

TEXTE

53/2026

Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch

Dokumentation der Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“ vom 30.04.2025

von:

Dr. Tobias Frische, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau; Dr. Caroline Baaske-Scholze, Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), Flintbek; Dr. Cilia Derese, Landesamt für Umwelt (LfU) Rheinland-Pfalz, Mainz; Dr. Janine Kowalczyk, Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin; Dr. Raphaela Osterauer, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe; Dr. Gerd Rippen, Bewertung von Umweltchemikalien (unabhängiger Sachverständiger); Dr. Philipp Roth, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf; Margit Salzmann, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt (GAA NI), Hildesheim; Ireen Werner, Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg, Potsdam

unter Mitarbeit von:

Dr. Christina August (BfR), Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin; Lennart Gehrenkemper, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau; Dr. Jörg Leisner (i.R.), Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 53/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
(BMUKN)

Forschungskennzahl 3721 74 201 0
FB001923

Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch

Dokumentation der Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte /
Direktpfad“ vom 30.04.2025

von

Dr. Tobias Frische, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-
Roßlau; Dr. Caroline Baaske-Scholze, Landesamt für
Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), Flintbek;
Dr. Cilia Derese, Landesamt für Umwelt (LfU) Rheinland-
Pfalz, Mainz; Dr. Janine Kowalczyk, Bundesinstitut für
Risikobewertung (BfR), Berlin; Dr. Raphaela Osterauer,
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW),
Karlsruhe; Dr. Gerd Rippen, Bewertung von
Umweltchemikalien (unabhängiger Sachverständiger);
Dr. Philipp Roth, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima
Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf; Margit
Salzmann, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt (GAA NI),
Hildesheim; Ireen Werner, Landesamt für Umwelt (LfU)
Brandenburg, Potsdam

unter Mitarbeit von:

Dr. Christina August (BfR), Bundesinstitut für
Risikobewertung (BfR), Berlin; Lennart Gehrenkemper,
Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau; Dr. Jörg
Leisner (i.R.), Landesamt für Natur, Umwelt und Klima
Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Umweltbundesamt, Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum:

April 2025

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Dr. Annegret Biegel-Engler

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8138>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch

Dieser Bericht wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ 3721742010) erarbeitet. Zielstellung des Vorhabens war die fachliche Ableitung von Bodenwerten für Vertreter der Stoffgruppe der PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) gemäß Anforderungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und aktuellem Stand des Wissens. Dieser Bericht dokumentiert ausführlich die fachliche Ableitung von Prüfwerten für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Mensch (direkte Bodenaufnahme); die Ableitung erfolgte durch eine im Rahmen des Vorhabens eingerichtete Experten-Arbeitsgruppe. Erarbeitet wurde ein Vorschlag für einen Summen-Prüfwert „Summe der PFAS“ für die nichtkanzerogenen Wirkungen (dieser umfasst standardmäßig 24 überwiegend langkettige PFAS bzw. deren bekannte Vorläuferverbindungen), dieser gilt in Verbindung mit einem Prüfwert-Vorschlag für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA. Die Ableitung erfolgte dabei jeweils für die rechtlich vorgesehenen Nutzungsszenarien (Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitflächen, Industrie- und Gewerbeflächen).

Abstract: Scientific derivation of guideline values for per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) for the soil-human exposure pathway

This report was prepared as an outcome of the research project “Derivation of guideline values for PFAS in soil” (FKZ 3721742010). The objective of the project was the scientific derivation of guideline values for representatives of the PFAS substance group in accordance with the requirements of the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) and the current state of knowledge. This report documents in detail the scientific derivation of guideline values for selected PFAS for the soil-human exposure pathway (direct soil uptake); the derivation was carried out by an expert working group set up as part of the project. A proposal was developed for a sum guideline value “sum of PFAS” for non-carcinogenic effects (this includes 24 predominantly long-chain PFAS or their known precursor compounds) and applies in conjunction with a proposed guideline value for the carcinogenic effects of PFOA. The derivation was carried out for the legally prescribed usage scenarios (children's play areas, residential areas, parks and leisure areas, industrial and commercial areas).

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Charakterisierung	11
2 Geeignete Messverfahren	12
3 Basisdaten Toxikologie: TRD-Werte für langfristige orale und inhalative Belastung	12
4 Gefahrenbezogene Körperdosis	13
5 Qualität der Krebsrisikoquantifizierung	14
6 Daten zur Hintergrundbelastung aus Nahrung, Wasser und Luft	14
6.1 Orale Aufnahme	14
6.2 Inhalative Aufnahme	14
6.3 Gesamthintergrundbelastung	15
6.4 Konsequenzen für die Prüfwertableitung	15
7 Daten zu Hintergrundgehalten von Böden.....	15
8 Expositionspfad Boden - Raumluft	17
9 Dermaler Bodenkontakt	17
10 Zusammenfassende Darstellung der Basis für die Prüfwert-Ableitung - PFAS.....	18
11 Berechnung von Prüfwerten	19
11.1 Szenario „Kinderspielflächen“	19
11.2 Szenario „Wohngebiete“	20
11.3 Szenario „Park- und Freizeitflächen“	21
11.4 Szenario „Industrie- und Gewerbeflächen“	22
12 Plausibilitätsprüfung.....	24
12.1 Abgleich mit Erkenntnissen zu Geruchsschwellenkonzentrationen zur Prüfung möglicher erheblicher Belästigungen	25
12.2 Gemeinsame Wirkung mit anderen Stoffen	25
12.3 Berücksichtigung des perkutanen Aufnahmepfades	25
12.4 Verhältnis von inhalativer und oraler Bodenaufnahme.....	26
12.5 Bedeutung kanzerogener gegenüber nicht-kanzerogenen Wirkungen bei der Prüfwertableitung	26
12.6 Vergleich mit den Hintergrundgehalten in Böden	26
12.7 Vergleich mit PFAS-Bodengehalten in Altlasten	27
12.8 Einbeziehung von Ergebnissen aus Humanbiomonitoring und epidemiologischen Studien	28
12.9 Gegenrechnung der akuten Wirkung bei einmalig hoher Bodenaufnahme	29

12.10	Abstufung berechneter Prüfwerte zwischen den Szenarien	29
12.11	Grenz- und Richtwerte in anderen Umweltmedien (Luft, Nahrung) sowie PFAS- Bodenwerte anderer europäischer Länder	29
13	Übersicht der Prüfwert-Vorschläge (Tabellen und Text)	30
14	Quellenverzeichnis	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Datenbasis für die Prüfwertableitung PFAS	18
Tabelle 2:	Überblick berechnete Prüfwerte – orale Bodenaufnahme	24
Tabelle 3:	Überblick berechnete Prüfwerte – inhalative Bodenaufnahme	24
Tabelle 4:	Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS	30
Tabelle 5:	Parameterumfang „Summe der PFAS“	31

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ADONA	Ammoniumsalz der Perfluor-4,8-dioxa-3H-nonansäure (DONA)
BBodSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz)
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BG	Bestimmungsgrenze
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BMDL	Benchmark Dose Lower Limit
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbrauchersicherheit
EFSA	European Food Safety Authority
EFSA4-PFAS	PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS
EU	Europäische Union
FTOH	Fluortelomeralkohole
6:2 FTS (H4PFOS)	6:2 Fluortelomersulfonsäure
8:2 FTS	8:2 Fluortelomersulfonsäure
GD	Gefahrenbezogene Dosis
HFPO-DA (GenX)	Hexafluorpropylenoxiddimersäure bzw. seine prominenten Verbindungen
IARC	International Agency for Research on Cancer
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level
NG	Nachweisgrenze
N-EtFOSA	N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamid
N-EtFOSAA	N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure
N-MeFOSA	N-Methyl-Perfluorooctansulfonamid
N-MeFOSAA	N-Methyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanz(en)
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFCA	Perfluorcarbonsäuren

Abkürzung	Erläuterung
PFDA	Perfluordecansäure
PFDoDA	Perfluordodecansäure
PFDoDS	Perfluordodecansulfonsäure
PFDS	Perfluordecansulfonsäure
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFOSA	Perfluoroctansulfonamid
PFUnDA	Perfluorundecansäure
PFUnDS	Perfluorundecansulfonsäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFNA	Perfluornonansäure
PFOA	Perfluoroctansäure
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure
PFPrA	Perfluorpropansäure
PFPrS	Perfluorpropansulfonsäure
PFSA	Perfluorsulfonsäuren
PFTeDA	Perfluortetradecansäure
PFTrDA	Perfluortridecansäure
PFTrDS	Perfluortridecansulfonsäure
POD	Point of Departure
TDI	Tolerable daily intake
TFA	Trifluoressigsäure
TRD	Tolerierbare Resorbierte Dosis (TRD)
TWI	Tolerable weekly intake
UBA	Umweltbundesamt
US EPA	U.S. Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organisation

1 Charakterisierung

(Die folgende kondensiert-kursorische Charakterisierung wurde auf Grundlage einer in Frische et al. (2025) dokumentierten Zusammenfassung erstellt.)

Die Abkürzung PFAS steht für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen. Hiermit wird eine große Gruppe chemisch-synthetisch hergestellter organischer Moleküle bezeichnet, denen eine Kohlenwasserstoff-Kette als Grundgerüst gemeinsam ist, wobei die Wasserstoff-Atome ganz (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluor-Atome ausgetauscht wurden. Von besonderer Relevanz für die Belastung von Mensch und Umwelt, jedenfalls mit einem in dieser Hinsicht besseren Kenntnisstand sind PFAS aus den Untergruppen der perfluorierten Carbonsäuren (Perfluoroalkyl Carboxylic Acids, PFCA) und der perfluorierten Sulfonsäuren (Perfluoroalkyl Sulphonic Acids, PFSA). Diese lassen sich wiederum unterscheiden in langkettige und kurzkettige PFCA (weniger als sieben perfluorierte Kohlenstoffatome) bzw. PFSA (weniger als sechs perfluorierte Kohlenstoffatome). Die beiden bekanntesten/ am besten untersuchten Vertreter aus diesen Untergruppen sind PFOA (Perfluorooctansäure) bei den PFCA und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) bei den PFSA.

