

TEXTE

50/2026

Abschlussbericht

Ableitung von Bodenwerten für PFAS

ein Eigenforschungsprojekt des UBA

von:

Dr. Tobias Frische, Lennart Gehrenkemper
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

TEXTE 50/2026

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

Forschungskennzahl 3721 742 01 0
FB001920

Abschlussbericht

Ableitung von Bodenwerten für PFAS

ein Eigenforschungsprojekt des UBA

von

Dr. Tobias Frische, Lennart Gehrenkemper
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

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
06884 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

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

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8137>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren

Danksagung

Die Autoren möchten sich persönlich und im Namen des Umweltbundesamtes sehr herzlich bei den engagierten Kolleginnen und Kollegen bedanken, die ihr Fachwissen in den Ad hoc-Arbeitsgruppen „PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“ und „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ eingebracht haben.

Kurzbeschreibung: Ableitung von Bodenwerten für PFAS

Zielstellung des in diesem Bericht dokumentierten Forschungsvorhabens „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ 3721742010) 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. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf den Pfaden Boden-Pflanze und Boden-Mensch, für die jeweils Prüfwert-Vorschläge von zwei im Rahmen des Projektes eingerichteten Experten-Arbeitsgruppen erarbeitet wurden. Für den Pfad Boden-Pflanze wurden Prüfwert-Vorschläge für vier einzeln betrachtete PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze sowie sechs Prüfwert-Vorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze erarbeitet (PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFBS als Einzelsubstanzen sowie ein Prüfwert für die Summe der EFSA4-PFAS, d.h. Summe von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS). Für den Pfad Boden-Mensch wurde ein Vorschlag für einen Summen-Prüfwert „Summe der PFAS“ für die nichtkanzerogenen Wirkungen (dieser umfasst standardmäßig 24 überwiegend langkettige PFAS bzw. deren bekannte Vorläufersubstanzen) sowie einen zusätzlich geltenden Prüfwert-Vorschlag für die kanzerogenen Wirkungen von PFOA erarbeitet. Die Prüfwert-Vorschläge für den Pfad Boden-Mensch wurden bereits vom Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) fachlich befürwortet.

Abstract: Derivation of guideline values for PFAS in soil

The objective of the research project “Derivation of guideline values for PFAS in soil” (FKZ 3721742010) documented in this report was the scientific derivation of guideline values for representatives of the PFAS (Per- and polyfluoroalkyl substances) substance group in accordance with the requirements of the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) and the current state of knowledge. The work focused on the soil-plant and soil-human pathways, for which guideline value proposals were developed by two expert working groups set up in the context of the project. Guideline value proposals were developed for four individually considered PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS and PFOS) for the soil-feed plant exposure pathway and six guideline value proposals for the soil-food plant exposure pathway (PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFBS as individual substances and the sum of EFSA4-PFAS, i.e. the sum of PFOA, PFNA, PFHxS and PFOS). For the soil-human pathway a proposal was developed for a sum guideline value (“sum of PFAS”) for non-carcinogenic effects including 24 predominantly long-chain PFAS and some known precursor compounds which applies in conjunction with a proposed guideline value for the carcinogenic effects of PFOA. The guideline value proposals for the soil-human pathway have already been technically endorsed by the Standing Committee on Contaminated Sites (ALA) of the Federal/State Working Group on Soil Protection (LABO).

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	12
Summary	18
1 Einleitung.....	24
1.1 PFAS in Böden – Eintragspfade, Belastungssituation und existierende bodenschutzrechtliche Regelungen	24
1.1.1 PFAS – Charakterisierung als Umwelt- und Bodenschadstoffe.....	24
1.1.2 Altlastenrelevanz von PFAS.....	24
1.1.3 PFAS-Hintergrundgehalte (bzw. -werte) in den Oberböden Deutschlands	25
1.1.4 Existierende bodenschutzrechtliche Regelungen für PFAS in Deutschland	26
1.2 Einführung neuer Bodenwerte – rechtlicher und fachlicher Hintergrund	27
1.2.1 Zuständigkeiten, Beteiligungen, Entscheidungsprozess	27
1.2.2 Festlegung und rechtliche Verbindlichkeit fachlicher Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten	28
1.2.3 „Ableitungsmaßstäbe“ (1999) – Erarbeitung, wissenschaftlicher Erkenntnisstand und Überprüfung	29
1.2.4 Veröffentlichung der Begründungen / Ableitungen von neuen oder überarbeiteten Prüf- und Maßnahmenwerten	30
1.3 Projektziele, Vorgehensweise und Struktur des Berichts	31
2 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Pflanze	33
2.1 Ad hoc-Arbeitsgruppe „PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“ – Zusammensetzung und Arbeitsweise.....	33
2.2 Prüfwert-Vorschläge für PFAS für den Pfad Boden-Pflanze	34
2.3 Diskussion und Forschungsbedarf.....	35
3 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)	37
3.1 Ad hoc-Arbeitsgruppe „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ – Zusammensetzung und Arbeitsweise.....	37
3.2 Prüfwert-Vorschläge für PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)	38
3.2.1 Die Prüfwert-Vorschläge in der Übersicht	38
3.2.2 Bisheriger Verlauf und aktueller Sachstand der Gremienbefassung mit den Prüfwert-Vorschlägen	41
3.3 Diskussion und Ausblick	41
4 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Grundwasser	45

4.1	Ausgangspunkt.....	45
4.2	Ableitung von Bodenwerten für den Pfad Boden-Grundwasser.....	46
5	Grundsätzliche Überlegungen zur Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS	48
5.1	Ableitung von Vorsorgewerten – rechtliche und fachliche Ausgangslage	48
5.2	Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS – grundsätzliche rechtliche und fachliche Überlegungen.....	48
6	Zusammenfassende Diskussion der Projektergebnisse und Ausblick	53
7	Quellenverzeichnis	55
Anhang 1 „Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ – Dokumentation der Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Boden-Pflanze“ vom 30.04.2025		
		58
Anhang 2 „Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ – Dokumentation der Ad hoc-AG „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ vom 30.04.2025		
		59
Anhang 3 „Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch“ – Dokumentation der Ad hoc-AG „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ vom 30.04.2025		
		60
Anhang 4 Posterpräsentation „Guideline values for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils – a survey at EU Member State Level“ (Quelle: eigene Darstellung T. Frische, UBA)		
		61
Anhang 5 Posterpräsentation „Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil and Wild Boar Samples from a PFAS Hot Spot Area – a Comparative Chemical Fingerprinting Exercise“ (Quelle: eigene Darstellung T. Frische, UBA)		
		62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Pflanze34
Tabelle 2:	Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)38
Tabelle 3:	Standard-Parameterumfang „Summe der PFAS“39
Tabelle 4:	Zusammenstellung von GFS- und GOW-Werten entsprechend BBodSchV und „PFAS-Leitfaden“, sowie „toxikologisch begründeten Konzentrationen“45

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
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
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (ab 2025)
ECHA	European Chemicals Agency
EFSA	European Food Safety Authority
EFSA4-PFAS	PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS
EU	Europäische Union
6:2 FTS (H4PFOS)	6:2 Fluortelomersulfonsäure
8:2 FTS	8:2 Fluortelomersulfonsäure
FTCAs	Fluorotelomercarboxylsäuren
FTMAP	Fluortelomermercaptoalkylphosphatester
FTSAs	Fluorotelomersulfonsäuren
GD	Gefahrenbezogene Dosis

Abkürzung	Erläuterung
HFPO-DA (GenX)	Hexafluorpropylenoxiddimersäure bzw. seine prominenten Verbindungen
HI	Hazard index
IARC	International Agency for Research on Cancer
JRC	Joint Research Center – EU Commission
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level
MRL	Maximum Residue Limit/Level
NG	Nachweisgrenze
N-EtFOSA	N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamid
N-EtFOSAA	N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure
N-MeFOSA	N-Methyl-Perfluoroctansulfonamid
N-MeFOSAA	N-Methyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level
PAPs	Polyfluoralkylphosphatester
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanz(en)
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFCA	Perfluorcarbonsäuren
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

Abkürzung	Erläuterung
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
PFPeA	Perfluoropentansäure
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure
PFPrA	Perfluorpropansäure
PFPrS	Perfluorpropansulfonsäure
PFSa	Perfluorsulfonsäuren
PFTeDA	Perfluortetradecansäure
PFTrDA	Perfluortridecansäure
PFTrDS	Perfluortridecansulfonsäure
POD	Point of Departure
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RPF	Relative Potency Factor
RIVM	National Institute for Public Health and the Environment
Sam-PAPs	Perfluorooctansulfonamidoethanol-basierte Phosphatester
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

Zusammenfassung

Zielstellung des in diesem Bericht dokumentierten Forschungsvorhabens „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ 3721742010) war die fachliche Ableitung von Bodenwerten für Vertreter der Stoffgruppe der PFAS gemäß Anforderungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und aktuellem Stand des Wissens. Es handelte sich um ein Eigenforschungsvorhaben des Umweltbundesamtes (UBA) im Fachgebiet II 2.6 (Maßnahmen des Bodenschutzes), durchgeführt mit finanzieller Unterstützung aus Mitteln des Ressortforschungsplan 2021 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV; neu ab 2025: Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BMUKN).

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 sind PFAS aus den Untergruppen der perfluorierten Carbonsäuren (Perfluoroalkyl Carboxylic Acids, PFCA) und der perfluorierten Sulfonsäuren (Perfluoroalkyl Sulphonic Acids, PFSA). Die beiden bekanntesten/ am besten untersuchten Vertreter aus diesen Untergruppen sind PFOA (Perfluorooctansäure) bei den PFCA und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) bei den PFSA.

Eine aus Sicht des Umwelt- und Gesundheitsschutzes wesentliche besorgniserregende Eigenschaft, welche PFAS aufgrund ihrer stabilen chemischen Struktur aufweisen, ist ihre Persistenz. Das heißt, PFAS können unter Umweltbedingungen nicht auf natürlichem Wege abgebaut werden – aus dieser Eigenschaft rührt auch die Bezeichnung von PFAS als „forever chemicals“ bzw. Ewigkeitschemikalien. In Verbindung mit einer relativ 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 mit infolgedessen höherer PFAS-Bodenbelastung resultieren hingegen üblicherweise aus Schadensereignissen und Unfällen (z.B. Einsatz PFAS-haltiger Löschschäume) oder der Ausbringung PFAS-haltiger Klärschlämme oder Komposte/ Bodenhilfsstoffe. Belastete Böden stellen 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 Rohwasser, was zur Trinkwasserherstellung verwendet wird. PFAS werden von Pflanzen, Tieren und Menschen aufgenommen und nur langsam wieder ausgeschieden, sie reichern sich entlang der Nahrungsketten an, und zudem sind einige besser untersuchte PFAS gesundheitsschädlich für den Menschen.

