σ 20-Gehalte über der Hälfte des geplanten Grenzwerts.

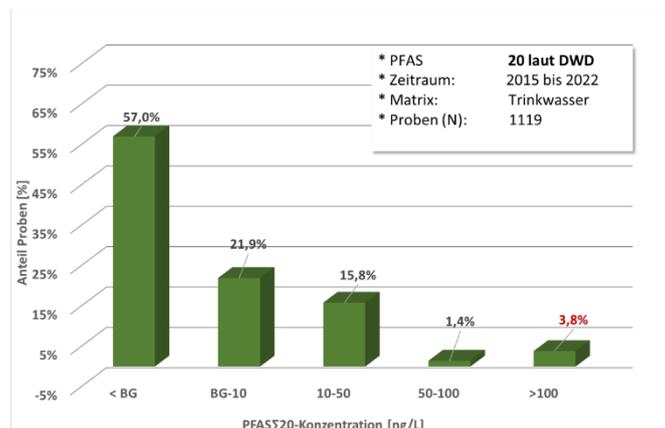


Abb. 1: Summe der Konzentrationen für 20 PFAS (PFAS Σ 20) gemäß EU-Trinkwasserrichtlinie [1] in deutschen Trinkwässern

Die Metadaten zu diesen Proben zeigen, dass typischerweise Kontaminationsquellen wie Rückstände von Löschschäumen im Bereich von Flughäfen oder andere industrielle Kontaminationen für die Verunreinigungen verantwortlich sind. Dabei sind Trinkwässer, die aus Grundwässern gewonnen werden, ebenso betroffen wie solche aus von Oberflächenwasser beeinflussten Ressourcen.

In Abbildung 2 wird eine auf die PFAS Σ 4 fokussierte Auswertung der Analysendaten gezeigt. Es sind die gleichen 1119 Proben erfasst, nur wird hier die Summe (eine Untermenge der PFAS Σ 20) aus den vier Stoffen PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS dargestellt. Bei anteilig gleicher relativer Berücksichtigung wie für die PFAS Σ 20 ergibt sich ein oberer Wert für die Summe dieser Stoffe von 20 ng/l. Abbildung 2 verdeutlicht, dass bei rund 5,4 % der Proben die Gehalte über einem eventuellen Trinkwasserleit- oder Grenzwert von 20 ng/l lagen. Das zeigt, dass in diesem Fall die Betroffenheit der Wasserversorgung ebenfalls moderat wäre. Bei dieser Betrachtung hatten frühere Auswertungen [9, 10] mit circa 7 % Überschreitungen des Werts von 20 ng/l ein ähnliches Bild gezeigt.

Werden die Proben betrachtet, bei denen die Summe der Gehalte der 4 EFSA-PFAS (PFAS Σ 4) über dem Wert von 2 ng/L liegt (Daten hier nicht gezeigt), wären mit rund 29 % nahezu ein Drittel aller Proben betroffen. Dies würde eine erhebliche Betroffenheit der Wasserversorgung und erhebliche Konsequenzen für Aufbereitungsmaßnahmen oder die Verwendung bedeuten.

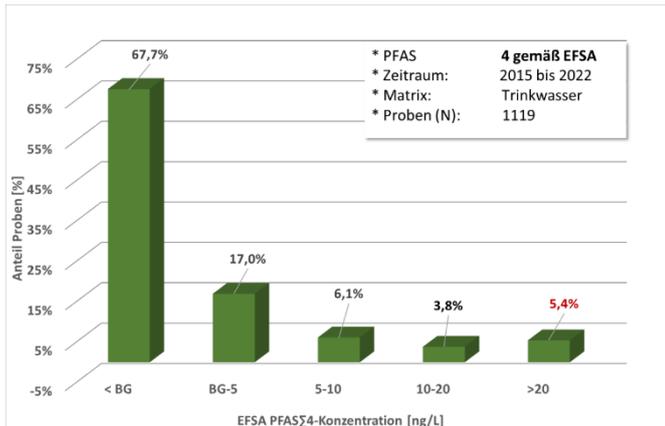


Abb. 2: Summe der Konzentrationen für 4 PFAS (PFAS Σ 4) gemäß EFSA-Vorschlag [6, 7] in deutschen Trinkwässern

Werden die Proben betrachtet, bei denen die Summe der Gehalte der 4 EFSA-PFAS (PFAS Σ 4) über dem Wert von 2 ng/L liegt (Daten hier nicht gezeigt), wären mit rund 29 % nahezu ein Drittel aller Proben betroffen. Dies würde eine erhebliche Betroffenheit der Wasserversorgung und erhebliche Konsequenzen für Aufbereitungsmaßnahmen oder die Verwendung bedeuten.