Besonders die langkettigen PFAS kombinieren einige aus technischer Perspektive sehr nützliche Eigenschaften. Sie sind wasser-, schmutz- und fettabweisend sowie stabil unter extremen Bedingungen (z.B. Hitze, Druck, Strahlung, Chemikalien). Sie kamen und kommen deshalb in einer Vielzahl von industriellen Verwendungen und Produkten zum Einsatz, ebenso wie in verbrauchernahen Produkten. PFAS können während ihres gesamten Lebenszyklus in die Umwelt freigesetzt werden.

Die technisch nützlichen Eigenschaften der PFAS sind gleichzeitig Anlass zur Besorgnis im Blick auf das Verhalten in der Umwelt. So ist die generelle besorgniserregende Eigenschaft, welche PFAS aufgrund ihrer chemischen Struktur mit sich bringen, ihre Persistenz. Das heißt, PFAS können unter Umweltbedingungen nicht auf natürlichem Wege abgebaut werden. In Verbindung mit einer vergleichsweise hohen Mobilität hat diese Eigenschaft dazu geführt, dass PFAS mittlerweile weltweit in sämtlichen Umweltmedien zu finden sind. Böden nehmen dabei eine zentrale Stellung in der Umweltverteilung der PFAS ein. So sind Böden einerseits eine „PFAS-Senke“ für diffus-ubiquitäre PFAS-Immissionen über den Luftweg. Punktuelle bis großflächigere direkte Einträge resultieren aus Schadensereignissen und Unfällen (Einsatz PFAS-haltiger Löschschäume) oder der Ausbringung PFAS-haltiger Klärschlämme oder Komposte. Nach dem Eintrag stellen diese belasteten Böden eine „PFAS-Quelle“ und in der Folge eine Gefahr für andere Umweltmedien, Güter, Ökosysteme sowie den Menschen dar. Denn PFAS gelangen aus kontaminierten Böden ins Grund- und Trinkwasser, werden von Pflanze, Tier und Mensch aufgenommen und nur langsam wieder ausgeschieden, sie reichern sich entlang der Nahrungsketten an, und zudem sind einige besser untersuchte PFAS gesundheitsschädlich für den Menschen.

Die in der Ableitung der Prüfwert-Vorschläge verwendeten Basisdaten zur Toxikologie und Krebsrisikoabschätzung wurden aus Frische et al. (2025) übernommen.

2 Geeignete Messverfahren

Die Bestimmung der Bodengehalte (Feststoff) der 24 in der Prüfwert-Ableitung berücksichtigten PFAS ist in Anlehnung an DIN 38414-14 mittels tandem-massenspektrometrischer Analyse nach hochleistungsflüssigchromatographischer Trennung (LC-MS/MS) gemäß ISO 21675:2019-10 bei entsprechender Anpassung des Analyten-Spektrums möglich. Die mittlerweile auch in Routine-laboren erreichbaren Bestimmungsgrenzen ($< 0,1 \mu\text{g}/\text{kg}$) erlauben eine sichere Bestimmung (Prüfwert \geq dreifache Bestimmungsgrenze) auch des niedrigsten, abgeleiteten Prüfwertes ($0,9 \mu\text{g}/\text{kg}$ für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA im Szenario „Kinderspielflächen“, siehe Kap. 11.1). Eine entsprechende leistungsfähige Methode befindet sich aktuell im europäischen Normungsverfahren (CEN).

Ergänzende Hinweise:

In einem Ringversuch von 2024, durchgeführt von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), wurden PFAS in Bodenextrakte und Bodeneluate mittels massenspektrometrischer Analytik quantifiziert. Die analytische Methode war angelehnt an die DIN 38414 14. An dem Ringversuch haben 17 Labore teilgenommen. Als Mindestanforderung war u.a. eine Bestimmungsgrenze (BG) von $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ je PFAS-Substanz vorgegeben. Die teilnehmenden Labore erreichten alle diese Vorgabe und unterschritten die BG teilweise deutlich. Im Median gaben die Labore eine BG um $0,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ an, wobei viele Labore nominelle BGs berichteten - die tatsächlichen BGs liegen in dem Fall mindestens unterhalb der angegebenen nominellen BG. Wertet man diesen Ringversuch als repräsentative Stichprobe, so ist eine Bestimmungsgrenze von $0,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ je PFAS-Substanz für einen Großteil der Labore realisierbar.

Die beschriebene Target-Analytik erlaubt keine vollständige Erfassung sämtlicher potenziell an einem PFAS-kontaminierten Standort vorliegenden PFAS. Dies gilt insbesondere für weitere potenzielle Vorläufer-Verbindungen (Precursor). Zur Erfassung der PFAS-Gesamtbelastung und/ oder der Ermittlung von Vorläufer-Verbindungen sind zusätzliche chemisch-analytische Verfahren erforderlich, wie z.B. der oftmals bereits in der Praxis (Detailuntersuchung) eingesetzte TOP-Assay (Göckener et al., 2022; BMUV 2022).

3 Basisdaten Toxikologie: TRD-Werte für langfristige orale und inhalative Belastung

Von Frische et al. (2025) wurde der von EFSA (2020) abgeleitete EFSA4-TDI-Wert ($0,63 \text{ ng je kg}$ Körpergewicht und Tag) als geeignete TRD-Option zur Ableitung von Prüfwerten für die nicht-kanzerogenen Wirkungen der vier im TDI-Wert betrachteten PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) bei oraler Aufnahme identifiziert. Maßgeblich für die Ableitung des EFSA-TDI-Wertes ist der in mehreren epidemiologischen Studien beschriebene inverse Zusammenhang zwischen Serumkonzentrationen einzelner oder mehrerer PFAS im kindlichen Blut und dem Antikörpertiter nach Impfungen; gemäß EFSA decken die in diesem TDI-Wert berücksichtigten immuntoxischen Effekte auch alle anderen, im Tierversuch oder beim Menschen beobachteten nicht-kanzerogenen Wirkungen dieser vier PFAS ab. Der Start- oder Referenzpunkt (Point of Departure, POD) für die Ableitung des EFSA4-TDI-Wertes wurde von EFSA mit Hilfe statistischer Dosis-Wirkungs-Modelle (Benchmark-Dose-Modeling, BMD) aus den Daten zur beobachteten Verringerung des Diphtherie-Antikörpertiters (nach Standardimpfung) bei steigenden PFAS-Blutgehalten im Blutserum von einjährigen brustgestillten Kindern errechnet; als POD wurde das BMD_{10} (Benchmark Dose Lower Limit) von $17,5 \text{ ng/mL}$ für die Summe von PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS definiert, die zugehörige BMD_{10} (Benchmark Dose bei 10% Effekt) beträgt $31,6$

ng/mL. Der Abstand zwischen BMD_{10} - und $BMDL_{10}$ -Wert ist mit einem Quotient von 1,8 relativ gering. Für einen Umgang mit BMD -Daten in der Prüfwert-Ableitung – speziell im Blick auf die Festsetzung des zu berücksichtigenden Gefahrenfaktors – liefern die „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) allerdings keinerlei Vorgaben. Vor diesem Hintergrund war eine Einordnung des POD bzw. des EFSA4-TDI-Wertes entsprechend der grundlegenden Anforderungen der „Ableitungsmaßstäbe“ geboten. Wie in Frische et al. (2025) ausführlich dargelegt, entspricht das $BMDL_{10}$ näherungsweise einem $NOAEL_e$ und die BMD_{10} näherungsweise einem $LOAEL_e$. $NOAEL_e$ steht hierbei für den „No Observed Adverse Effect Level“ für empfindliche Personengruppen und $LOAEL_e$ für den „Lowest Observed Adverse Effect Level“ für empfindliche Personengruppen.

Der EFSA4-TDI-Wert (0,63 ng je kg Körpergewicht und Tag) als geeignete TRD-Option geht in die rechnerische Ermittlung der Prüfwerte (siehe Kap. 11.) für die maßgeblichen Expositionsszenarien als zugeführte Dosis ein. Da nach derzeitigem Kenntnisstand eine umfassende Aufnahme der hier betrachteten PFAS über den Magen-Darm-Trakt erfolgt (Frische et al. (2025)), wird eine Resorptionsquote von 100% (d.h. die Standardannahme gemäß „Ableitungsmaßstäbe“) angenommen.

Wie in Frische et al. (2025) ausführlich begründet, lassen sich auf Grundlage der verfügbaren toxikologischen Datenlage die folgenden 24 überwiegend langkettigen PFCA und PFSA inklusive ihrer bekannten Vorläufer-Verbindungen (Precursor) unter Nutzung des EFSA4-TDI-Wertes als TRD-Option toxikologisch plausibel in der – nicht-toxizitätsgewichteten – Ableitung eines Summen-Prüfwertes („Summe der PFAS“) einbeziehen:

- ▶ 8 PFCA (PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA)
- ▶ 9 PFSA (PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS)
- ▶ 7 Sonstige (6:2 FTS, 8:2 FTS, PFOSA, N-EtFOSA, N-EtFOSAA, N-MeFOSA, N-MeFOSAA)

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, ist die Informationslage zur Relevanz des inhalativen Expositionspfad für die Aufnahme von PFAS im Menschen sehr begrenzt. Es konnten keine geeigneten TRD-Optionen für den inhalativen Aufnahmepfad identifiziert werden. Dies gilt gleichermaßen für den dermalen Expositionspfad.