Ein umfassend-systematischer Überblick (im Sinne eines bundesweiten Katasters) über Standorte in Deutschland, an denen vermutlich oder bekanntermaßen PFAS-Belastungen vorliegen existiert derzeit nicht. Bekannte Standorte mit hohen PFAS-Belastungen im Boden und/ oder Grundwasser („Hotspots“) stehen oft im Zusammenhang mit der Verwendung PFAS-haltiger Löschschäume bei Feuerwehreinsätzen und -übungen, z.B. an Flughäfen und Militärstandorten. Zudem gibt es großräumigere Belastungen infolge von Emissionen aus Anlagen der fluorchemischen Industrie, hier wurden PFAS über Abluft und Abwasser in die Umwelt eingetragen. Neben fluorchemischen Produktionsstandorten ist der Eintrag von PFAS in die Umwelt auch für u.a. Textilveredelungsbetriebe, Papierhersteller, lederverarbeitende Betriebe, Galvanikbetriebe und die Hersteller von Feuerlöschmitteln bekannt und/ oder vermutet. Weitere großflächige Verunreinigungen von Böden und in der Folge des Grundwassers

entstanden in der Vergangenheit durch das Ausbringen von Klärschlämmen, Komposten/ Bodenhilfsstoffen, die offensichtlich mit PFAS-haltigen Materialien belastet waren (s.o.).

Aktuell sind in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) nur für sieben PFAS bundeseinheitliche Regelungsansätze (Prüfwerte) und dies auch nur für die Gefährdungsabschätzung für den Pfad Boden-Grundwasser festgeschrieben. Weitere vorläufige Regelungsansätze finden sich in einem von Bund und Ländern im Jahr 2022 veröffentlichten „Leitfaden zur PFAS-Bewertung“, welcher übergangsweise in den Bundesländern zur Verwendung kommt bis weitere gesetzlichen Regelungen auf Bundesebene vorhanden sind. Allerdings umfasst dieser Leitfaden keine Regelungsvorschläge für PFAS für die anderen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) relevanten Pfade Boden-Mensch (Direktpfad), Boden-Pflanze und ebenfalls nicht für Vorsorgewerte. Der Bedarf für entsprechende Ergänzungen der bundeseinheitlichen Regelungen wurde bereits in der 87. Umweltministerkonferenz am 02.12.2016 in Berlin formuliert. Hintergrund für den dortigen Beschluss waren die bestehenden Rechtsunsicherheiten und die Besorgnis uneinheitlichen Vollzugshandelns der zuständigen Behörden der Bundesländer. Erst mit der Aufnahme solcher Bodenwerte für PFAS steht den Länderbehörden eine bundeseinheitlich rechtssichere Grundlage zur Verfügung. Diese bildet beispielsweise die Basis für Entscheidungen über den Umgang mit PFAS-kontaminierten Böden, ob Detailuntersuchungen oder Nutzungsbeschränkungen anzuordnen sind. So sind Prüfwerte gemäß Paragraph 8 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) definiert als Werte, *„bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt“*.

Nachfolgend sind die wesentlichen Arbeitsergebnisse für die im Rahmen des Forschungsvorhabens bearbeiteten Pfade bzw. Bodenwerte (Boden-Pflanze, Boden-Mensch, Boden-Grundwasser sowie Vorsorgewerte) skizziert, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten auf den Pfaden Boden-Pflanze und Boden-Mensch lag.

Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Pflanze

Die Erarbeitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Pflanze erfolgte durch eine zu diesem Zweck etablierte Ad hoc-Arbeitsgruppe. Dieser Arbeitsgruppe gehörten mit der Thematik befasste Fachleute aus Landes- und Bundesbehörden sowie von Universitäten und Forschungseinrichtungen an. Erarbeitet wurden Prüfwert-Vorschläge für vier einzeln betrachtete PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze und sechs Prüfwert-Vorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze (PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFBS als Einzelsubstanzen sowie für die Summe der EFSA4-PFAS, d.h. Summe von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS). Eine Vorstellung der Prüfwert-Vorschläge in kompetenten Fachgremien von Bund und Ländern ist bisher noch nicht erfolgt. Die fachlichen Prüfwert-Vorschläge haben aus zwei Gründen einen deutlich provisorischen Charakter: So lagen einerseits für die Ableitung keine rechtlich verbindlichen zulässigen Höchstgehalte für PFAS in pflanzlichen Lebensmitteln und Futtermitteln vor. Weiterhin stellt die relativ begrenzte Datenlage zum Transfer von PFAS aus dem Boden in Pflanzen - insbesondere bei niedrigen PFAS-Bodengehalten - eine erhebliche Bewertungsunsicherheit dar. Die fachliche Ableitung der Prüfwert-Vorschläge wurde von der Ad hoc-AG in einer ausführlichen Dokumentation mit dem Titel „Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ beschrieben, welche diesem Projektbericht als Anhang beigefügt ist. In der folgenden Tabelle sind die fachlich erarbeiteten Prüfwert-Vorschläge dokumentiert.

Tabelle: Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Pflanze

	PFHxS Boden- Futtermittel	PFOA Boden- Futtermittel	PFOS Boden- Futtermittel	PFNA Boden- Futtermittel	Summe EFSA4 Boden-pflanzl. Lebensmittel
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	2,0	1,7	2,3	9,7	1,4

	PFBA Boden-pflanzl. Lebensmittel	PFHxA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFHpA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFDA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFBS Boden- pflanzl. Lebensmittel
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	4,0	83	0,3	1,8	4,4

Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Mensch

Die Erarbeitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) erfolgte durch eine zu diesem Zweck etablierte Ad hoc-Arbeitsgruppe namens „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“. Diese setzte sich aus Fachleuten, die sich bei (überwiegend) Institutionen von Bund und Ländern mit PFAS und/ oder der Ableitung von Bodenwerten für den Direktpfad befassen zusammen. 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). Diese Prüfwert-Vorschläge wurden bereits vom Ständigen Ausschuss Altlasten (ALA) der Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) fachlich befürwortet; die Befassung durch weitere Fachgremien steht, ebenso wie die politische Diskussion, noch aus. Die fachliche Ableitung der Prüfwert-Vorschläge wurde von der Ad hoc-AG in zwei ausführlichen Dokumentationen beschrieben, die diesem Projektbericht als Anhänge beigefügt sind. Sie sind im bereits für bisherige Bodenwerte-Ableitungen bekannten Berichtsformat verfasst, und tragen die Titel „Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ bzw. „Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch“. In der folgenden Tabelle sind die Prüfwert-Vorschläge dokumentiert.

Tabelle: Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)

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-Prüfwert x 2)

Stellvertretend für die Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) sollen beim Prüfwert-Vorschlag „Summe der PFAS“ (nicht-kanzerogene Wirkungen) die in der folgenden Tabelle aufgelisteten 24 Substanzen standardmäßig untersucht werden.

Tabelle: Standard-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

Substanzname (Kurzform)	Summenformel	CAS-Nr.
Perfluordodecansulfonsäure (PFDoDS)	C12HF25O3S	79780-39-5
Perfluortridecansulfonsäure (PFTrDS)	C13HF27O3S	791563-89-8
Vorläuferverbindungen (Precursor)		
6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS, H4PFOS)	C8H5F13O3S	27619-97-2
8:2 Fluortelomersulfonsäure (8:2 FTS)	C10H5F17O3S	39108-34-4
Perfluorooctansulfonamid (PFOSA)	C8H2F17NO2S	754-91-6
N-Methyl-Perfluorooctansulfonamid (N-MeFOSA)	C9H4F17NO2S	31506-32-8
N-Methyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure (N-MeFOSAA)	C11H6F17NO4S	2355-31-9
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamid (N-EtFOSA)	C10H6F17NO2S	4151-50-2
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure (N-EtFOSAA)	C12H8F17NO4S	2991-50-6

Die nachfolgenden Texte (mit kursiven Überschriften) wurden von der Ad hoc-AG als die Prüfwert-Vorschläge begleitende bzw. ergänzende Hinweise und Empfehlungen erarbeitet.

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 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 Löschschäumen (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.

Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Grundwasser sowie Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS

Die Erarbeitung von aktualisierten Prüfwert-Vorschlägen für die sieben derzeit in der BBodSchV mit Prüfwerten für den Pfad Boden-Grundwasser hinterlegten PFAS sowie ggfs. die Erarbeitung von zusätzlichen Prüfwert-Vorschlägen für weitere PFAS ist nicht erfolgt. Der Grund dafür ist, dass die relevanten Vorarbeiten für die Ableitung für den Pfad Boden-Grundwasser, d.h. die Aktualisierung der Regelungen für PFAS gemäß Trink- und Grundwassergesetzgebung auf sowohl europäischer als auch nationaler Ebene im Bearbeitungszeitraum des hier berichteten Projektes noch nicht abgeschlossen waren.

Für die im Vorhaben nur optional zur Bearbeitung vorgesehene Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS wurden im Sinne einer „kursorischen Vorarbeit“ einige grundsätzliche rechtliche und fachliche Überlegungen angestellt.

Summary

The objective of the research project “Derivation of guideline values for PFAS in soil” (FKZ 3721742010) documented in this report 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. It was an in-house research project of the Federal Environment Agency (UBA) conducted in section II 2.6 (Soil Protection Measures), carried out with financial support from the 2021 research plan of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV; new from 2025: Federal Ministry for the Environment, Climate Protection, Nature Conservation and Nuclear Safety, BMUKN).