Häufigkeitsverteilung der PFAS nach Kettenlänge

In Abbildung 3 wird schließlich eine Häufigkeitsverteilung der PFAS nach der Kettenlänge der Verbindungen gezeigt.

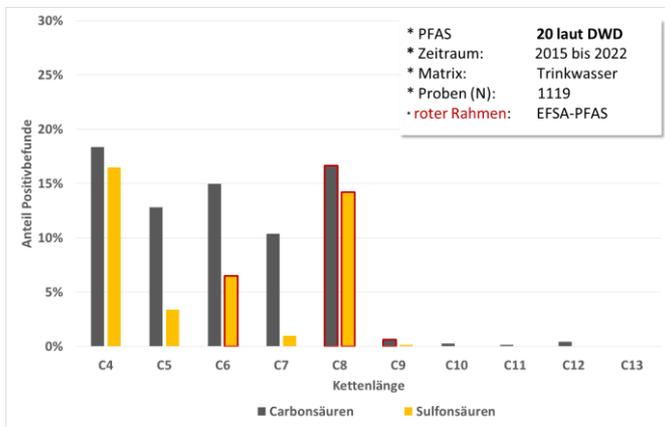


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der PFAS nach Kettenlänge in deutschen Trinkwässern

Abbildung 3 zeigt, dass in jeweils circa 15 bis 20% der Proben Perfluorbutan- (C4, PFBA) und Perfluoroctansäure (C8, PFOA) gefunden werden. PFOA gehört auch zu den 4 EFSA-PFAS. Danach haben auch noch die C5- bis C7-Carbonsäuren mit jeweils über 10% Befunden in den selektierten Proben einen nennenswerten Anteil. Eine separate Auswertung (hier nicht dargestellt) der Konzentrationsverteilung der Stoffe im Umfeld von Flughäfen (Feuerlöschschäume) zeigt, dass dort die Perfluorhexancarbonsäure (PFHxA) und die Hexansulfonsäure (PFHxS) mit mittleren Gehalten von je circa 80 ng/l dominieren. Da die Perfluorhexansulfonsäure zu den 4 EFSA-PFAS

(PFAS Σ 4) gehört, wäre allein wegen dieser Verbindung eine Aufbereitung und ggf. weitere Maßnahmen erforderlich.

Aus der Abbildung 3 wird auch ersichtlich, dass PFAS mit Kettenlängen von 10 und mehr C-Atomen in Trinkwasserproben praktisch nicht gefunden werden, was an ihrem Adsorptionsverhalten am Aquifer-Material liegen könnte.

Aufbereitungsmöglichkeiten für PFAS

PFAS sind grundsätzlich persistente Verbindungen, die mikrobiell praktisch nicht abgebaut werden. Naturnahe Aufbereitungsverfahren, die auf einem Abbau der PFAS beispielsweise bei einer Untergrundpassage (Uferfiltration) oder in einem Langsandsandfilter basieren, sind daher nicht wirksam. Messungen in Wasserwerken belegen, dass beispielsweise durch eine Uferfiltration kein signifikanter Rückhalt für PFAS mit Kettenlängen zwischen C4 und C8 erfolgt, sodass in Uferfiltraten, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, vergleichbare mittlere Konzentrationen wie im Fließgewässer gefunden werden [11]. Für langkettige PFAS kann sich allerdings eine gewisse Reduktion bei der Untergrundpassage oder Langsandsandfiltration ergeben, da durch den Filtrationsprozess Partikel zurückgehalten werden, an die diese Verbindungen teilweise sorbieren. Noch ungeklärt ist die Frage, ob PFAS dauerhaft an Bodenpartikeln adsorbieren, oder nur für eine Zeitspanne zurückgehalten werden und lediglich verzögert eluieren (Chromatographie-Effekt).