4 Gefahrenbezogene Körperdosis

Die grundlegende Anforderung zur Ermittlung der „gefahrenbezogenen Dosis“ gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) lautet: *„Für die Bestimmung der gefahrenbezogenen Dosis ist eine Interpolation notwendig, die von dem $NOAEL_e$ bzw. TRD-Wert ausgeht und zu einem Ergebnis führt, das deutlich kleiner ist als der $LOAEL_e$ und nach Möglichkeit dem vermuteten $LOAEL_e$ entspricht ...“*. $NOAEL_e$ steht hierbei für den „No Observed Adverse Effect Level“ für empfindliche Personengruppen, $LOAEL_e$ steht für den „Lowest Observed Adverse Effect Level“ für die gesunde erwachsene Bevölkerung und $LOAEL_e$ für den „Lowest Observed Adverse Effect Level“ für empfindliche Personengruppen. Wie in Kap. 3. skizziert und in Frische et al. (2025) ausführlich dargelegt, entspricht der von EFSA (2020) in der Ableitung des EFSA4-TDI-Wertes als Start- oder Referenzpunkt (Point of Departure, POD) definierte $BMDL_{10}$ näherungsweise einem $NOAEL_e$. Um eine den o.g. Anforderungen entsprechende gefahrenbezogene Dosis zu ermitteln, ist somit ein „Gefahrenniveau-Extrapolationsfaktor“ erforderlich; dieser wird auf den Wert zwei (2) gesetzt, was etwa dem in Kap. 3. beschriebenen Quotient (1,8) zwischen BMD_{10} ($\approx LOAEL_e$) und $BMDL_{10}$ ($\approx NOAEL_e$) entspricht. Dieser Gefahrenniveau-Extrapolationsfaktor“ wird in der rechnerischen Ermittlung der Prüfwerte (siehe Kap. 11.) für die maßgeblichen Expositionss-

szenarien anstelle des üblichen Gefahrenfaktors $F_{(Gef)}$ berücksichtigt. Bei direkter Umrechnung ergibt sich bei entsprechender Verdopplung des EFSA4-TDI-Wertes eine gefahrenbezogene Körperdosis von 1,26 ng je kg Körpergewicht und Tag.

5 Qualität der Krebsrisikoquantifizierung

Wie in Frische et al. (2025) ausführlich dargelegt, wurde für die orale Aufnahme von PFOA auf Grundlage einer aktuellen Bewertung von US EPA aus dem Jahr 2024 ein zusätzliches akzeptables Krebsrisiko ZR_{akz} von 0,00034 ng PFOA je kg Körpergewicht und Tag für die Prüfwert-Ableitung als geeignet identifiziert; das dieser PFOA-Aufnahme entsprechende zusätzliche Krebsrisiko beträgt 10^{-5} gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999). Die quantitative Krebsrisikoabschätzung erfolgte durch US EPA auf Grundlage humanepidemiologischer Studien zum Auftreten von Nierenzellkrebs. Die dem ZR_{akz} zugrundeliegenden Datenbasis wird gemäß Ableitungsmaßstäbe (BMU, 1999) in die Kategorie UR+ ("unit risk geeignet") eingestuft. Diese Einstufung begründet sich aus der in der Gesamtschau fachlich nachvollziehbaren Datenbasis und ebensolchen Begründungen sowie Berechnungen seitens US EPA.

Für die inhalative Aufnahme von PFOA konnten keine geeigneten quantitativen Krebsrisikoabschätzung identifiziert werden.

6 Daten zur Hintergrundbelastung aus Nahrung, Wasser und Luft

6.1 Orale Aufnahme

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, stellt nach aktuellem Wissensstand Nahrung (einschließlich Trinkwasser) die Hauptbelastungsquelle für die Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber den vier am häufigsten im Menschen gefundenen PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) dar; für weitere PFAS (einschließlich Vorläuferverbindungen) ist der Kenntnisstand zum relativen Beitrag der verschiedenen Expositionswege derzeit nicht ausreichend. In Deutschland zeigt sich auf Grundlage von Expositionsabschätzungen, dass die langfristige Exposition der Verbraucher gegenüber PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS durch Verzehr von Lebensmitteln (außer Trinkwasser) den in Kap. 3. dargestellten TDI der EFSA entspricht oder gar überschreitet – dies gilt zumindest für Teile der Bevölkerung (lang gestillte Säuglinge und Kinder zwischen 1 bis neun Jahren). Die zugrundeliegenden externen Expositionsabschätzungen (Verknüpfung von Lebensmittel-Verzehrdaten mit PFAS-Gehalten in den verzehrten Lebensmitteln) sind allerdings nach allgemeiner Einschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet.

6.2 Inhalative Aufnahme

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, ist die Informationslage zur Relevanz des inhalativen Expositionspfad für die Aufnahme von PFAS im Menschen sehr begrenzt. Es konnten keine Informationen identifiziert werden, die den relativen Beitrag des inhalativen Aufnahmepfades zur Gesamthintergrundbelastung abschätzen lassen.

6.3 Gesamthintergrundbelastung

Nach aktuellem Kenntnisstand (siehe Kap. 6.1. und Kap. 6.2) resultiert die bekannte Gesamthintergrundbelastung des Menschen mit PFAS wesentlich aus der oralen Aufnahme (Nahrung)

6.4 Konsequenzen für die Prüfwertableitung

Nach aktueller, wenn auch mit großen Unsicherheiten behafteter Einschätzung ist der EFSA4-TDI-Wert (0,63 ng je kg Körpergewicht und Tag) als TRD-Option für die nicht-kanzerogenen Wirkungen zumindest für einen Teil der deutschen Bevölkerung durch die Hintergrundbelastung infolge der Nahrungsaufnahme bereits ausgeschöpft (siehe Kap. 6.1). Dennoch wird in der rechnerischen Ermittlung der Prüfwerte (siehe Kap. 11.) die Standardannahme gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) von 20% Zufuhr über orale Bodenaufnahme berücksichtigt, d.h. der Allokationsfaktor beträgt 0,8. Dieses Vorgehen begründet sich aus den Unsicherheiten der derzeitigen Expositionsabschätzungen.

Für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA wird als Grundlage für die Prüfwert-Ableitung auf das durch schädliche Bodenveränderungen bedingte zusätzliche Risiko abgestellt; hierbei bleibt die Hintergrundbelastung gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) folglich unberücksichtigt.

7 Daten zu Hintergrundgehalten von Böden

Die Ermittlung von Hintergrundwerten für (die hier betrachteten) PFAS in den Böden Deutschlands ist bisher nur vorläufig erfolgt. Hintergrundwerte beschreiben dabei flächenhaft-repräsentativ und statistisch abgesichert die aus diffus-ubiquitären Einträgen resultierende typische Schadstoffbelastung (Hintergrundgehalte) von (ungestörten) Böden in Deutschland. Die Ableitung der Hintergrundwerte erfolgt dabei gemäß Empfehlungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2017). Das vom Umweltbundesamt (UBA) initiierte Forschungsvorhaben (Förderkennzeichen FKZ 3721712010) „Bundesweite Hintergrundwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) und weitere Schadstoffe in Böden“ zielt auf die Ableitung von Hintergrundwerten für 30 PFAS in Oberböden von Acker- und Grünlandstandorten im ländlichen Raum ab. Die Oberboden-Proben von 400 Acker- und 200 Grünland-Standorten wurden in einem vorangegangenen Vorhaben (Förderkennzeichen FKZ 3720 72 288 0) nach einem flächenhaft-repräsentativen Verteilungsschlüssel mit weitestmöglich PFAS-freier Probenahme und -Aufbereitung entnommen. Ausgenommen waren dabei Flächen mit eindeutiger Lage in Verdichtungsräumen, rezente Auen, Flächen in der Nähe bekannter Punktquellen, Altlasten sowie Flächen mit bekannten (potentiell) schädlichen Bodenveränderungen. Die PFAS-Analytik erfolgte nach ISO 21675:2019-10 mit einem erweiterten Parameterumfang sowie angepassten Nachweis- und Bestimmungsgrenzen (Nachweisgrenze überwiegend < 0,01 µg/kg Trockensubstanz und Bestimmungsgrenze überwiegend 0,01 bzw. 0,02 µg/kg Trockensubstanz). Die 30 im Parameterumfang eingeschlossenen PFAS umfassten 19 der hier in der Prüfwert-Ableitung „Summe der PFAS“ berücksichtigten 24 PFAS (siehe Kap. 13); fünf der in „Summe der PFAS“ berücksichtigten PFAS waren nicht Teil des Parameterumfangs der PFAS-Analytik (PFPeS, PFNS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS). Eine statistische Erstauswertung der Messergebnisse (inklusive Ausreißer- und Extremwertbereinigung; Messwerte kleiner Bestimmungsgrenze auf halbe Bestimmungsgrenze und kleiner Nachweisgrenze auf „0“ gesetzt) von den als geeignet eingestuften Proben (Acker 382 Proben, Grünland: 199 Proben) für den Zweck der Plausibilisierung der rechnerisch ermittelten Prüfwerte speziell für PFOA (kanzerogene Wirkungen) wurde vom UBA im Januar 2025 zur Verfügung gestellt. Die

Veröffentlichung der Ergebnisse der endgültigen Auswertung bzw. Ableitung von Hintergrundwerten für sämtliche analysierten PFAS ist aktuell in der Vorbereitung (UBA, persönl. Mitteilung). Das generelle, qualitative Ergebnis dieser Untersuchungen bestätigt die länger bereits diskutierte Vermutung einer flächendeckenden Grundbelastung der deutschen Oberböden mit PFAS, die offensichtlich insbesondere auch aus atmosphärischem Eintrag resultiert (BMUV, 2022). Konsistent zu diesen Ergebnissen wurden in den Bodenproben von elf über Deutschland verteilten Standorten (Acker, Forst, urban, naturnah) der Umweltprobenbank (Probenahme von 2002 bis 2018) ebenfalls diese ubiquitäre PFAS-Belastung festgestellt – wobei kein Rückgang in der PFAS-Belastung über den mit den Proben abgebildeten Zeitraum erkennbar war (Wellmütz et al. 2023).

Als vorläufiges Ergebnis der o.g. Erstauswertung des gesamten, alle (Flächen-)Bundesländer abdeckenden Datensatzes aus dem Forschungsvorhaben des UBA wurde 0,41 µg/kg Trockensubstanz als 90tes Perzentil der PFOA-Oberbodengehalte im Feststoff in den untersuchten Proben der Grünlandstandorte (Humusklassen h2-h5 undifferenziert, Datenbasis 178 Proben) berechnet; der entsprechende Wert für die Ackerbodenstandorte (Humusklassen h1-h5 undifferenziert, Datenbasis 379 Proben) wurde mit 0,27 µg/kg Trockensubstanz berechnet.

Diese Werte liegen unterhalb der entsprechenden Werte für PFOA, die im Rahmen eines Projektes zur Ermittlung von PFAS-Hintergrundwerten im ländlichen Raum in Nordrhein-Westfalen ermittelt wurden (LANUV, 2024). Für dieses Bundesland wurde 0,62 µg/kg Trockensubstanz als 90tes Perzentil der PFOA-Oberbodengehalte im Feststoff in den untersuchten Proben der Grünlandstandorte (Humusklassen undifferenziert, Datenbasis 68 Proben) berechnet; der entsprechende Wert für die Ackerbodenstandorte (Humusklassen undifferenziert, Datenbasis 107 Proben) lag bei 0,42 µg/kg Trockensubstanz.