The abbreviation PFAS stands for per- and polyfluoroalkyl substances. This refers to a large group of chemically synthesized organic molecules that share a hydrocarbon chain as their basic structure, with the hydrogen atoms being replaced entirely (perfluorinated) or partially (polyfluorinated) by fluorine atoms. Of particular relevance to human and environmental exposure, at least with a better level of knowledge in this regard, are PFAS from the subgroups of perfluorinated carboxylic acids (PFCA) and perfluorinated sulfonic acids (PFSA). The two best-known/ most thoroughly researched representatives of these subgroups are PFOA (perfluorooctanoic acid) in the PFCA subgroup and PFOS (perfluorooctane sulfonic acid) in the PFSA subgroup.

From an environmental and health protection perspective, one particularly worrying characteristic of PFAS, due to their stable chemical structure, is their persistence. This means that PFAS cannot be broken down naturally under environmental conditions – a characteristic that has led to PFAS being referred to as “forever chemicals”. In combination with their comparatively high mobility, this property has led to PFAS now being found in all environmental media worldwide. Soils however play a central role in the environmental distribution of PFAS. On the one hand, soils are a “PFAS sink” for diffuse, ubiquitous PFAS emissions via the air. On the other hand, small-scale to large-scale direct local inputs usually result from damage events and accidents (e.g. use of PFAS-containing firefighting foams) or the application of PFAS-containing sewage sludge or compost/ soil additives. After entry, the contaminated soils represent a “PFAS source” and consequently a danger to other environmental media, goods, ecosystems and humans. This is because PFAS enter groundwater and drinking water from contaminated soils, they are absorbed by plants, animals and humans and after uptake only slowly excreted. Hence, they do accumulate along food chains, and some of the better-studied PFAS are harmful to human health.

There is currently no comprehensive, systematic overview (in the sense of a nationwide register of contaminated sites) of locations in Germany where PFAS contamination is suspected or known to exist. However, according to the assessment of the federal states, the PFAS group of substances is also highly relevant for contaminated sites in Germany, as has already been better documented for some neighbouring European countries (e.g. Belgium, the Netherlands). Meaning that there are also many small-scale sites in Germany with high PFAS contamination in the soil and/or groundwater (“hotspots”); these are often associated with the use of PFAS-containing firefighting foams in firefighting operations and exercises, e.g. at airports and military sites. In addition, there is evidence for more widespread contamination as a result of emissions from a fluorochemical industry plant, where PFAS have been released into the environment via exhaust air and wastewater. In addition, the release of PFAS into the environment is also known and/or suspected for textile finishing companies, paper manufacturers, leather processing companies, electroplating companies and manufacturers of fire extinguishing agents. Further

rather large-scale contamination of soil and, as a result, groundwater has occurred in the past at several sites in Germany due to the application of sewage sludge, compost/ soil additives that were obviously contaminated with PFAS-containing materials.

Currently, the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) includes soil guideline values for only seven PFAS, and these are only specified for hazard assessment of the soil-groundwater pathway. Further provisional regulatory approaches can be found in a “Guideline to PFAS Assessment” developed by the federal and state governments in 2022, which is being used on a transitional basis in many federal states (in German: Bundesländer) until further legal regulations are available at federal level. However, this guideline does not include regulatory proposals for PFAS for the other exposure pathways relevant under the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV), namely soil-human (direct pathway) and soil-plant, nor do this guideline include precautionary values. The need for corresponding additions to the federal regulations was already formulated at the 87th Conference of Environment Ministers on 2 December 2016 in Berlin. The background to the decision taken there were the noticed legal uncertainties as well as concerns about inconsistent enforcement by the competent authorities of the federal states. Only with the inclusion of such soil guideline values for PFAS will the state authorities have a nationally uniform, legally secure basis for decisions on how to deal with PFAS-contaminated soils, e.g. whether detailed investigations or restrictions on use should be ordered. According to Section 8 of the Federal Soil Protection Act (BBodSchG), guideline values are defined as values which, “if exceeded, require a case-by-case assessment to be carried out, taking into account the land use, to determine whether there is any harmful soil contamination/a contaminated site.”

The following sections outline the key findings for the pathways and soil values (soil-plant, soil-human, soil-groundwater and precautionary values) addressed in the research project, with main focus on the soil-plant and soil-human pathways.

Scientific derivation of guideline values for PFAS for the soil-plant pathway

Proposed guideline values for selected PFAS for the soil-plant exposure pathway were developed by an ad hoc working group established for this purpose named “PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“. This working group was composed of experts on the subject from state and federal authorities as well as universities and research institutions. Guideline value proposals were developed for four individually considered PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS and PFOS) for the soil-feed plant exposure pathway and six guideline value proposals for the soil-food plant exposure pathway (PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFBS as individual substances and the sum of EFSA4-PFAS, i.e. the sum of PFOA, PFNA, PFHxS and PFOS). The proposed guideline values have not yet been presented for review to the further expert committees in Germany. The guideline value proposals are clearly provisional in nature for two reasons: On the one hand, there were no legally binding maximum permissible levels for PFAS in plant-based foods and animal feed available for the derivation. Furthermore, the relatively limited data available on the transfer of PFAS from soil to plants - especially at low PFAS soil contents - represents a considerable uncertainty in the assessment. The technical derivation of the proposed guideline values was described by the ad hoc working group in a detailed document (in German language) entitled “Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/ Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“, which is attached to this project report as an appendix. The proposed guideline values are documented in the following table.

Table: Proposed PFAS guideline values for the soil-plant exposure pathway

	PFHxS Soil-Feed Plants	PFOA Soil-Feed Plants	PFOS Soil-Feed Plants	PFNA Soil-Feed Plants	Sum of EFSA4 Soil-Food Plants
Validated guideline value [µg/kg soil]	2,0	1,7	2,3	9,7	1,4

	PFBA Soil-Food Plants	PFHxA Soil-Food Plants	PFHpA Soil-Food Plants	PFDA Soil-Food Plants	PFBS Soil-Food Plants
Validated guideline value [µg/kg soil]	4,0	83	0,3	1,8	4,4

Scientific derivation of guideline values for PFAS for the soil-human pathway

Guideline value proposals for selected PFAS for the soil-human effect pathway (direct pathway) were developed by an ad hoc working group established for this purpose named “Guideline Value Derivation PFAS / Direct Pathway”. This group was composed of experts who are known to be involved with PFAS and/or the derivation of soil values for the direct pathway at (predominantly) federal and state institutions. 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). These guideline value proposals have already been technically endorsed by the Standing Committee on Contaminated Sites (ALA) of the Federal/State Working Group on Soil Protection (LABO). However, the proposals are still awaiting consideration by other expert committees and political discussion. The scientific derivation of the proposed guideline values was described by the ad hoc working group in two detailed documents (in German language), which are attached to this project report as appendices. They are written in the report format already familiar from previous soil guideline value derivations and are entitled „Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ and „Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch“. The following table documents the proposed guideline values.

Table: Proposed PFAS guideline values for the for the soil-human pathway (direct uptake)

usage scenarios (decisive exposure route: oral uptake)	Sum of PFAS (µg/kg) non-carcinogenic effects	PFOA (µg/kg) carcinogenic effects
children's play areas	23 (calculated)	0,9 (validated*1)
residential areas	46 (calculated)	0,9 (calculated)
parks and leisure areas	115 (calculated)	2,3 (calculated, slightly rounded)
industrial and commercial areas	230 (validated*2)	4,6 (validated*2)

*1validated against the knowledge on PFOA-background contents of surface soils in Germany (date: January 2025)

*2validated by consideration the potential for „Runoff, drifting, landslides“ (convention: park and leisure value x 2)

Representing the group of per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS), the 24 substances listed in the following table are to be examined as standard parameter in the guideline value proposal “Sum of PFAS” for non-carcinogenic effects.

Table: 24 PFAS standard parameter included in the “Sum of PFAS”

Substance name (Abbreviation)	Molecular formula	CAS-Nr.
Perfluorinated carboxylic acids (PFCA)		
Perfluoroheptanoic acid (PFHpA)	C7HF13O2	375-85-9
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	C8HF15O2	335-67-1
Perfluorononanoic acid (PFNA)	C9HF17O2	375-95-1
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	C10HF19O2	335-76-2
Perfluoroundecanoic acid (PFUnDA)	C11HF21O2	2058-94-8
Perfluorododecanoic acid (PFDoDA)	C12HF23O2	307-55-1
Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	C13HF25O2	72629-94-8
Perfluorotetradecanoic acid (PFTeDA)	C14HF27O2	376-06-7
Perfluorinated sulfonic acids (PFSA)		
Perfluoropentane sulfonic acid (PFPeS)	C5HF11O3S	2706-91-4
Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS)	C6HF13O3S	355-46-4
Perfluoroheptane sulfonic acid (PFHpS)	C7HF15O3S	375-92-8
Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)	C8HF17O3S	1763-23-1
Perfluorononane sulfonic acid (PFNS)	C9HF19O3S	68259-12-1
Perfluorodecane sulfonic acid (PFDS)	C10HF21O3S	335-77-3
Perfluoroundecane sulfonic acid (PFUnDS)	C11HF23O3S	749786-16-1

Substance name (Abbreviation)	Molecular formula	CAS-Nr.
Perfluorododecane sulfonic acid (PFDoDS)	C ₁₂ H _F 25O ₃ S	79780-39-5
Perfluorotridecane sulfonic acid (PFTrDS)	C ₁₃ H _F 27O ₃ S	791563-89-8
Precursor compounds		
6:2 Fluorotelomersulfonic acid (6:2 FTS, H4PFOS)	C ₈ H ₅ F ₁₃ O ₃ S	27619-97-2
8:2 Fluorotelomersulfonic acid (8:2 FTS)	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O ₃ S	39108-34-4
Perfluorooctane sulfonamide (PFOSA)	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	754-91-6
N-Methyl perfluorooctane sulfonamide (N-MeFOSA)	C ₉ H ₄ F ₁₇ NO ₂ S	31506-32-8
N-Methyl perfluorooctane sulfonamido acetic acid (N-MeFOSAA)	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ NO ₄ S	2355-31-9
N-Ethyl perfluorooctane sulfonamide (N-EtFOSA)	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	4151-50-2
N-Ethyl perfluorooctane sulfonamido acetic acid (N-EtFOSAA)	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ NO ₄ S	2991-50-6

The following texts (with italicised headings) were developed by the ad hoc working group as accompanying or supplementary information and recommendations to the guideline value proposals.