Die Entfernung von PFAS bei der Trinkwasseraufbereitung ist aufgrund ihrer Stoffeigenschaften nicht einfach. Als Verfahren der Wahl, insbesondere bei Belastungen des Rohwassers mit langkettigen PFAS, kann für die Einhaltung des Parameterwerts der EU-Trinkwasserrichtlinie für die Summe der Konzentrationen von 20 PFAS (PFAS Σ 20) von 0,1 μ g/L die Aktivkohlefiltration eingesetzt werden. Basierend auf Praxiserfahrungen mit bereits in Betrieb befindlichen Anlagen können spezifische Aufbereitungskosten für dieses Verfahren von unter 0,1 €/m³ abgeleitet werden. Liegen überwiegend kurzkettige PFAS im Rohwasser vor (Kettenlängen C6 und kürzer), verkürzen sich die Filterlaufzeiten allerdings sehr stark und die Aufbereitungskosten steigen entsprechend [11].

Ionenaustauscher als mögliche Alternative sind bislang nur im Rahmen von Forschungsvorhaben getestet worden. Hier stellt insbesondere die Regeneration der beladenen Harze, die nach derzeitigem Kenntnisstand den Einsatz von Ethanol erfordert, eine große Einschränkung dar. Die Filtration über dichte Membranen, d.h. die Nanofiltration oder die Umkehrosmose, ist ebenfalls eine Möglichkeit, um PFAS zu entfernen. Insbesondere in den Fällen, in denen neben der PFAS-Entfernung weitere Aufbereitungsziele verfolgt werden (beispielsweise eine Enthärtung des Wassers), kann diese Variante eine Alternative darstellen. Allerdings sprechen der hohe Energie- und Wasserbedarf gegen den Einsatz dichter Membranen zur PFAS-Entfernung. Abhängig von der Rohwasserbelastung könnte auch eine Vollstrombehandlung notwendig werden,

was eine zusätzliche Aufhärtung des membranbehandelten Wassers erfordern würde.

Bei allen beschriebenen Aufbereitungsverfahren ist zu berücksichtigen, dass durch die PFAS-Entfernung Rückstände entstehen, die wiederum mit PFAS belastet sind und die entsorgt und ggf. weitergehend behandelt werden müssen. Der Vermeidung von PFAS-Einträgen ist daher in jedem Fall der Vorzug vor einer nachträglichen Entfernung der Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung zu geben.

Literatur

- [1] Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union L 435: S. 1 – 62.
- [2] TrinkwV 2019; 4. Verordnung zur Änderung der Trinkwasserverordnung vom 20. Dezember 2019 " Bundesgesetzblatt, Teil I 2019(52): S. 2934.
- [3] Umweltbundesamt: Empfehlung des Umweltbundesamtes - Umgang mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) im Trinkwasser (2020); https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5620/dokumente/twk_200826_empfehlung_pfas_final.pdf
- [4] Umweltbundesamt: (2021-07). Ergänzung der Empfehlung: „Umgang mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) im Trinkwasser“ vom 26. August 2020 Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission, Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz Band 64, Seiten 1328–1329 (2021)
- [5] EFSA (2020) EFSA: Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. Efsa Journal Eur Food Saf Auth 18(9):e6223. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- [6] Umweltbundesamt: (2019-12). Stellungnahme zu einem vorübergehenden Maßnahmenwert für PFOA und PFOS, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/stellungnahme_pfoa_pfos_0.pdf
- [7] DIN 38407-42:2011-03 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion (F 42)
- [8] ISO 21675:2019-10; Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Wasser – Verfahren mittels Flüssigkeitschromatographie/Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) nach Festphasenextraktion
- [9] Borchers, U. und Wiegand, L. (2021). Die analytischen Herausforderungen der neuen EU-Trinkwasserrichtlinie: was kommt auf die Deutsche Wasserversorgung zu? GWF-Wasser | Abwasser(3): 30-33.
- [10] Borchers, U. und Sacher, F. (2022). PFAS im Trinkwasser – Überwachung und Herausforderungen für die Trinkwasserversorgung. 55. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft im Klimawandel" vom 09. bis 11. März 2022 in Aachen. T. Wintgens und J. Pinnekamp. Aachen. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser: 33/31-33/37.
- [11] Riegel, M. und Sacher, F. (2021). Betroffenheit der Trinkwasserversorgung durch die Einführung eines Trinkwassergrenzwerts für PFAS. Energie | wasser-praxis(11): 65-69.

Korrespondenzadresse

Dr. Ulrich Borchers
IWW Zentrum Wasser
Moritzstraße 26
45476 Mülheim an der Ruhr
E-Mail u.borchers@iww-online.de