Als weiteres vorläufiges Ergebnis der o.g. Erstauswertung des gesamten, alle (Flächen-)Bundesländer abdeckenden Datensatzes aus dem Forschungsvorhaben des UBA wurde 1,56 µg/kg Trockensubstanz als 90tes Perzentil der Oberboden-Summengehalte der 19 analysierten PFAS (ohne PFPeS, PFNS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS; zur Erläuterung siehe oben) im Feststoff der untersuchten Proben der Grünlandstandorte (Humusklassen h2-h5 undifferenziert, Datenbasis 178 Proben) berechnet; der entsprechende Wert für die Ackerbodenstandorte (Humusklassen h1-h5 undifferenziert, Datenbasis 379 Proben) lag bei 0,85 µg/kg Trockensubstanz. Vergleichbare Auswertungen für Oberboden-Summengehalte im Feststoff liegen für den Datensatz aus Nordrhein-Westfalen (LANUV, 2024) nicht vor.

Über die beiden o.g. Datenquellen (UBA, LANUV) hinaus liegen aktuell aus einigen weiteren Bundesländern kleinere, nicht flächen-repräsentativ vorliegende und nur teilweise öffentlich zugängliche Datensätze aus Untersuchungsprogrammen zur Ermittlung der diffus-ubiquitären PFAS-Bodenbelastung vor. Diese wurden bisher von keiner Institution systematisch zusammengetragen, was eine Zusammenschau nicht möglich macht. Zudem sind viele der Analysen mit einer wesentlich höheren Bestimmungsgrenze als im UBA-Projekt durchgeführt worden, was eine Vergleichbarkeit einschränkt. Erst in jüngerer Vergangenheit ist eine hinreichend für die Routine verfügbare und bezahlbare, leistungsfähige PFAS-Analytik für Feststoff (Boden) etabliert worden, die ein breites Spektrum relevanter PFAS-Einzelstoffe umfasst und angemessen niedrige Nachweis- und Bestimmungsgrenzen ermöglicht.

8 Expositionspfad Boden - Raumluft

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, ist die Informationslage zum inhalativen Expositionspfad sehr begrenzt. Allerdings ist laut EFSA (2020) vermutlich die Innenraumluft als die in erster Linie relevante Quelle für inhalative Exposition gegenüber PFAS einzustufen. Für den Expositionspfad Boden – Raumluft konnten für PFAS keine für eine weitergehende quantitative Abschätzung geeigneten Informationen identifiziert werden. Bekannt ist allerdings die potenzielle Relevanz dieses Expositionspfades für einige wenige PFAS mit höherer Flüchtigkeit (Fluortelomer-Alkohole); diese stehen in der hier dokumentierten Prüfwert-Ableitung aber nicht im Fokus.

9 Dermaler Bodenkontakt

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, ist die Informationslage zur PFAS-Aufnahme nach dermale Bodenkontakt sehr begrenzt. Generelle Einschätzung ist allerdings, dass dieser Aufnahmepfad von nachrangiger Bedeutung für die PFAS-Belastung des Menschen ist. Im Kontext der Plausibilitätsprüfung wird die Relevanz des dermalen Aufnahmepfades daher auf der Grundlage von Modellrechnungen diskutiert (siehe Kap. 12.3).

10 Zusammenfassende Darstellung der Basis für die Prüfwert-Ableitung - PFAS

Tabelle 1: Datenbasis für die Prüfwertableitung PFAS

Kriterium	Wert/ Bewertung	Erläuterung	Quelle
Nichtkanzerogene Effekte – inhalativ	-/-	fehlende Datenbasis	
Nichtkanzerogene Effekte – oral			
<ul style="list-style-type: none"> zugeführte Dosis [ng/kg * d] 	0,63	TDI-Wert (tolerable daily intake) abgeleitet aus Endpunkt Immuntoxizität (reduzierte Immunantwort nach Impfung) in epidemiologischer Studie für die Summe der EFSA4-PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS), erweitert auf insgesamt 24 PFAS	EFSA (2020)
<ul style="list-style-type: none"> Gefahrenfaktor, $F_{(Gef)}$ 	2	Hier statt $F_{(Gef)}$: Extrapolationsfaktor (von circa $NOAEL_e$ zu circa $LOAEL_e$)	Ad hoc-AG
Kanzerogenes Potenzial (PFOA)	“carcinogenic to humans” (Group 1)	“sufficient evidence for cancer in experimental animals and strong mechanistic evidence in exposed humans” / “limited evidence for renal cell carcinoma and testicular cancer in humans”	Zahm et al. (2023), IARC (2025)
Kanzerogene Potenz (PFOA) – inhalativ	-/-	fehlende Datenbasis	
Kanzerogene Potenz (PFOA) – oral			
<ul style="list-style-type: none"> Tagesdosis bei zusätzlichem akzeptablen Krebsrisiko von 10^{-5} (ZR_{akz}) [ng/kg * d] 	0,00034	Auftreten von Nierenzellkarzinomen (RCC) in einer randomisierten Fall-Kontroll-Studie	US EPA (2024)
<ul style="list-style-type: none"> Qualitätsurteil 	UR+ ("unit risk geeignet")	Nachvollziehbare Datenbasis, Begründung und Berechnungen von US EPA (2024); auf DE übertragbar	Ad hoc-AG
Hintergrund			
<ul style="list-style-type: none"> Inhalativ oral gesamt 	-/- -/- -/-	Teile der Bevölkerung (gestillte Säuglinge, Kinder von 1-9 Jahren) in DE mit EFSA4-Exposition, die zu immuntoxischen Effekten führen kann; Aufnahme über tierische Nahrungsmittel ist maßgeblich; Expositionsschätzungen sind aber unsicher, da Datenbasis begrenzt	BfR (2021)

Quelle: eigene Darstellung (Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“)

11 Berechnung von Prüfwerten

Die rechnerische Ermittlung der Prüfwerte erfolgt mit den in der Tabelle 1 (siehe Kap. 10.) dargestellten Daten gemäß der „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), die Formelnummern verweisen auf die dort beschriebenen Berechnungsformeln für die maßgeblichen Nutzungsszenarien mit ihren spezifischen Expositionsannahmen (nutzungsabhängige Bodenaufnahme). Es werden dabei einerseits für die nicht-kanzerogenen Wirkungen entsprechend der Ausführungen in Kap. 3. nicht-toxizitätsgewichtete Summen-Prüfwerte (Summe der PFAS) für 24 PFAS berechnet. Für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA werden entsprechend der Ausführungen in Kap. 5. zudem Einzelstoff-Prüfwerte berechnet.

11.1 Szenario „Kinderspielflächen“

Orale Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 1 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor F_{Gef} wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 33 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{33 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,0229 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{23 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (1)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 33 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{33 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,0004507 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{0,45 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (2)$$

Inhalative Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 3 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor F_{Gef} wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 0,082 mg/kg/d (Standardannahme), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{0,082 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 0,922 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \mathbf{922 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (3)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 0,082 mg/kg/d (Standardannahme), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{0,082 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 0,0181 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{18 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (4)$$

11.2 Szenario „Wohngelände“

Orale Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 1 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor $F_{(\text{Gef})}$ wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 16,5 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{16,5 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,04581 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{46 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (5)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 16,5 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{16,5 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,0009 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{0,9 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (6)$$

Inhalative Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 3 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor $F_{(\text{Gef})}$ wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 0,041 mg/kg/d (Standardannahme), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{0,041 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 1,844 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \mathbf{1844} \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} \quad (7)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 0,041 mg/kg/d (Standardannahme), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{0,041 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 0,036 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \mathbf{36} \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} \quad (8)$$

11.3 Szenario „Park- und Freizeitflächen“

Orale Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 1 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor $F_{(\text{Gef})}$ wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 6,6 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{6,6 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,1145 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{115} \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} \quad (9)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 6,6 mg/kg/d (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{6,6 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}}} = 0,002253 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{2,3} \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} \quad (10)$$

Inhalative Bodenaufnahme

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 3 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2)

anstelle von Gefahrenfaktor $F_{(Gef)}$ wie in Kap. 4. beschrieben, Bodenaufnahme 0,0164 mg/kg/d (Standardannahme, diese ist in „Ableitungsmaßstäbe“ auf S. 42 fälschlich als 0,0205 angegeben), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{0,0164 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 4,609 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{4610 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (11)$$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Expositionszeitfaktor 8,75 (Standardannahme), Bodenaufnahme 0,0164 mg/kg/d (Standardannahme, diese ist in „Ableitungsmaßstäbe“ auf S. 42 fälschlich als 0,0205 angegeben), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 8,75}{0,0164 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 0,09 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \mathbf{90 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (12)$$

11.4 Szenario „Industrie- und Gewerbeflächen“

Hinweis: Für Industrie- und Gewerbeflächen ist gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) der inhalative, nicht aber der orale Aufnahmepfad relevant.