Supplement to the scope of investigation in special contamination cases

If preliminary investigations reveal that the site is contaminated with other per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), in particular those with longer molecular chains (i.e. 7 to 14 carbon atoms), or PFAS precursor substances that are known or presumed to be transformed into longer-chain PFCA/PFSA in the soil, these must also be included in the scope of substances to be investigated. Examples of such special contamination cases are:

- ▶ Contamination from firefighting foams (Capstone A and B),
- ▶ Contamination from textile producing industries (FTOH),
- ▶ Contamination by PFOA alternatives (GenX und ADONA),
- ▶ Contamination by waste from paper industry (PAPs, SAmPAPs, FTMAP, FTCA, FTSA)

The soil contents of such additionally investigated PFAS are not taken into account quantitatively, i.e. they are not included in the “Sum of PFAS” soil content for comparison with the guideline value (as this cannot be justified on toxicological grounds). The results must be evaluated separately in the site-specific detailed investigation.

Additional recommendation

Perform TOP assay with solid material (methanol extract or dTOP) if (especially near the source of contamination) contamination with (unknown) precursor substances is to be expected, from which (primarily) PFCA are known to be formed.

Additional information

PFAS can accumulate in eggs from free-range chickens. Even if the proposed guideline values for the “Sum of PFAS” (from 23 µg/kg soil) are not exceeded at a site, this does not rule out the possibility of PFAS accumulation exceeding the maximum levels prescribed by the EU for eggs (EU Regulation 2023/915). This pathway should therefore be taken into account in the detailed site-specific investigation if necessary. If the PFOA guideline value of 0,9 µg/kg soil (carcinogenic effects, use in residential areas) is not exceeded, it is unlikely that the respective maximum PFOA level in eggs will be exceeded according to current knowledge.

It should be noted that other site uses or more specific exposure scenarios (e.g. the intake of dust on PFAS-contaminated agricultural land by farmers/seasonal workers/walkers, etc., or the intake of PFAS as a result of the use of forest areas such as forest kindergartens) are not represented by the use scenarios shown in the table above (in accordance with „Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten...“). The risk assessment for these more specific site uses or exposure scenarios must therefore be carried out on a case-by-case basis as part of a detailed investigation.

Scientific derivation of guideline values for PFAS for the soil-groundwater pathway and derivation of precautionary values for PFAS

No updated guideline value proposals have been developed for the seven PFAS currently listed in the BBodSchV for the soil-groundwater pathway, nor have any additional guideline value proposals been developed for other PFAS. The reason for this is that the relevant preparatory work for the derivation, i.e. the updating of the regulations for PFAS according to the drinking water and groundwater legislation at both European and national level, had not yet been completed during the processing period of the project reported here.

For the derivation of precautionary values for PFAS, which was optional in the project, only some basic legal and scientific considerations were made.

1 Einleitung

1.1 PFAS in Böden – Eintragspfade, Belastungssituation und existierende bodenschutzrechtliche Regelungen

Dieses einleitende Unterkapitel stellt eine kondensierte Zusammenfassung bzw. Auszüge aus Anhang 2 (Dokumentation TRD-Ableitung, Kapitel 2) und Anhang 3 (Dokumentation Prüfwert-Ableitung, Kapitel 7), ergänzt um Auszüge aus Kapitel 4, dar; dort finden sich jeweils auch weitere Hinweise zu den verwendeten Informationsquellen.

1.1.1 PFAS – Charakterisierung als Umwelt- und Bodenschadstoffe

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. Bei letztgenannten spricht man auch von Vorläufer-Verbindungen (oder auch Präkursoren), da sie zu den persistenten perfluorierten Carbonsäuren (Perfluoroalkyl Carboxylic Acids, PFCA) und perfluorierten Sulfonsäuren (Perfluoroalkyl Sulphonic Acids, PFSA) abgebaut werden können. 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 sind PFOA (Perfluorooctansäure) und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure).

Besonders die langkettigen PFAS kombinieren einige aus technischer Perspektive sehr nützliche Eigenschaften. Sie sind wasser-, schmutz- und fettabweisend sowie extrem stabil gegenüber hohen Temperaturen und UV-Strahlung. 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 relativ 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 Pflanzen, Tieren und Menschen aufgenommen und nur langsam wieder ausgeschieden, sie reichern sich entlang der Nahrungsketten an, und zudem sind einige besser untersuchte PFAS gesundheitsschädlich für den Menschen.

1.1.2 Altlastenrelevanz von PFAS

Ein umfassend-systematischer Überblick über Standorte in Deutschland, an denen vermutlich oder bekanntermaßen PFAS-Belastungen vorliegen existiert derzeit nicht. Demzufolge gibt es

ebenfalls keinen systematisch-repräsentativen Überblick über das Ausmaß (betroffene Fläche, PFAS-Bodengehalte) und die Zusammensetzung (Anzahl und Identität der PFAS, d.h. Kontaminationsmuster) für PFAS-Schadensfälle bzw. schädliche Bodenveränderungen durch den Eintrag von PFAS (Altlasten). Einzelne Bundesländer führen systematisch und/ oder anlassbezogen Untersuchungsprogramme zur Ermittlung der PFAS-Belastung von Böden sowie Oberflächen- und Grundwasser durch. Der aus solchen Untersuchungen vorliegende Datenbestand liegt daher bei den Länderbehörden und nur zum Teil öffentlich zugänglich vor. Allerdings macht eine unveröffentlichte und nicht vollständig-repräsentative Abfrage bei den Bundesländern aus dem Jahr 2019 die Relevanz für die Stoffgruppe der PFAS deutlich: demnach wurden circa 1635 Standorte als Verdachtsfälle kategorisiert, 685 Standorte befanden sich in der Untersuchung, 76 Standorte befanden sich in der Sanierung und 11 Standorte galten als saniert (Biegel-Engler and Frauenstein, 2022). Kleinräumige Standorte mit hohen PFAS-Belastungen im Boden und/ oder Grundwasser („Hotspots“) stehen oft im Zusammenhang mit der Verwendung PFAS-haltiger Löschschäume bei Feuerwehreinsätzen und -übungen, z.B. an Flughäfen und Militärstandorten. Zudem gibt es großräumigere Belastungen infolge von Emissionen aus Anlagen der fluorchemischen Industrie, hier wurden PFAS über Abluft und Abwasser in die Umwelt eingetragen. Diese großräumigen Verunreinigungen liegen zumeist in Windrichtung oder in Bewässerungsbereichen der mit PFAS belasteten Grund- und Oberflächengewässer. Ein für Deutschland bekanntes Beispiel ist die großräumige PFAS-Belastung im Bereich Altötting/ Gendorf. Neben fluorchemischen Produktionsstandorten ist der Eintrag von PFAS in die Umwelt auch für u.a. Textilveredelungsbetriebe, Papierhersteller, lederverarbeitende Betriebe, Galvanikbetriebe und die Hersteller von Feuerlöschmitteln bekannt und/ oder vermutet (BMUV, 2022). Weitere großflächige Verunreinigungen von Böden und in der Folge des Grundwassers entstanden in der Vergangenheit durch das Ausbringen von offenkundig mit Abfällen der Papierindustrie vermischten Komposten (Rastatt, Baden-Württemberg) und dem Einsatz von vermutlich ebenfalls mit Abfällen aus der Papierindustrie vermischten Bodenhilfsstoffen (Hochsauerlandkreis, NRW). Auch der Einsatz von Klärschlamm in der Landwirtschaft kann zu einer PFAS-Belastung der Böden führen, wie z.B. im Kanton St. Gallen der Schweiz beschrieben.

Weitere Beispiele für bekanntere PFAS-belastete Standorte in Deutschland und im internationalen Raum beschreiben Brunn et al. (2023). Die Publikation von Dasu et al. (2022) bietet einen Überblick zu in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen PFAS-Gehalten in Umweltmedien weltweit. Brusseau et al. (2020) geben einen entsprechenden Überblick zu PFAS-Bodengehalten; die PFAS-Gehalte an Schadensfällen können demnach deutlich im mg/kg-Bereich liegen. Als eine beispielhafte Studie mit Ergebnissen einer umfassenden Target-Analytik zu PFAS-Gehalten von Bodenproben aus einem bekannten großflächigen Hotspot (Rastatt/ Baden-Baden) in Deutschland sei an dieser Stelle Kotthoff et al. (2020) genannt; der maximale PFAS-Gehalt in den untersuchten 10 Hotspot-Bodenproben betrug etwa 3,5 mg/kg.

1.1.3 PFAS-Hintergrundgehalte (bzw. -werte) in den Oberböden Deutschlands

Die Ermittlung von Hintergrundwerten für PFAS in den Böden Deutschlands erfolgt derzeit durch Projekte des Umweltbundesamtes (UBA). Hintergrundwerte beschreiben dabei flächenhaft-repräsentativ und statistisch abgesichert die aus diffus-ubiquitären Einträgen resultierende typische Schadstoffbelastung (Hintergrundgehalte) von (ungestörten) Böden in Deutschland. Das vom 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 weitestgehend 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.

Eine statistische Erstausswertung der Messergebnisse wurde vom UBA für den Zweck der Plausibilisierung der rechnerisch ermittelten Prüfwerte (Wirkungspfad Boden-Mensch) speziell für PFOA (kanzerogene Wirkungen) im Januar 2025 zur Verfügung gestellt; für die Details siehe Anhang 3 (Dokumentation Prüfwert-Ableitung, Kapitel 7). Die Veröffentlichung der Ergebnisse der endgültigen Auswertung bzw. Ableitung von Hintergrundwerten für sämtliche analysierten PFAS ist aktuell in der Vorbereitung. 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 (Wellnitz et al. 2023). Die in der Erstausswertung vom UBA ermittelten Bodengehalte (im niedrigen µg/kg-Bereich) liegen generell in vergleichbarer Größenordnung wie bereits publizierte PFAS-Hintergrundwerte in Oberböden im ländlichen Raum Nordrhein-Westfalens (LANUV, 2024).

1.1.4 Existierende bodenschutzrechtliche Regelungen für PFAS in Deutschland

Aktuell sind in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2021) für sieben PFAS (PFBA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) bundeseinheitliche Regelungsansätze (Prüfwerte) für die Gefährdungsabschätzung für den Pfad Boden – Grundwasser definiert (siehe Kap. 4.). Weitere vorläufige Regelungsansätze finden sich im „Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials“ (BMUV, 2022) sowie auch in weiteren vorläufigen Regelungsansätzen von z.B. dem Bundesland Bayern (LfU, 2025). Der „PFAS-Leitfaden“ (BMUV, 2022) zum Umgang mit PFAS belasteten Böden und Grundwasser ist in allen Bundesländern außer Bayern als Arbeitshilfe eingeführt; Bayern hat Inhalte des Leitfadens in den schon bestehenden eigenen Leitfaden implementiert. Allerdings umfasst der „PFAS-Leitfaden“ keine Regelungsvorschläge für PFAS für die anderen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung relevanten Wirkungspfade Boden-Mensch (Direktpfad), Boden-Pflanze und ebenfalls nicht für Vorsorgewerte. Der Bedarf für entsprechende Ergänzungen der bundeseinheitlichen Regelungen wurde in der 87. Umweltministerkonferenz am 02.12.2016 in Berlin mit Beschluss zu TOP 25/40 formuliert: *„Bund und Länder werden einheitliche Vorgaben für die Bewertung und Sanierung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFC-haltiger Materialien erarbeiten. Hierbei sind die vorhandenen und diskutierten Ansätze der LABO/LAWA/FGG (FGG = Flussgebietsgemeinschaften) für eine künftige Rechtsetzung bei der Ableitung wirkungspfadbezogener Prüf- und Maßnahmewerte in der BBodSchV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) zu berücksichtigen.“*

1.2 Einführung neuer Bodenwerte – rechtlicher und fachlicher Hintergrund

1.2.1 Zuständigkeiten, Beteiligungen, Entscheidungsprozess

Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) ermächtigt gemäß § 8 (1) die Bundesregierung, per Rechtsverordnung verbindliche Vorschriften zur „*Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen, schädlichen Bodenveränderungen, altlastverdächtigen Flächen und Altlasten zu erlassen*“. Diese Ermächtigung umfasst insbesondere auch die Festlegung von

- ▶ Prüfwerten, „*bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt*“
- ▶ Maßnahmenwerten, „*bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind*“

Gemäß BBodSchG § 8 (3) sind neben den Werten auch die „*Verfahren zur Ermittlung von umweltgefährdenden Stoffen in Böden [...] festzulegen*“.

Das BBodSchG schreibt für die Festlegung der Werte in § 8 (1) zudem die „*Anhörung beteiligter Kreise*“ gemäß § 20 vor, d.h. es ist „*ein jeweils auszuwählender Kreis von Vertretern der Wissenschaft, der Betroffenen, der Wirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, der Natur- und Umweltschutzverbände, des archäologischen Denkmalschutzes, der kommunalen Spitzenverbände und der für den Bodenschutz, die Altlasten, die geowissenschaftlichen Belange und die Wasserwirtschaft zuständigen obersten Landesbehörden zu hören [...]*“. Weiterhin fordert das Gesetz in § 8 (1) die Zustimmung des Bundesrates zu den von der Bundesregierung vorgelegten Rechtsverordnungsentwürfen.

Somit stellt sich der Erarbeitungs- und Rechtssetzungsprozess zur Festlegung von Prüf- und Maßnahmenwerten folgendermaßen dar:

Fachliche Erarbeitung:

- i. Das Umweltbundesamt (UBA) erarbeitet im Auftrag der Bundesregierung, d.h. des zuständigen Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), fachliche Vorschläge für die Ableitungsmethoden und -maßstäbe sowie die Prüf- und Maßnahmenwerte für einzelne Schadstoffe.
- ii. Der Entwurf der fachlich abgeleiteten Prüfwerte wird in den fachlich kompetenten Ausschüssen der LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) abgestimmt, z.B. „Ständiger Ausschuss Altlasten“ (ALA).

Rechtsverordnungsentwurf der Bundesregierung:

- iii. Das BMUKN erarbeitet auf Grundlage der mit den Fachgremien abgestimmten Vorschläge den Entwurf einer Rechtsverordnung.
- iv. Anhörung beteiligter Kreise (§ 20 BBodSchG): in den im BBodSchG gesetzlich angeordneten Fällen (z.B. § 8 Abs. 1 BBodSchG) sind gem. § 20 BBodSchG die beteiligten Kreise anzuhören.
- v. Der Entwurf ist sodann im Ressortkreis abzustimmen (Beteiligung anderer Bundesministerien unter Federführung des BMUKN).
- vi. Kabinettsbeschluss

Zustimmung des Bundesrates:

- vii. Der innerhalb der Bundesregierung abgestimmte Rechtsverordnungsentwurf wird dem Bundesrat zur Zustimmung weitergeleitet. Der Bundesrat kann Änderungsvorschläge einbringen. Der Bundesrat stimmt über den Entwurf ab, und wenn er zustimmt, kann die Rechtsverordnung erlassen werden.

Ausfertigung und Verkündung im Bundesgesetzblatt:

- viii. Nach Zustimmung des Bundesrats erfolgt die Veröffentlichung der Rechtsverordnung im Bundesgesetzblatt. Mit der Verkündung tritt die Rechtsverordnung in Kraft, es sei denn, es wird ein späterer Zeitpunkt bestimmt.

[Hinweis: Für die Festlegung von Vorsorgewerten und zulässige Zusatzbelastungen gemäß BBodSchG § 8 (2) gelten gleichlautende Regelungen; siehe auch Kap. 5.1]

1.2.2 Festlegung und rechtliche Verbindlichkeit fachlicher Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten

Die erstmalige Festlegung von Prüf- und Maßnahmenwerten erfolgte mit der Veröffentlichung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) vom 12.07.1999. In § 4 (5) der Verordnung wird auf die für die Ableitung der Werte maßgeblichen Methoden und Maßstäbe hingewiesen, welche im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August 1999 veröffentlicht wurden. Mit Veröffentlichung dieses im Folgenden „Ableitungsmaßstäbe“ genannten untergesetzlichen Regelwerkes wurde die Anforderung gemäß § 8 (3) BBodSchG zur Festlegung von Ableitungsverfahren eingelöst. Einleitend werden in den „Ableitungsmaßstäben“ deren Zweckbestimmungen und Verbindlichkeit herausgestellt:

„Die Methoden und Maßstäbe zur Ableitung dienen

- der sachgerechten und einheitlichen Anwendung der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV im Einzelfall

- sowie der Sicherstellung gleichwertiger Einzelfallentscheidungen bei Stoffen, für die die BBodSchV keinen Prüf- oder Maßnahmenwert enthält.

Abweichungen von diesen Methoden und Maßstäben sind nur bei gesicherten neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen zulässig. Zu gegebener Zeit erfolgt eine Anpassung der Ableitungsmaßstäbe an den neuen wissenschaftlichen Erkenntnisstand.“

Horwath et al. (2000) kommentieren das vorab dokumentierte Beachtungsgebot aus juristischer Sicht wie folgt: *„Abweichungen sind zunächst sehr restriktiv an das Vorliegen eines wissenschaftlichen Kenntnisstandes gebunden; allerdings sind die Methoden und Maßstäbe selbst so formuliert, daß Öffnungen zu Gunsten eines für einen Stoff speziell vorliegenden Sachverhalts immanent berücksichtigt werden können. Im Übrigen unterliegt die Restriktion zu Abweichungen der generellen Beachtungsregel. Diese stellt die Bekanntmachung in den Zusammenhang fachwissenschaftlicher Sachverständigenaussagen, nicht aber in eine rechtlich verbindliche Folgereregung zur BBodSchV.“*

Die novellierte Fassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlasten-Verordnung (BBodSchV 2021) trat am 1. August 2023 in Kraft. Laut BMUKN werden damit *„die Anforderungen an die nachhaltige Sicherung und Wiederherstellung der Funktionen des Bodens im Sinne des § 1 Bundes-Bodenschutzgesetz näher bestimmt und an den gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen und vollzugspraktischen Erkenntnisse angepasst“*. Allerdings verweist § 15 (4) der novellierten BBodSchV inhaltlich gleichlautend zu § 4 (5) der vorherigen Fassung (BBodSchV 1999) auf die im Bundesanzeiger 1999 veröffentlichten „Ableitungsmaßstäbe“.

Somit sind für die fachliche Ableitung neuer Prüf- und Maßnahmenwerte grundsätzlich nach wie vor die 1999 veröffentlichten „Ableitungsmaßstäbe“ heranzuziehen, da deren Anpassung an den neuen wissenschaftlichen Erkenntnisstand seitdem nicht erfolgt ist. Ungeachtet dessen sind Abweichungen von diesem untergesetzlichen Regelwerk bei „gesicherten neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen“ (d.h. bei Vorlage entsprechender „fachwissenschaftlicher Sachverständigenaussagen“) rechtlich zulässig.