Inhalative Bodenaufnahme (Staub)

Nicht-kanzerogene Wirkungen (Summe der PFAS)

Berechnet mit: Formel-Nr. 3 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Allokationsfaktor 0,8 (Standardannahme), Extrapolationsfaktor (2) anstelle von Gefahrenfaktor $F_{(Gef)}$ wie in Kap. 4. beschrieben, Boden(staub)aufnahme 0,0064 mg/kg/d (Erläuterung siehe nach Formel), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (Summe der PFAS)} = \frac{0,63 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot (2-0,8)}{0,0064 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 11,86 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \approx \mathbf{11900 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (13)$$

Boden(staub)aufnahme: Für dieses Szenario wird gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ mit Formel-Nr. 7 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) auf die als gesundheitlich unkritisch eingestufte stoffspezifische Konzentration in der Atemluft (in ng/m³) abgestellt; ein solcher Wert liegt für PFAS nicht vor. Alternativ kann aus der in Formel 7 eingehenden Staubkonzentration (0,325 mg/m³) unter Verwendung der relevanten Parameter dieses Szenarios die Boden(staub)aufnahme berechnet werden, welche unter Nutzung von Formel-Nr. 3 (Spielflächen-Szenario) die Prüfwert-Berechnung auch für das Szenario „Industrie/Gewerbe“

ermöglicht. Die Berechnung der durchschnittlichen täglichen Boden(staub)aufnahme (mg/kg/d) in einem Arbeitsjahr auf Grundlage der Vorgaben in („Ableitungsmaßstäbe“) erfolgt dabei mit folgenden Standardannahmen (Hinweis: In dieser Berechnung ist der Gewichtungsfaktor Z integriert):

- ▶ Tagesatemvolumen Erwachsener (mittlere Aktivität): 20 m³ /Tag
- ▶ Arbeitszeit pro Tag (24 Stunden): 8 Stunden
- ▶ Staubkonzentration Industrie/ Gewerbe (gemäß Formel 7): 0,325 mg/m³
- ▶ Reduzierung Staubbildung durch Bodenfeuchte: um Faktor 3
- ▶ Durchschnittliches Körpergewicht: 70 kg
- ▶ Arbeitstage pro Jahr (365 Tage): 225 Tage

Berechnung:

$20 \text{ m}^3/\text{Tag} \div 3 \text{ (8 Arbeitsstunden)} \times 0,325 \text{ mg/m}^3 \div 3 \text{ (Feuchtekorrektur)} \div 70 \text{ kg}$
(Körpergewicht) $\div 365 \text{ Arbeitstage} \times 225 \text{ Arbeitstage} = \mathbf{0,0064 \text{ mg/kg/d}}$

Kanzerogene Wirkungen (PFOA)

Berechnet mit: Formel-Nr. 5 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999), Resorptionsquote 100% (Standardannahme), Gefahrenfaktor 5 (Standardannahme), Gewichtungsfaktor Z für 40 Arbeitsjahre 25,8 (Standardannahme), Boden(staub)aufnahme 0,0103 mg/kg/d (Erläuterung siehe nach Formel), Anreicherungsfaktor A 10 (Standardannahme)

$$\text{Prüfwert (PFOA)} = \frac{0,00034 \frac{\text{ng}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 5 \cdot 25,8}{0,0103 \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot 10} = 0,425 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = \mathbf{425 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}} \quad (14)$$

Boden(staub)aufnahme: Für dieses Szenario wird gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ in Formel 9 in „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) auf die Schadstoffkonzentration in der Atemluft (in ng/m³), die einem zusätzlichen Risiko von 1 zu 100.000 entspricht, abgestellt; dieser Wert liegt für PFOA nicht vor. Alternativ kann aus der in Formel 9 eingehenden Staubkonzentration (0,325 mg/m³) unter Verwendung der relevanten Parameter dieses Szenarios die Boden(staub)aufnahme berechnet werden, welche unter Nutzung von Formel 5 (Spielflächen-Szenario) die Prüfwert-Berechnung für das Szenario „Industrie/Gewerbe“ ermöglicht (mit Gewichtungsfaktor Z für 40 Arbeitsjahre). Die Berechnung der durchschnittlichen täglichen Boden(staub)aufnahme (mg/kg/d) in einem Arbeitsjahr auf Grundlage der Vorgaben in („Ableitungsmaßstäbe“) erfolgt dabei mit folgenden Standardannahmen:

- ▶ Tagesatemvolumen Erwachsener (mittlere Aktivität): 20 m³ /Tag
- ▶ Arbeitszeit pro Tag (24 Stunden): 8 Stunden
- ▶ Staubkonzentration Industrie/ Gewerbe (gemäß Formel 9): 0,325 mg/m³
- ▶ Reduzierung Staubbildung durch Bodenfeuchte: um Faktor 3

► Durchschnittliches Körpergewicht: 70 kg

Berechnung:

$20 \text{ m}^3 / \text{Tag} \div 3 \text{ (8 Arbeitsstunden)} \times 0,325 \text{ mg/m}^3 \div 3 \text{ (Feuchtekorrektur)} \div 70 \text{ kg}$
 (Körpergewicht) = **0,0103 mg/kg/d**

12 Plausibilitätsprüfung

Die folgenden Tabellen zeigen die für den oralen und inhalativen Aufnahmepfad rechnerisch ermittelten Prüfwerte (siehe Kap. 11) im Überblick, welche in den folgenden Unterkapiteln gemäß den Anforderungen der „Ableitungsmaßstäbe“ im Blick auf ihre Plausibilität diskutiert werden.

Tabelle 2: Überblick berechnete Prüfwerte – orale Bodenaufnahme

Nutzungsszenario	Summe der PFAS (µg/kg) nicht kanzerogen	PFOA (µg/kg) kanzerogen
Kinderspielflächen	23	0,45
Wohngebiete	46	0,9
Park- und Freizeitflächen	115	2,3 (berechnet, geringfügig aufgerundet)
Industrie und Gewerbeflächen	-/-	-/-

Quelle: eigene Darstellung (Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“)

Tabelle 3: Überblick berechnete Prüfwerte – inhalative Bodenaufnahme

Nutzungsszenario	Summe der PFAS (µg/kg) nicht kanzerogen	PFOA (µg/kg) kanzerogen
Kinderspielflächen	922	18
Wohngebiete	1844	36
Park- und Freizeitflächen	4610	90
Industrie und Gewerbeflächen	11900	425

Quelle: eigene Darstellung (Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“)

12.1 Abgleich mit Erkenntnissen zu Geruchsschwellenkonzentrationen zur Prüfung möglicher erheblicher Belästigungen

Nicht relevant für die Stoffgruppe der PFAS.

12.2 Gemeinsame Wirkung mit anderen Stoffen

Die Informationslage zu gemeinsamen Wirkungen von PFAS mit weiteren altlastenrelevanten Stoffen ist generell begrenzt; dies insbesondere auch deswegen, da üblicherweise bereits die PFAS-Belastungen selbst komplexe Gemische vieler Einzelstoffe darstellen (siehe Frische et al., 2025). Vor diesem Hintergrund fokussiert die hier vorgenommene Prüfwert-Ableitung nur auf die in Kap. 3. dargestellte Stoffauswahl und ihre Gemische.

12.3 Berücksichtigung des perkutanen Aufnahmepfades

In Anlehnung an die „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) lässt sich mit einer Modellberechnung die für den perkutanen Pfad aufnahmerelevante Bodenkontaktmenge abschätzen. Die dort auf den Seiten 59-60 präsentierte Rechnung am Beispiel von „Kinderspielflächen“ als worst-case-Szenario *„ergibt die aufnahmerelevante Bodenkontaktmenge und gibt die Intensität des Schadstoffkontaktes an. Zur Beibehaltung einheitlicher Begriffe wird er analog zur oralen Exposition als Bodenaufnahmerate bezeichnet. Im Falle von PCP kann dieser Wert für die Bodenaufnahmerate bei dermale Kontakt direkt mit der Bodenaufnahmerate für oralen Bodenkontakt verglichen werden, da bei oraler Exposition eine Resorption von 100 % angenommen wird.“* Diese Modellrechnung ist somit – da auch für die hier betrachteten PFAS eine Resorptionsquote von 100 % bei oraler Exposition angenommen wird (siehe Kap. 3) – analog für PFAS (hier: PFOA) durchführbar. Die expositionsbeschreibenden Parameter sind:

- ▶ 10 kg Körpergewicht
- ▶ 5 Stunden Exposition
- ▶ 2100 cm² bedeckte Körperfläche
- ▶ 1,7 mg/cm² Schichtdicke (Bedeckung der Haut mit Boden)
- ▶ Resorption (PFOA) in 5h: 0,015%

Die Resorptionsquote von PFOA wurde aus den Ergebnissen der in Frische et al. (2025) kursorisch zusammengefassten empirischen Studie am Menschen nach Applikation von mit PFOA dotierter Sonnencreme abgeleitet. Ausgehend von der in dieser Studie ermittelten beobachteten Resorption (1,6% der applizierten Dosis nach 22 Tagen) wird unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Expositionszeit und resorbierter Menge eine Resorptionsquote von 0,015% abgeschätzt (1,6% dividiert durch 528 (22 d x 24 h) und das Ergebnis multipliziert mit 5 (5 h) ergibt 0,015%). Umgesetzt in Formel-Nr. 14 der „Ableitungsmaßstäbe“ errechnet sich folgende Bodenaufnahmerate:

$$2100 \text{ cm}^2 \text{ (Körperfläche)} \times 1,7 \text{ mg/cm}^2 \text{ (Schichtdicke)} \times 0,00015 \text{ (Resorption)} \div 10 \text{ kg (Körpergewicht)} = 0,053 \text{ mg/kg/d}$$

Das Ergebnis dieser Modellrechnung ergibt für den perkutanen Pfad eine geschätzte aufnahmerelevante Bodenkontaktmenge von 0,053 mg/kg/d. Dieser Wert entspricht 0,16% der laut „Ableitungsmaßstäbe“ für den oralen Pfad im Szenario „Kinderspielflächen“ als maßgeblich definierten Bodenaufnahme von 33 mg/kg/d. Der Beitrag des perkutanen Aufnahmepfades wird

vor dem Hintergrund dieses Ergebnisses gegenüber der oralen Bodenaufnahme bzw. für die Gesamtexposition als vernachlässigbar eingestuft.

12.4 Verhältnis von inhalativer und oraler Bodenaufnahme

Wie aus Tabelle 2 und 3 ersichtlich, resultieren aus den Berechnungen für den oralen Aufnahmepfad sowohl für Summe der PFAS (nicht-kanzerogene Wirkungen) als auch PFOA (kanzerogene Wirkungen) in den Szenarien Kinderspielflächen, Wohngebiete und Park- und Freizeitflächen deutlich niedrigere Prüfwerte als aus den entsprechenden Berechnungen für die inhalative Exposition gegenüber belasteten Stäuben – für diese Szenarien ist folglich der inhalative Aufnahmepfad als nachrangig einzustufen. Für das Szenario Industrie- und Gewerbeflächen ist der inhalative Aufnahmepfad gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ generell der entscheidende.

12.5 Bedeutung kanzerogener gegenüber nicht-kanzerogenen Wirkungen bei der Prüfwertableitung

Die in der Ableitung der Einzelstoffprüfwerte für PFOA berücksichtigten kanzerogenen Wirkungen sind von gleicher Bedeutung für die Gefährdungsabschätzung wie die in der Ableitung der Summen-Prüfwerte „Summe der PFAS“ berücksichtigten nicht kanzerogenen Wirkungen – diese Aussage gilt für alle betrachteten Szenarien. Folglich müssen diese beide Prüfwerte parallel in der Gefährdungsabschätzung betrachtet werden; konkret bedeutet dies, dass für einen Gefahrenausschluss aus toxikologischer Sicht neben dem Prüfwert für die „Summe der PFAS“ auch der Prüfwert für PFOA als Einzelsubstanz für das jeweilige Nutzungsszenario nicht überschritten werden darf.

12.6 Vergleich mit den Hintergrundgehalten in Böden

Die „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) sehen als ein wesentliches Kriterium der Plausibilitätsprüfung den Abgleich rechnerisch ermittelter Prüfwerte mit Daten zu Hintergrundgehalten von Böden vor. So heißt es im Wortlaut dort: *„Rechnerische Ergebnisse, die kleiner oder gleich den Hintergrundwerten der Böden sind, können zwar eine toxikologisch unerwünschte Belastung anzeigen, sie spiegeln jedoch keine einer Bodenveränderung zuzuordnende Gefahr wider und erscheinen daher als Prüfwert nicht geeignet.“* Dieser Abgleich ist insbesondere für den sehr niedrigen, für PFOA errechneten Prüfwert für kanzerogene Wirkungen (0,45 µg/kg) im Szenario Kinderspielflächen relevant, da dieser Wert – gemäß der in Kap. 7. dargestellten vorläufigen Auswertung – bereits im Bereich der bundesweiten PFOA-Hintergrundgehalte im Oberboden (90te Perzentil 0,41 µg/kg Trockensubstanz im Grünland) liegt und auf vereinzelt Standorten überschritten wird. Statt des rechnerisch ermittelten Prüfwertes wird daher ein plausibilisierter Prüfwert für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA für das Szenario Kinderspielflächen von 0,9 µg/kg vorgeschlagen. Dieser Wert begründet sich wie folgt: Ausgehend vom errechneten Prüfwert (0,45 µg/kg) wird – in Ermangelung einer numerischen Vorgabe bzw. expliziten Konvention für den „hinreichenden Abstand“ in den einschlägigen Rechtsgrundlagen (BBodSchG und „Ableitungsmaßstäbe“) – ein Faktor von zwei (2) als angemessen eingestuft, womit sich der plausibilisierte Prüfwertvorschlag von 0,9 µg/kg ergibt.

Der plausibilisierte Prüfwertvorschlag liegt damit um den Faktor 2,2 höher als das 90te Perzentil (0,41 µg/kg Trockensubstanz, Grünland) der PFOA-Oberbodengehalte des sämtliche Bundesländer abdeckenden Datensatzes; im Vergleich zum 90ten Perzentil (0,62 µg/kg Trockensubstanz, Grünland) der PFOA-Oberbodengehalte des Datensatzes im PFAS-Bodenhintergrundwerte-Projekt aus Nordrhein-Westfalen liegt der plausibilisierte Prüfwert-

Vorschlag nur um den Faktor 1,5 höher (siehe Kap. 7.) Trotz dieses Unterschiedes beim Vergleich des plausibilisierten Prüfwert-Vorschlags mit den beiden unabhängigen Datensätzen wird in der Gesamtschau der „hinreichende Abstand“ mit dem eingestellten Faktor 2 als angemessen gewahrt eingestuft.

Herauszustellen ist an dieser Stelle, dass mit dem plausibilisierten Prüfwert-Vorschlag von 0,9 µg/kg im Szenario Kinderspielflächen das gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) vorgesehene maximal zulässige zusätzliche akzeptable Krebsrisiko in der Altlasten-Gefährdungsabschätzung überschritten wird. So entspricht der für PFOA errechnete Prüfwert von 0,45 µg/kg wegen des in der Berechnung (siehe Kap. 11.1) berücksichtigten Gefahrenfaktors (5 als Standardannahme) einem statistischen zusätzlichen Krebsrisiko von 5×10^{-5} (5:100000), wie gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) vorgesehen. Der plausibilisierte Prüfwert (0,9 µg/kg) entspricht insofern dem doppelten statistischen zusätzlichen Krebsrisiko von 10×10^{-5} (10:100000). Zur Einordnung kann hier die Akzeptanzkonzentration für eine Exposition erwachsener Personen (diese sind i.d.R. weniger empfindlich als Kinder) gegenüber Krebs erzeugenden Stoffen am Arbeitsplatz herangezogen werden, das akzeptable Risiko beträgt hier 4×10^{-5} (4:100000). Damit liegt das statistische zusätzliche Krebsrisiko des plausibilisierten Prüfwertes (0,9 µg/kg) um das 2,5-fache über dem Akzeptanzwert für Krebs erzeugende Stoffe am Arbeitsplatz. Einschränkend gilt es zu erwähnen, dass für die meisten im Anhang 1 der TRGS 910 („Technische Regeln für Gefahrstoffe“) gelisteten Stoffe das Akzeptanzrisiko („übergangsweise“) noch mit 40:100000 festgelegt ist, womit den Beschäftigten ein höheres Krebsrisiko zugemutet wird.

Der errechnete Prüfwertvorschlag für die nicht kanzerogenen Wirkungen (Summe der PFAS) ist angesichts des aktuellen Kenntnisstandes zu den PFAS-Hintergrundgehalten in den Oberböden Deutschlands selbst für das empfindlichste Szenario Kinderspielflächen (errechneter Prüfwert von 23 µg/kg) als plausibel einzustufen. So besteht hier eindeutig ein „hinreichender Abstand“ zu dem 90ten Perzentil (1,56 µg/kg Trockensubstanz, Grünland) der Oberboden-Summengehalte der 19 PFAS (ohne PFPeS, PFNS, PFOA, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS) des sämtliche (Flächen-)Bundesländer abdeckenden Datensatzes (siehe Kap. 7.). Zudem ist es nach aktuellem Kenntnisstand höchst unwahrscheinlich, dass die zusätzliche Berücksichtigung der im Parameterumfang der Analytik fehlenden fünf PFAS (siehe Aufzählung vorab) diesen Abstand maßgeblich verringern würde.

12.7 Vergleich mit PFAS-Bodengehalten in Altlasten

Wie in Frische et al. (2025) dargelegt, treten an Schadensfällen und Altlasten PFAS-Bodengehalte bis in den deutlichen mg/kg-Bereich auf. Insofern sind die hier abgeleiteten Prüfwert-Vorschläge (im µg/kg-Bereich) zweifelsfrei geeignet, Gefährdungen bei direkter Bodenaufnahme gemäß der darin abgebildeten Nutzungsszenarien anzuzeigen.

Nach allgemeinem Kenntnisstand ist für verschiedene spezielle Schadensfälle mit einer Belastung der Böden mit weiteren PFAS-Verbindungen zu rechnen, welche über das hier in „Summe der PFAS“ berücksichtigte Spektrum der 24 Einzelsubstanz hinausgehen; dies betrifft insbesondere (polyfluorierte) Vorläuferverbindungen (Precursor) und PFOA-Ersatzstoffen etc. Wie in Frische et al. (2025) in Kap. 5.3 ausgeführt, können diese derzeit nicht toxikologisch begründet in die Parameterauswahl der „Summe der PFAS“ eingeschlossen werden. Der in Kap. 13. dokumentierte Hinweis „Ergänzung des Untersuchungsumfangs in speziellen Schadensfällen“ weist auf die aus diesem Umstand resultierende Unsicherheit für die Gefährdungsabschätzung hin. Dieser Hinweis ist zusätzlich mit den Prüfwerten zu kommunizieren; die darin zu findende (nicht-abschließende) Auflistung solcherart Spezialfälle

lehnt sich an BMUV (2022) an. Demselben Zweck dient die dort formulierte Empfehlung für ggfs. ergänzende Analysen mit dem TOP-Assay; siehe dazu auch Kap. 2.

12.8 Einbeziehung von Ergebnissen aus Humanbiomonitoring und epidemiologischen Studien

Ergebnisse aus Studien, die den relativen Beitrag der direkten Bodenaufnahme an PFAS-belasteten Standorten zur internen PFAS-Gesamtexposition beim Menschen quantifizieren, konnten nicht identifiziert werden. Die meisten Humanbiomonitoring- und epidemiologischen Studien zu stark PFAS-kontaminierten Standorten fokussieren auf die PFAS-Aufnahme über das Trinkwasser und/ oder die Nahrung, d.h. selbstangebautes Gemüse (z.B. Pitter et al., 2020; Johanson et al., 2023). Auch der Übergang von PFAS aus dem kontaminierten Boden in Eier aus privater Hühnerhaltung wird für Hotspots diskutiert (Lasters et al., 2022). Dieser Fokus entspricht dem Kenntnisstand zur PFAS-Belastung in der Allgemeinbevölkerung, für deren Exposition die Aufnahme von Lebensmitteln und Trinkwasser als maßgeblich angesehen werden (siehe Kap. 2.5 in Frische et al., 2025).

Die Ergebnisse aus Humanbiomonitoring-Studien an drei bekannten flächenhaften PFAS-kontaminierten Standorten in Deutschland fokussieren ebenfalls zentral auf die PFAS-Aufnahme über belastetes Trinkwasser:

- ▶ Human-Biomonitoring von perfluorierten Substanzen in Teilen des Landkreises Altötting (LGL, 2018)
- ▶ Weiterführung (3. Follow-Up) der Kohortenstudie zur PFT-Belastung in Blut und Trinkwasser im Hochsauerlandkreis (Ruhr-Universität Bochum, 2015)
- ▶ Ergebnisse der PFC-Blutkontrolluntersuchungen im Landkreis Rastatt 2018 und 2020 (LGL, 2018, 2020)

Die Ergebnisse dieser Studien bestätigen aber zumindest qualitativ die in der Ableitung des Summen-Prüfwertes (Summe der PFAS) für die nicht-kanzerogenen Wirkungen berücksichtigten PFAS; so dominierten in diesen Untersuchungen an PFAS-kontaminierten Standorten wie bei der Allgemeinbevölkerung klar die EFSA4 (PFOA, PFNA, PFHxS, POS) die interne Exposition, gefolgt von weiteren langkettigen PFAS (insbesondere PFDA, PFUnDA, PFDoDA). Die Studienergebnisse sind allerdings nicht nur hinsichtlich ihrer Aussagekraft für den relativen Beitrag der direkten Bodenaufnahme zur internen PFAS-Gesamtexposition limitiert, sondern auch, da nur ein begrenzter Parameterumfang in die PFAS-Analytik eingeschlossen war und die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der PFAS-Analytik zum Zeitpunkt der Studien relativ hoch waren.