1.2.3 „Ableitungsmaßstäbe“ (1999) – Erarbeitung, wissenschaftlicher Erkenntnisstand und Überprüfung

Die „Ableitungsmaßstäbe“ wurden in den 1990er-Jahren unter Einbindung verschiedener Bund/Länder-Gremien (u.a. LABO, LAGA, LAWA) erstellt. In die Erarbeitung der Prüfwerte wurde neben diesen Gremien weiterer wissenschaftlicher Sachverstand mittels Fach- und Abstimmungsgesprächen einbezogen. Die Literaturliste in den „Ableitungsmaßstäben“ umfasst dementsprechend Fachpublikationen und Forschungsberichte, die mehrheitlich aus den 1990er-Jahren stammen. Auf Grundlage des darin dokumentierten Erkenntnisstandes wurden – in Verbindung mit den grundlegenden Anforderungen von BBodSchG (1998) und BBodSchV (1999) zu den Prüf- und Maßnahmenwerten – in den „Ableitungsmaßstäben“ die Schutzgüter, Wirkungspfade, Nutzungskategorien, Bewertungsmaßstäbe, Faktoren und Berechnungswege fachlich präzisiert bzw. festgelegt. Wichtig ist hier zu betonen, dass es sich bei den „Ableitungsmaßstäben“ um – im besten Fall wissenschaftlich belegte, mindestens aber fachlich plausibel gemachte – „Setzungen“ (Konventionen) handelt. Entsprechend heißt es in den „Ableitungsmaßstäben“ z.B. auf Seite 35 (2.4.1.1 Expositionsfaktoren): *„Es ist festzuhalten, daß die für die Ableitung von Bodenwerten zugrundezulegenden Bodenaufnahmeraten nicht streng wissenschaftlich i.S. umfangreicher Tests begründet sind. Sie können und sollten sich soweit wie möglich auf empirische Daten stützen. Vielfach ist es aber unumgänglich, auf Konventionen zurückzugreifen, die aber anhand empirischer Untersuchungen plausibel begründet sein müssen.“*

Zudem betonen einige Ausführungen ausdrücklich den provisorischen Charakter der „Ableitungsmaßstäbe“, so heißt es z.B. auf Seite 11 (2.3 Humantoxikologische Bewertungsmaßstäbe): *„Die für die Ableitung der Prüfwerte herangezogenen Methoden und Maßstäbe müssen dem aktuellen Stand des Wissens entsprechen.“* sowie *„Die tolerablen resorbierten Dosen (TRD) stellen als Bewertungsmaßstäbe eine mögliche Grundlage dar, Prüfwerte für den Boden zu begründen. Grundsätzlich wären auch andere humantoxikologische Bewertungsmaßstäbe verwendbar, soweit sie die sich aus den nachfolgenden Darstellungen ergebenden Anforderungen erfüllen (LABO / LAGA 1996).“*

In Artikel 5 (3) der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 2021) wird allerdings angekündigt, dass die Bundesregierung „ein wissenschaftlich begleitetes Monitoring“ durchführt, welches unter anderem „die Evaluierung der Werteregulungen der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung“ umfasst und über deren Ergebnisse dem Deutschen Bundestag bis zum 1. August 2027 berichtet. Eine fachliche Überprüfung der „Ableitungsmaßstäbe“ ist demnach vorgesehen.

Als Fazit ist festzuhalten, dass die „Ableitungsmaßstäbe“ auf dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand der 1990er-Jahre fußen. Eine Überprüfung und ggfs. erforderliche Aktualisierung aufgrund des wissenschaftlichen Fortschritts wurde seitdem von keinem der beteiligten Akteure (UBA, BMUV, Länder) verfolgt, ist aber gemäß novellierter Bodenschutz- und Altlasten-Verordnung bis 2027 vorgesehen. Da die Ableitung von (neuen) Prüfwerten dennoch „dem aktuellen Stand des Wissens entsprechen“ soll, sind im Einzelfall fachlich begründete Abweichungen von den in den „Ableitungsmaßstäben“ festgelegten Konventionen möglich. Dabei ist jedoch für den jeweiligen Einzelfall darzulegen, inwieweit die ggfs. angewandten

neueren Methoden oder Maßstäbe den Grundsätzen der „Ableitungsmaßstäben“ (z.B. Gefahrenbezug, Expositionsszenarien) entsprechen. Zweifelsfrei ist hingegen, dass in der Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten der aktuelle Stand des Wissens zum jeweils betrachteten Schadstoff (stoffspezifischer Sachstand) zu berücksichtigen ist.

1.2.4 Veröffentlichung der Begründungen / Ableitungen von neuen oder überarbeiteten Prüf- und Maßnahmenwerten

Laut Begründung zum Referentenentwurf des BMU (neu: BMUKN) für die novellierte Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (im Folgenden: BBodSchV 2021) wurden die Prüfwerte *„für die direkte Aufnahme von Schadstoffen [...] unter Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse überprüft und soweit erforderlich angepasst. Der Umfang der Substanzen, für die Prüfwerte für den Direktpfad festgelegt werden, wurde erweitert.“* In diesem Dokument werden für einige der neu aufgenommenen oder aktualisierten Werte die fachlichen Ableitungen kursorisch erläutert. Zusätzlich wird auf die folgenden beiden Quellen verwiesen:

- ▶ *„Näheres ist den Begründungen der Werte zu entnehmen, die im Bundesanzeiger veröffentlicht werden.“*
- ▶ *„Ausführliche fachliche Begründungen der Werteniveaus sind auch für die neu aufgenommenen Substanzen bereits im Handbuch „Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten“ veröffentlicht [Bachmann, G., Oltmanns, J., Konietzka, R., Schneider, K. (1999). Grundwerk und folgende Lieferungen; herausgegeben vom Umweltbundesamt; Erich Schmidt Verlag, Berlin, ISBN: 3-503-05825-7] oder werden dort ergänzt (zu PAK).“*

Eine orientierende Recherche im o.g. Handbuch „Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten“ lässt erkennen, dass der überwiegende Teil der fachlichen Ableitungen für die in die Neufassung der BBodSchV aufgenommenen oder aktualisierten Prüfwerte dort bereits nachvollziehbar dokumentiert ist. Und zwar offensichtlich deswegen, da diese Ableitungen bereits überwiegend älteren Datums sind, d.h. Ergänzungslieferungen zum Handbuch von Anfang der 2000er-Jahre darstellen, und schließlich - oftmals unverändert - in die Neufassung der Verordnung aufgenommen wurden. Nicht öffentlich dokumentiert sind jedoch die finalen (politischen) Entscheidungen zu den einzelnen in die Verordnung aufgenommenen Werten, sofern vom ursprünglichen fachlichen Ableitungsergebnis abgewichen wurde.

Weiterhin gilt anzumerken, dass diese Ausführungen zum Stand der Veröffentlichung der Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten sich überwiegend auf den Direktpfad Boden – Mensch beziehen. Für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für den Pfad Boden – Nutzpflanze stellt sich der Stand der Veröffentlichung – sowohl der fachlichen Methoden und Maßstäbe zur Ableitung als auch der Begründung der einzelnen Werte – ungünstiger dar. So enthalten die „Ableitungsmaßstäbe“ (1999) deutlich weniger detaillierte Ausführungen zu den festgelegten fachlichen Methoden und Maßstäben inklusive zweier beispielhafter Anwendungen derselben für Blei und Cadmium. Auch im o.g. Handbuch „Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten“ finden sich keine Dokumentationen der Prüfwert-Ableitungen für den Pfad Boden – Nutzpflanze (und auch nicht zum Pfad Boden – Grundwasser). Die weiter oben zitierte Begründung zum Referentenentwurf der novellierten Verordnung (BBodSchV 2021) erläutert für einige der für diese beiden Pfade neu aufgenommenen und/oder aktualisierten Werte kursorisch deren fachliche Ableitung; eine dem Pfad Boden – Mensch vergleichbare Veröffentlichungspraxis existiert aber insbesondere für den Pfad Boden – Pflanze nicht. Als methodische Ergänzung zu den Ableitungsmaßstäben, die sich für diesen Pfad hauptsächlich auf Schwermetalle beziehen, ist für organische Stoffe der UBA-Forschungsbericht von Breitschwerdt

et al. (2002) anzusehen. Auf diese Publikation wird jedoch auch nicht in der Begründung zur neugefassten BBodSchV verwiesen.

Günstiger stellt sich die Nachvollziehbarkeit der Ableitung von Prüfwerten für den Pfad Boden-Grundwasser dar. Maßgeblich ist hier der Leitfaden der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zur „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ (LAWA, 2017) in dem es heißt: *„Die mit diesem Bericht abgeleiteten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) sind die wesentliche fachliche Grundlage für die künftige Festlegung der Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser.“* Somit gelten die GFS-Werte für Grundwasser ebenfalls als Prüfwerte für den Pfad Boden – Grundwasser unter Berücksichtigung weiterer im o.g. Leitfaden aufgeführter Anwendungsgrundsätze.

Die fachliche Ableitung dieser GFS-Werte ist laut LAWA-Leitfaden nachvollziehbar dokumentiert: *„Anhang 3 enthält die Datenblätter zu den einzelnen Stoffen und Stoffgruppen, für die Geringfügigkeitsschwellenwerte abgeleitet wurden. Allen Datenblättern ist eine tabellarische Kurzfassung mit Informationen zum Geringfügigkeitsschwellenwert, zum verfügbaren Datenmaterial und zu den Kriterien, die die Ableitung des Geringfügigkeitsschwellenwertes maßgeblich begründen, vorangestellt. Ergibt sich daraus eindeutig, welche Kriterien zur Ableitung des GFS-Wertes geführt haben, wird in der Regel auf eine ausführliche Begründung verzichtet. Eine ausführliche Begründung ist dann erforderlich, wenn nicht auf entsprechende Quellen (z.B. TrinkwV) verwiesen werden kann. Das Datenblatt enthält in diesem Fall neben einer ausführlichen Begründung des Geringfügigkeitsschwellenwertes auch die verwendeten Literaturquellen. Basiswerte sind nur für anorganische Spurenstoffe angegeben.“* Die entsprechenden Dokumente macht die LAWA über ihre Website öffentlich verfügbar.

1.3 Projektziele, Vorgehensweise und Struktur des Berichts

Zielstellung des in diesem Bericht dokumentierten Forschungsvorhabens „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ 3721742010) war die fachliche Ableitung von Bodenwerten für Vertreter der Stoffgruppe der PFAS gemäß Anforderungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und aktuellem Stand des Wissens. Es handelte sich um ein Eigenforschungsvorhaben des UBA im Fachgebiet II 2.6 (Maßnahmen des Bodenschutzes), durchgeführt mit finanzieller Unterstützung aus Mitteln des Ressortforschungsplan 2021 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV; neu ab 2025: Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BMUKN). Die Bearbeitung erfolgte in sechs Arbeitspaketen, zu denen nachfolgend jeweils Hinweise zur generellen Vorgehensweise sowie auf die jeweils zugehörigen Kapitel dieses Berichts geliefert werden.

► **Arbeitspaket 1 (Grundlagen erarbeiten, Literaturrecherche und Konzeption)**

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaket erfolgte schwerpunktmäßig in den ersten Monaten der Projektlaufzeit, womit die fachlichen Grundlagen für die Ableitung von Prüfwert-Vorschlägen für PFAS in den Arbeitspaketen 2 bis 5 vorbereitet wurden. Die Sammlung relevanter wissenschaftlicher Literatur, Informationen und Daten erfolgte darüber hinaus kontinuierlich während der Bearbeitung der anderen Arbeitspakete (speziell zu Arbeitspaket 2 und 3), um den wissenschaftlichen Fortschritt zu integrieren, neue verfügbare Bewertungen kompetenter Institutionen zu berücksichtigen oder um Detailfragen in den jeweiligen Ableitungen vertieft nachzugehen. Die Arbeitsergebnisse aus Arbeitspaket 1 sind insofern in diesem Bericht nicht gesondert dokumentiert, sondern sind Teil der Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 5. Die Bearbeitung von Arbeitspaket 1 erfolgte

gemeinsam durch das Bearbeiter-Team (Dr. Tobias Frische und Lennart Gehrenkemper; unter Verwendung von Beiträgen von Dr. Arno Märten).

► **Arbeitspaket 2 (Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für den Pfad Boden-Pflanze)**

Der Fokus in Arbeitspaket 2 lag auf der fachlichen Erarbeitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für die Pfade Boden-Futtermittelpflanzen und Boden-Lebensmittelpflanzen. Die Ableitung der Prüfwert-Vorschläge erfolgte durch eine zu diesem Zweck eingerichtete Arbeitsgruppe von Expert*innen im Themengebiet. Die Bearbeitung von Arbeitspaket 2 erfolgte federführend durch Lennart Gehrenkemper (unter Verwendung von Vorarbeiten von Dr. Arno Märten). Ein zusammenfassender Überblick der Arbeitsergebnisse von Arbeitspaket 2 ist in **Kapitel 2** dokumentiert, die zugehörige umfassende Dokumentation findet sich im **Anhang 1**.

► **Arbeitspaket 3 (Ableitung von Prüfwerten für den Pfad Boden-Mensch)**

Im Arbeitspaket 3 erfolgte die fachliche Erarbeitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad). Die Ableitung der Prüfwert-Vorschläge erfolgte durch eine zu diesem Zweck eingerichtete Arbeitsgruppe von Expert*innen im Themengebiet. Die Bearbeitung von Arbeitspaket 3 erfolgte federführend durch Dr. Tobias Frische. Ein zusammenfassender Überblick der Arbeitsergebnisse von Arbeitspaket 3 ist in **Kapitel 3** dokumentiert, die beiden zugehörigen umfassenden Dokumentationen findet sich in den **Anhängen 2 und 3**.

► **Arbeitspaket 4 (Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für den Pfad Boden-Grundwasser)**

Der Fokus in Arbeitspaket 4 lag auf der Erarbeitung des Sachstandes zur Überarbeitung/Fortschreibung der bisherigen Prüfwerte gemäß aktueller Entwicklungen im hier maßgeblichen Wasserrecht. Die Bearbeitung von Arbeitspaket 4 erfolgte federführend durch Lennart Gehrenkemper. Die Arbeitsergebnisse von Arbeitspaket 4 sind im **Kapitel 4** dokumentiert.

► **Arbeitspaket 5 (Ableitung von Vorsorgewerten)**

Arbeitspaket 5 war gemäß Vorhabenplanung optional vorgesehen und wurde daher lediglich orientierend-kursorisch bearbeitet, federführend durch Dr. Tobias Frische. Die Arbeitsergebnisse von Arbeitspaket 5 sind im **Kapitel 5** dokumentiert.

► **Arbeitspaket 6 (Abschlussbericht, Publikation und Vorstellung in Ländergremien sowie EU-Gremien)**

Schwerpunkt der Arbeiten an Arbeitspaket 6 war die Erstellung des hiermit vorgelegten Abschlussberichtes; etwaige anschließende Publikationen von ausgewählten Arbeitsergebnissen des Vorhabens sind noch in der Diskussion. Eine Vorstellung von Teilergebnissen (hier: Prüfwert-Vorschläge Boden-Mensch) in Gremien der Bundesländer ist erfolgt (siehe Kapitel 3), zudem erfolgte im Verlauf des Vorhabens wiederholt ein Austausch mit zuständigen Fachbehörden mehrerer europäischer Staaten. Die Arbeitsergebnisse aus Arbeitspaket 6 sind insofern in diesem Bericht nicht gesondert dokumentiert, sondern sind Teil der Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 5. Die Bearbeitung von Arbeitspaket 6 erfolgte gemeinsam durch das Bearbeiter-Team (Dr. Tobias Frische und Lennart Gehrenkemper).

2 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Pflanze

2.1 Ad hoc-Arbeitsgruppe „PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“ – Zusammensetzung und Arbeitsweise

Die fachliche Ableitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Pflanze erfolgte durch eine speziell zu diesem Zweck eingerichtete Arbeitsgruppe namens „PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“. Diese wurde von Lennart Gehrenkemper (UBA) initiiert und tagte unter seiner Leitung in zehn Sitzungen online bzw. hybrid. Zur ehrenamtlichen Mitarbeit in der Ad hoc-AG wurden Vertreter*innen von Landes- und Bundesbehörden und von Universitäten und Forschungseinrichtungen, angefragt, die sich mit PFAS und/ oder dem Transfer von PFAS in Pflanzen befassen:

- ▶ **Lennart Gehrenkemper (Leitung Ad hoc-AG)**
Umweltbundesamt
Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
- ▶ Dr. Runa S. Boeddinghaus
Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
Stofflicher Bodenschutz, Referat für Agrarökologie
- ▶ Titus Ebert
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau (IAB), AG Humus und stofflicher Bodenschutz
- ▶ Dr. Sandy Falk
Landesbetrieb Hessisches Landeslabor
Fachgebiet IV.2 organische Kontaminanten, Umweltanalytik
- ▶ Dr. Michael Gierig (i.R.) (bis April 2024)
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Abteilung 7 Zentrale Analytik, Stoffbewertung
- ▶ Dr. Bernd Göckener
Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME)
Abteilungsleiter Spurenanalytik und Umweltmonitoring
- ▶ Hildegard Just (bis April 2025)
Bundesinstitut für Risikobewertung
Fachgruppe Futtermittel und Futtermittelzusatzstoffe, Abteilung Sicherheit in der Nahrungskette
- ▶ Dr. Johanna Krippner
Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Pflanzenbau und Ertragsphysiologie
- ▶ Jörg Leisner (i.R.) (bis August 2024)
Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK)
Fachbereich 32: Bodenschutz, Altlasten, Ökotoxikologie

- ▶ Dr. Philipp Roth
Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK)
Fachbereich 32: Bodenschutz, Altlasten, Ökotoxikologie
- ▶ Dr. Caroline Baaske-Scholze
Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
Dezernat 63 Altlasten
- ▶ Prof. Dr. Thorsten Stahl
Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Münsterland-Emscher-Lippe
Vorstandsvorsitzender
- ▶ Hanna Ulrich
Bayrisches Landesamt für Umwelt
Referat 76.2 Stofftestlabor, Umweltmonitoring
- ▶ Regelmäßiger Gast: Dr. Tobias Frische (UBA II 2.6)
- ▶ Gelegentlicher Gast: Dr. Annegret Biegel-Engler (UBA II 2.6)

2.2 Prüfwert-Vorschläge für PFAS für den Pfad Boden-Pflanze

Die Arbeitsgruppe „PFAS-Prüfwerte – Boden-Pflanze“ hat Vorschläge für (i) einen Summenprüfwert für die EFSA4-PFAS im Pfad Boden-Lebensmittelpflanzen, (ii) vier Einzelprüfwerte für die EFSA4-PFAS im Pfad Boden-Futtermittelpflanze, sowie (iii) fünf Einzelprüfwerte für weitere PFAS im Pfad Boden-Lebensmittelpflanze erarbeitet (Tabelle 1). Eine Vorstellung der Prüfwert-Vorschläge in kompetenten Fachgremien von Bund und Ländern ist bisher noch nicht erfolgt; die ausführliche Dokumentation der fachlichen Ableitung findet sich im Anhang, der Titel der Dokumentation – erstellt von der Ad hoc-AG als Autor*innenkollektiv – lautet: „Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ (Anhang 1).

Tabelle 1: Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Pflanze

	PFHxS Boden- Futtermittel	PFOA Boden- Futtermittel	PFOS Boden- Futtermittel	PFNA Boden- Futtermittel	Summe EFSA4 Boden-pflanzl. Lebensmittel
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	2,0	1,7	2,3	9,7	1,4

	PFBA Boden-pflanzl. Lebensmittel	PFHxA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFHpA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFDA Boden- pflanzl. Lebensmittel	PFBS Boden- pflanzl. Lebensmittel
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	4,0	83	0,3	1,8	4,4

2.3 Diskussion und Forschungsbedarf

Die abgeleiteten Prüfwert-Vorschläge stellen eine erste Diskussionsgrundlage für eine bundeseinheitliche Bewertung von PFAS-haltigen Böden mit Nutzung für den Pflanzenanbau dar. Die im Rahmen der Ableitung zusammengestellten Datenpaare lassen den Schluss zu, dass PFAS über diverse Pflanzengruppen hinweg von den Pflanzen systemisch aufgenommen und über die unterschiedlichen Pflanzenkompartimente verteilt werden. Bei den relativ wenigen vorliegenden Datensätzen konnten durch Zusammenfassen verschiedener Pflanzenarten zu Lebensmittelgruppen plausible Transferregressionen aufgestellt werden, mit teilweise deutlich engeren Korrelationen als bei der Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte für Schwermetalle. Diese Korrelationen sollten durch systematische Untersuchungen des PFAS-Transfers für ausgewählte Pflanzenarten bestätigt werden. Eine solche Bestätigung durch weitere empirische Untersuchungen ist auch deshalb geboten, da in der Ableitung der Prüfwert-Vorschläge eine begrenzte und heterogene Datenbasis (unterschiedliche Studien, Methoden, Zeiträume, Bestimmungsgrenzen) für die Transferregressionen herangezogen wurde. Idealerweise sollte der im Zuge der Ableitung beschriebene Transfer durch Studien zur PFAS-Aufnahme unter Freilandbedingungen (weiter) bestätigt werden.