Wie in Frische et al. (2025) ausgeführt, weisen die Risikoabschätzungen von EFSA und BfR auf eine bereits hohe Ausschöpfung des EFSA-4-TWI-Wertes in einigen Teilen der Allgemeinbevölkerung allein über die Nahrungsaufnahme hin. So stuft BfR (2021) Kinder (1-9 Jahre) als die Bevölkerungsgruppe mit der geschätzt höchsten externen PFAS-Exposition über Lebensmittel im Vergleich zu Heranwachsenden und Erwachsenen ein – diese Altersgruppe entspricht der für das empfindlichste Nutzungsszenario Kinderspielflächen relevanten Personengruppe. So sagt BfR (2021) im Wortlaut: *„Die Schätzung der externen Exposition jüngerer Kinder (1 bis 9 Jahre) gegenüber der Summe der vier PFAS entspricht teils bedingt durch den körperrgewicht-bezogen höheren Verzehr dem Zwei- bis Dreifachen der Höhe der Exposition Erwachsener. Die Exposition dieser Altersgruppe entspricht bei mittleren Gehalten an PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS in Lebensmitteln etwa dem Dreifachen (Median) bis Elffachen (95. Perzentil) der Höhe des TWI.“* Dass die dieser Aussage zugrunde liegenden Abschätzungen zur PFAS-Exposition über den

Nahrungspfad mit großen Unsicherheiten behaftet ist, stellt das BfR dabei heraus. Zudem widerspricht die externe Expositionsabschätzung den Ergebnissen zur internen Exposition, für die BfR (2021) feststellt: *„Die Daten aktueller Untersuchungen zur internen Exposition von Kindern weisen darauf hin, dass die Blutgehalte der Einzelverbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS im 95. Perzentil unterhalb der Summenanteile dieser Verbindungen am kritischen internen Expositionsniveau von 17,5 µg/L liegen. Lediglich einzelne publizierte Maximalwerte der Blutgehalte der Einzelverbindungen der untersuchten Kinder liegen deutlich über diesen Summenanteilen des Expositionsnieaus von 17,5 µg/L (...).“*

In der Zusammenschau bedeutet dies, dass angesichts der aktuell begrenzten Informationslage der relative Beitrag der direkten Bodenaufnahme an PFAS-belasteten Standorten zur PFAS-Gesamtbelastung nicht aussagekräftig abgeschätzt werden kann.

12.9 Gegenrechnung der akuten Wirkung bei einmalig hoher Bodenaufnahme

Eine Gefahr akuter Wirkungen der hier betrachteten PFAS ist in Anbetracht des toxikologischen Profils (siehe Frische et al. 2025) nicht relevant; so liegen die LD₅₀-Werte aus Tierversuchen nach oraler Aufnahme z.B. für PFOS und PFOA bei 251 mg/kg bzw. 430 mg/kg und damit um mehrere Größenordnungen oberhalb der Schwellenwerte für die langfristigen Wirkungen.

12.10 Abstufung berechneter Prüfwerte zwischen den Szenarien

Die in Tabelle 3 dokumentierten Prüfwert-Berechnungen für das Szenario „Industrie- und Gewerbeflächen“ bei inhalativer Bodenaufnahme ergeben für die nicht-kanzerogenen Wirkungen für „Summe der PFAS“ (11900 µg/kg) und für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA (425 µg/kg) im Vergleich zu den „empfindlicheren“ Szenarien (Kinderspielflächen etc.) deutlich höhere Werte. Die „Ableitungsmaßstäbe“ formulieren für solche Konstellationen eine generelle Anforderungen an die sachgerechte Abstufung zwischen den Szenarien zur Vermeidung von sekundären Verunreinigungen aus Industrie- und Gewerbeflächen: *„Es wird davon ausgegangen, dass die Abstufung dann sachgerecht ist, wenn sichergestellt ist, dass es bei Einhaltung der Prüfwerte für Industrie- und Gewerbegrundstücke nicht zu sekundären Verunreinigungen auf umgebenden Flächen kommen kann, wenn Bodenmaterial von Industrie- und Gewerbegrundstücken ungezielt und diffus abgeschwemmt und verweht oder durch Rutschungen verbracht wird.“* Vor diesem Hintergrund wird für beide Prüfwerte („Summe der PFAS“ nicht-kanzerogen und PFOA kanzerogen) die Anwendung des bereits bei anderen Prüfwert-Ableitungen (Blei, Quecksilber, DDT, Hexyl, Hexogen, Nitropenta, Pentachlorphenol und TNT) eingesetzten Plausibilitätskriteriums „Abschwemmungen, Verwehungen, Rutschungen“ vorgeschlagen. Standardmäßig wurde in diesen Ableitungen als plausibilisierter Wert der für Park- und Freizeitanlagen berechnete Prüfwert multipliziert mit dem Faktor 2 definiert. Die plausibilisierten Prüfwert-Vorschläge für das Szenario Industrie- und Gewerbeflächen lauten demnach für Summe der PFAS (nicht kanzerogene Wirkungen) 230 µg/kg und für PFOA (kanzerogene Wirkungen) 4,6 µg/kg.

12.11 Grenz- und Richtwerte in anderen Umweltmedien (Luft, Nahrung) sowie PFAS-Bodenwerte anderer europäischer Länder

Wie in Frische et al. (2025) ausführlicher beschrieben, ist für die Umsetzung der EU-Trinkwasserrichtlinie 2020/2184 in Deutschland ab 2026 einerseits der Summengrenzwert „Summe PFAS-20“ von 100 ng/L sowie ab 2028 der Summengrenzwert „Summe PFAS-4“ (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) von 20 ng/L vorgesehen. Wie dort ebenfalls beschrieben, gelten mit

Verordnung (EU) 2023/915 bereits seit Januar 2023 EU-weite Höchstgehalte für die EFSA4-PFAS (einzeln und in Summe) für tierische Lebensmittel. Ergänzend hat die EU-Kommission zusätzlich eine Empfehlung (EU) 2022/1431 zur Überwachung von PFAS in weiteren Lebensmitteln ausgesprochen.

In der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2021) sind zudem für sieben einzelne PFAS (PFBA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser definiert, die Werte liegen zwischen 0,06 µg/L für PFNA und 10 µg/L für PFBA. Für weitere sechs PFAS (PFPeA, PFHpA, PFDA, PFHpS, 6:2 FTS, PFOSA) sind außerdem vorsorgeorientierte gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) abgeleitet worden, die ebenfalls für die Bewertung von PFAS im Grundwasser empfohlen werden (BMUV, 2022).

In einigen europäischen Ländern liegen bereits Bodenwerte zur Gefährdungsabschätzung PFAS-kontaminierter Böden vor (Schweden, Norwegen, Niederlande, Flandern, Dänemark, Schweiz, UK); diese stammen nach einer orientierender Recherche etwa aus den Jahren 2021 bis 2023, teilweise befinden sie sich gerade im Prozess der Aktualisierung. Allerdings ist ein unmittelbarer Vergleich der hier für den Direktpfad abgeleiteten Prüfwert-Vorschläge mit diesen internationalen Bodenwerten in den meisten Fällen wenig aussagekräftig. Dies begründet sich aus der Tatsache, dass sich die Ableitungen im Blick auf diverse Grundlagen und Eingangsgrößen unterscheiden (betrachtete Schutzgüter, Nutzungs- und Expositionsszenarien, Rechenmodelle, Aktualität der Eingangsdaten, etc.). Generell ist festzustellen, dass bisher nur wenige Länder explizite Bodenwerte für PFAS-Gemische abgeleitet haben. Zudem hat bisher keines der o.g. Länder in der Ableitung die erst kürzlich veröffentlichte Neubewertung der kanzerogenen Wirkungen von PFOA durch WHO-IARC berücksichtigt. Zwei Länder (Dänemark und Schweiz) haben Bodenwerte für ein vergleichbares Szenario wie die Kinderspielflächen gemäß „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) und haben die Ableitung ebenfalls mit dem EFSA4-TWI- bzw. -TDI-Wert vorgenommen, die resultierenden Bodenwerte entsprechen näherungsweise dem Prüfwertvorschlag für „Summe der PFAS“ von 23 µg/kg.

13 Übersicht der Prüfwert-Vorschläge (Tabellen und Text)

Aus den Berechnungen in Kap. 11. sowie den Plausibilitätsüberlegungen in Kap. 12 ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle dokumentierten Prüfwert-Vorschläge.

Tabelle 4: Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS

Nutzungsszenario (maßgebliche Exposition: orale Aufnahme)	Summe der PFAS (µg/kg) nicht kanzerogen	PFOA (µg/kg) kanzerogen
Kinderspielflächen	23 (berechnet)	0,9 (plausibilisiert* ¹)
Wohngebiete	46 (berechnet)	0,9 (berechnet)
Park- und Freizeitflächen	115 (berechnet)	2,3 (berechnet, geringfügig aufgerundet)
Industrie und Gewerbeflächen	230 (plausibilisiert* ²)	4,6 (plausibilisiert* ²)

*¹plausibilisiert mit aktuellem Kenntnisstand zu PFOA-Boden-Hintergrundgehalten in DE (Stand: Januar 2025)

*²plausibilisiert mit Kriterium „Abschwemmungen, Verwehungen, Rutschungen“ (Konvention: Park-/Freizeit-PW x 2)

Quelle: eigene Darstellung (Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“)

Stellvertretend für die Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) werden die in der folgenden Tabelle aufgelisteten 24 Substanzen **standardmäßig** untersucht.

Tabelle 5: Parameterumfang „Summe der PFAS“

Substanzname (Kurzform)	Summenformel	CAS-Nr.
Perfluorcarbonsäuren (PFCA)		
Perfluorheptansäure (PFHpA)	C ₇ HF ₁₃ O ₂	375-85-9
Perfluoroctansäure (PFOA)	C ₈ HF ₁₅ O ₂	335-67-1
Perfluornonansäure (PFNA)	C ₉ HF ₁₇ O ₂	375-95-1
Perfluordecansäure (PFDA)	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	335-76-2
Perfluorundecansäure (PFUnDA)	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	2058-94-8
Perfluordodecansäure (PFDoDA)	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	307-55-1
Perfluortridecansäure (PFTrDA)	C ₁₃ HF ₂₅ O ₂	72629-94-8
Perfluortetradecansäure (PFTeDA)	C ₁₄ HF ₂₇ O ₂	376-06-7
Perfluorsulfonsäuren (PFSA)		
Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS)	C ₅ HF ₁₁ O ₃ S	2706-91-4
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S	355-46-4
Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS)	C ₇ HF ₁₅ O ₃ S	375-92-8
Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	1763-23-1
Perfluornonansulfonsäure (PFNS)	C ₉ HF ₁₉ O ₃ S	68259-12-1
Perfluordecansulfonsäure (PFDS)	C ₁₀ HF ₂₁ O ₃ S	335-77-3
Perfluorundecansulfonsäure (PFUnDS)	C ₁₁ HF ₂₃ O ₃ S	749786-16-1
Perfluordodecansulfonsäure (PFDoDS)	C ₁₂ HF ₂₅ O ₃ S	79780-39-5
Perfluortridecansulfonsäure (PFTrDS)	C ₁₃ HF ₂₇ O ₃ S	791563-89-8
Vorläuferverbindungen (Precursor)		
6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS, H4PFOS)	C ₈ H ₅ F ₁₃ O ₃ S	27619-97-2
8:2 Fluortelomersulfonsäure (8:2 FTS)	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O ₃ S	39108-34-4
Perfluoroctansulfonamid (PFOSA)	C ₈ H ₂ F ₁₇ N ₂ O ₂ S	754-91-6
N-Methyl-Perfluoroctansulfonamid (N-MeFOSA)	C ₉ H ₄ F ₁₇ N ₂ O ₂ S	31506-32-8
N-Methyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure (N-MeFOSAA)	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ N ₂ O ₄ S	2355-31-9
N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamid (N-EtFOSA)	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ N ₂ O ₂ S	4151-50-2
N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure (N-EtFOSAA)	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ N ₂ O ₄ S	2991-50-6

Quelle: eigene Darstellung (Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Direktpfad“)

Ergänzung des Untersuchungsumfangs in speziellen Schadensfällen:

Liegen aus Vorerkundungen Erkenntnisse über die Belastung des Standortes mit weiteren – insbesondere längerkettigen (d.h. 7 bis 14 Kohlenstoffatome) – per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) bzw. mit PFAS-Vorläufersubstanzen, die im Boden bekanntermaßen oder vermutlich in längerkettige PFCA/PFSA transformiert werden, vor, so sind diese zusätzlich in den Umfang der zu untersuchenden Substanzen aufzunehmen. Beispiele für solche speziellen Schadensfälle sind:

- ▶ Einträge von Löschsäumen (Capstone A und B),
- ▶ Einträge aus der Textilindustrie (FTOH),
- ▶ Einträge von PFOA-Ersatzstoffen (GenX und ADONA),
- ▶ Einträge von Abfällen der Papierindustrie (PAPs, SAmPAPs, FTMAP, FTCA, FTSA)

Ermittelte Bodengehalte solcher zusätzlichen PFAS werden nicht quantitativ berücksichtigt, d.h. keine Einrechnung in den Bodengehalt „Summe der PFAS“ für Vergleich mit Prüfwert (da toxikologisch nicht plausibel zu begründen). Die Ergebnisse sind in der Detailuntersuchung zu bewerten.

Zusätzliche Empfehlung

Durchführung TOP-Assay mit Feststoff (Methanol-Extrakt oder dTOP), wenn (insbesondere nahe der Schadstoffquelle) mit einer Belastung mit (unbekannten) Vorläufersubstanzen zu rechnen ist, aus denen (vor allem) PFCA gebildet werden.

Zusätzliche Hinweise

PFAS können sich in Eiern von im Freiland gehaltenen Hühnern anreichern. Auch eine Unterschreitung der Prüfwerte für die „Summe der PFAS“ (ab 23 µg/kg Boden) schließt eine Überschreitung der in der EU vorgeschriebenen Höchstgehalte für Eier (EU-Verordnung 2023/915) nicht aus. Daher sollte dieser Pfad ggf. in der Detailuntersuchung berücksichtigt werden. Bei einer Unterschreitung des PFOA-Prüfwertes von 0,9 µg/kg Boden (kanzerogene Wirkungen, Nutzung Wohngebiete) ist eine Überschreitung des PFOA-Höchstgehalts in Eiern nach derzeitigem Kenntnisstand unwahrscheinlich.

Es wird darauf hingewiesen, dass andere Flächennutzungen bzw. speziellere Expositionsszenarien (z.B. die Aufnahme von Stäuben auf PFAS-belasteten landwirtschaftlichen Flächen durch Landwirte/ Saisonarbeiter/ Spaziergänger etc. oder die Aufnahme von PFAS infolge der Nutzung von Waldflächen wie u.a. Waldkindergärten) nicht durch die in der obigen Tabelle dargestellten Nutzungsszenarien (gemäß „Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten...“) abgebildet sind. Die Gefährdungsbeurteilung für diese spezielleren Flächennutzungen bzw. Expositionsszenarien muss daher im Einzelfall im Rahmen einer Detailuntersuchung erfolgen.

14 Quellenverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) (2018). Human-Biomonitoring von perfluorierten Substanzen in Teilen des Landkreises Altötting - Abschlussbericht. Retrieved from München: https://www.lgl.bayern.de/downloads/gesundheit/arbeitsplatz_umwelt/doc/bericht_hbm_altoetting_2018_07_11.pdf

Bieber, A., Biegel-Engler, A., Gierig, D. M., Keese, K., Klose, A., Maier, D. U., Raffelsiefen, M., Schroers, S., Straßburger, T., Ungermann, A., & Wiedenhöft, C. (2022). Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hrsg.) https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf

Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2017). Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf

Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2021). PFAS in Lebensmitteln: BfR bestätigt kritische Exposition gegenüber Industriechemikalien. https://doi.org/10.17590/20210628-133602_Stand_26.06.2025

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (1999). Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten gemäß § 8 des Gesetzes zum Schutz des Bodens (BBodSchG) vom 17.3.1998 sowie § 4 Abs. 5 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundesgesetzblatt, 161. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/ableitung_der_pr_und_ma_nahmenwerte.pdf

DIN 38414-14:2011-08 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS).

EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L., Leblanc, J.-C., Nebbia, C. S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Vleminckx, C., Wallace, H., Barregård, L., Ceccatelli, S., ...Schwerdtle, T. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal, 18(9), e06223. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>

Europäische Kommission (2023). VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006, (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915&qid=1742368666134>

Frische, T, Baaske-Scholze, C, Derese, C, Kowalczyk, J, Osterauer, R, Rippen, G, Roth, P, Salzmänn, M, Werner, I (2025). Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) - finale Version vom 30.04.2025.

Göckener, B., Lange, F. T., Lesmeister, L., Gökçe, E., Dahme, H. U., Bandow, N., & Biegel-Engler, A. (2022). Digging deep—implementation, standardisation and interpretation of a total oxidisable precursor (TOP) assay within the regulatory context of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in soil. Environmental Sciences Europe, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00631-1>

International Agency for Research on Cancer (IARC) (2025). Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). IARC Monogr Identif Carcinog Hazards Hum. 135:1–754. <https://publications.iarc.who.int/636>

ISO 21675:2019-10 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Wasser - Verfahren mittels Flüssigkeitschromatographie/Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) nach Festphasenextraktion.

Johanson, G., Gyllenhammar, I., Ekstrand, C., Pyko, A., Xu, Y., Li, Y., . . . Vogs, C. (2023). Quantitative relationships of perfluoroalkyl acids in drinking water associated with serum concentrations above background in adults living near contamination hotspots in Sweden. *Environ Res*, 219, 115024.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115024>

Lasters, R., Groffen, T., Eens, M., Coertjens, D., Gebbink, W. A., Hofman, J., & Bervoets, L. (2022). Home-produced eggs: An important human exposure pathway of perfluoroalkylated substances (PFAS).

Chemosphere, 308(Pt 1), 136283. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136283>

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (2024).

Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen (LANUV-Fachbericht 150). https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV-Fachbericht_150.pdf

Pitter, G., Da Re, F., Canova, C., Barbieri, G., Zare Jeddi, M., Dapra, F., . . . Russo, F. (2020). Serum Levels of Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Adolescents and Young Adults Exposed to Contaminated Drinking Water in the Veneto Region, Italy: A Cross-Sectional Study Based on a Health Surveillance Program. *Environ Health Perspect*, 128(2), 27007. <https://doi.org/10.1289/EHP5337>

Europäisches Parlament (2020). RICHTLINIE (EU) 2020/2184 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, (2020). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&qid=1742369539864>

Ruhr-Uni Bochum (2015). Weiterführung (3. Follow-Up) der Kohortenstudie zur PFT-Belastung in Blut und Trinkwasser im Hochsauerlandkreis (Werkvertrag Nr. 34/10) - Abschlussbericht.

https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/gesundheit/pdf/Abs_PFT_follow_up2010_03_07_15.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2024b). FINAL Human Health Toxicity Assessment for Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Related Salts (EPA Document No. 815R24006).

<https://www.epa.gov/sdwa/human-health-toxicity-assessment-perfluorooctanoic-acid-pfoa>

Wellmitz, J., Bandow, N., & Koschorreck, J. (2023). Long-term trend data for PFAS in soils from German ecosystems, including TOP assay. *Sci Total Environ*, 893, 164586.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164586>

Zahm, S., Bonde, J. P., Chiu, W. A., Hoppin, J., Kanno, J., Abdallah, M., Blystone, C. R., Calkins, M. M., Dong, G. H., Dorman, D. C., Fry, R., Guo, H., Haug, L. S., Hofmann, J. N., Iwasaki, M., Machala, M., Mancini, F. R., Maria-Engler, S. S., Moller, P., ...Schubauer-Berigan, M. K. (2024). Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. *The Lancet. Oncology*, 25(1), 16-17. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8)