Die vorliegenden toxikologischen Bewertungen einiger PFAS erzeugen in Verbindung mit dem Transfer von PFAS aus Böden auch in Lebensmittel- und Futtermittelpflanzen den Bedarf für eine einheitliche Bewertung dieser Schadstoffe in eben diesen pflanzlichen Produkten. Eine solche Bewertung (zulässige Höchstgehalte für PFAS in pflanzlichen Lebensmitteln und Futtermitteln) lag während des hier beschriebenen Forschungsvorhabens nicht vor, weshalb provisorische gesundheitsbezogene Referenzwerte abgeleitet wurden. Unklar ist jedoch, wie sich diese Werte zu zukünftigen „offiziellen“ Bewertungen verhalten werden und inwieweit die hier präsentierten Prüfwert-Vorschläge revidiert werden müssen. Darüber stellen sich weitere Forschungsfragen, insbesondere, wie es um die Toxizität der hier nicht behandelten PFAS steht und wie der Beitrag von pflanzlichen Lebens- und Futtermitteln, die auf PFAS-haltigen Böden angebaut wurden, zum potenziellen Krebsrisiko durch PFOA ist. Die (potenzielle) Karzinogenität von PFOA und PFOS wurden in der Ableitung der hier präsentierten Prüfwert-Vorschläge nicht beachtet.

Wenn lebensmittel- oder futtermittelrechtliche Höchstgehalte für PFAS etabliert werden, sollten die hier abgeleiteten Prüfwert-Vorschläge dementsprechend überprüft/ angepasst werden. Zu diesem Zweck sind die Transferregressionen, sowie mögliche Plausibilisierungsgründe im Anhang 1 zusammengestellt.

Die nach wie vor relativ begrenzte Datenlage zum Transfer von PFAS aus dem Boden in die Pflanzen (s. Anhang 1), und dies insbesondere bei niedrigen PFAS-Bodengehalten, stellt eine wesentliche Unsicherheit der erarbeiteten Prüfwert-Vorschläge dar; die vorgestellten Prüfwert-Vorschläge haben dabei einen vermutlich vorsorgeorientierten Charakter. Eine Verbesserung der Datenlage durch weitere systematische Transferstudien (besonders für niedrige PFAS-Bodengehalte) ist insofern Voraussetzung für deren Konsolidierung sowie für die Erweiterung

um weitere PFAS/ andere Nutzpflanzen. Entscheidend ist hierfür auch die Entwicklung geeigneter und vergleichbarer Analysemethoden. Sowohl im Bereich der Analyse von PFAS in Pflanzenproben wie auch in Bodenproben konnten in den vergangenen Jahren die Verfahren optimiert werden und Bestimmungsgrenzen so weit herabgesenkt werden, dass auch im Bereich niedriger Gehalte, wie sie im Hintergrundbereich zu erwarten sind, PFAS bestimmt werden können. Für diese Methoden besteht der Bedarf einer Standardisierung, damit sowohl die Bewertung etabliert werden kann als auch damit die Datensätze für die Bestätigung der ermittelten Transfers erweitert werden können.

3 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)

3.1 Ad hoc-Arbeitsgruppe „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ – Zusammensetzung und Arbeitsweise

Die fachliche Ableitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) erfolgte durch eine speziell zu diesem Zweck eingerichtete Arbeitsgruppe namens „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“. Zur ehrenamtlichen Mitarbeit in der Ad hoc-AG wurde Ende August 2022 ein Kreis von Fachleuten angefragt, die sich bekanntermaßen bei (überwiegend) Institutionen von Bund und Ländern mit PFAS und/ oder der Ableitung von Bodenwerten für den Direktpfad befassen. Die mit einem Auftakttreffen am 05.10.2022 formierte Ad hoc-AG „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ setzte sich wie folgt zusammen:

- ▶ **Leitung der Ad hoc-AG: Dr. Tobias Frische (UBA)**, Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes, Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau
- ▶ Dr. Caroline Baaske-Scholze (LLUR SH), Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Dez. 63 Altlasten, LfU 635, Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
- ▶ Dr. Cilia Derese (LfU RP), Abteilung Kreislaufwirtschaft, Referat 33 – Bodenschutz, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz
- ▶ Dr. Janine Kowalczyk (BfR), Bundesinstitut für Risikobewertung, Fachgruppe Futtermittel und Futtermittelzusatzstoffe, Abteilung Sicherheit in der Nahrungskette, Max-Dohrn-Str. 8-10, 10589 Berlin
- ▶ Dr. Raphaela Osterauer (LUBW), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe
- ▶ Dr. Gerd Rippen (Unabhängiger Sachverständiger), Bewertung von Umweltchemikalien (unabhängiger Boden- und Schadstoffsachverständiger), Marie-Elisabeth-Lüders-Str. 4, 37075 Göttingen
- ▶ Dr. Philipp Roth (LANUK NW), Fachbereich 32 - Bodenschutz, Altlasten, Ökotoxikologie, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima NRW, Postanschrift: 40208 Düsseldorf
- ▶ Margit Salzmann (GAA NI), Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, Abteilung 4 - Zentrale Unterstützungsstelle Luftreinhaltung, Lärm, Gefahrstoffe und Störfallvorsorge (ZUS LLGS), Goslarsche Straße 3, 31134 Hildesheim
- ▶ Ireen Werner (LfU BB), Referat W 15: Altlasten/Bodenschutz/Grundwassergüte, Landesamt für Umwelt, Postanschrift: Postfach 60 10 61, 14410 Potsdam

Im Verlauf ergaben sich in der Zusammensetzung der Ad hoc-AG folgende personelle Änderungen:

- ▶ Dr. Janine Kowalczyk (BfR) ersetzte am 09.11.2023 Hilde Just (BfR)
- ▶ Jörg Leisner (LANUV NW) ist im März 2024 in den Ruhestand ausgeschieden und wurde ersetzt durch Dr. Philipp Roth (LANUV, NW bzw. neu: LANUK, NW)

- ▶ Dr. Christina August (BfR) ist ausgeschieden im März 2024
- ▶ Regelmäßige anwesende Gäste waren Dr. Philipp Roth (LANUV, NW bzw. neu: LANUK, NW) bis März 2024 sowie fortlaufend Lennart Gehrenkemper (UBA Fachgebiet II 2.6)

Nach dem Auftakttreffen fanden insgesamt 17 reguläre Arbeitstreffen der Ad hoc-AG statt, wobei 15 der Arbeitstreffen als circa dreistündige Videokonferenzen durchgeführt wurden (Termine: 13.10.2022 / 17.11.2022 / 08.12.2022 / 19.01.2023 / 23.02.2023 / 24.05.2023 / 26.06.2023 / 22.08.2023 / 26.09.2023 / 11.01.2024 / 25.01.2024 / 22.02.2024 / 13.03.2024 / 27.06.2024 / 15.01.2025). Zwei Arbeitstreffen (18. und 19.04.2023 / 08. und 09. 11.2023) wurden in Präsenz am Standort Duisburg des LANUV (neu: LANUK) durchgeführt.

Die inhaltliche Vorbereitung, Moderation und Protokollierung der Arbeitstreffen erfolgte durch Dr. Tobias Frische (UBA Fachgebiet II 2.6) unter Nutzung regelmäßiger Zuarbeiten aus dem Kreis der Ad hoc-AG. Den Teilnehmer*innen wurden die jeweiligen Arbeitsunterlagen vorab per E-Mail zugesandt; diese umfassten jeweils einen Satz Präsentationsfolien sowie bisweilen weitere, aus dem Kreis der Ad hoc-AG bereitgestellte Tischvorlagen. Die von Dr. Tobias Frische erstellten Ergebnisprotokolle der Arbeitstreffen wurden der Ad hoc-AG im Nachgang per E-Mail übersandt und werden Interessierten auf Anfrage vom UBA (Fachgebiet II 2.6) elektronisch zur Verfügung gestellt. Die Entscheidungsfindung in der Ad hoc-AG erfolgte per Mehrheitsbeschluss, wobei etwaige Minderheitenvoten und abweichende Einzelstimmen ebenfalls protokolliert wurden.

3.2 Prüfwert-Vorschläge für PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)

3.2.1 Die Prüfwert-Vorschläge in der Übersicht

Die Arbeitsgruppe „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ hat die im Folgenden in der Übersicht (Tabelle 2) dokumentierten Prüfwert-Vorschläge für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) erarbeitet. Die ausführliche Dokumentation der fachlichen Ableitung in dem von anderen Bodenschadstoffen bereits bekannten Berichtsformaten findet sich im Anhang, die Titel der beiden Dokumentationen – erstellt von der Ad hoc-AG als Autor*innenkollektiv – lauten:

- ▶ „Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ (Anhang 2)
- ▶ „Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch“ (Anhang 3)

Tabelle 2: Übersicht Prüfwert-Vorschläge PFAS für den Pfad Boden-Mensch (Direktpfad)

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)

Nutzungsszenario (maßgebliche Exposition: orale Aufnahme)	Summe der PFAS (µg/kg) nicht kanzerogen	PFOA (µg/kg) kanzerogen
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-Prüfwert x 2)

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

Stellvertretend für die Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) empfiehlt die Ad hoc-AG die in Tabelle 3 aufgelisteten 24 Substanzen standardmäßig zu untersuchen.

Tabelle 3: Standard-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

Substanzname (Kurzform)	Summenformel	CAS-Nr.
8:2 Fluortelomersulfonsäure (8:2 FTS)	C10H5F17O3S	39108-34-4
Perfluorooctansulfonamid (PFOSA)	C8H2F17NO2S	754-91-6
N-Methyl-Perfluorooctansulfonamid (N-MeFOSA)	C9H4F17NO2S	31506-32-8
N-Methyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure (N-MeFOSAA)	C11H6F17NO4S	2355-31-9
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamid (N-EtFOSA)	C10H6F17NO2S	4151-50-2
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure (N-EtFOSAA)	C12H8F17NO4S	2991-50-6

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

Weiterhin hat die Ad hoc-AG die nachfolgend dokumentierten Vorschläge für ergänzende Hinweise und Empfehlungen zusätzlich zu den Prüfwert-Vorschlägen erarbeitet.

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 Löschschäumen (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.

3.2.2 Bisheriger Verlauf und aktueller Sachstand der Gremienbefassung mit den Prüfwert-Vorschlägen

Die von der Ad hoc-AG erarbeiteten Prüfwert-Vorschläge wurden dem Ständigen Ausschuss Altlasten (ALA) der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) als fachlich kompetentem Ländergremium vorgestellt. Der bisherige Verlauf und der aktuelle Sachstand der Befassung dieses Gremiums mit den Prüfwert-Vorschlägen stellt sich wie folgt dar:

- ▶ Vorstellung in der 70. ALA-Sitzung am 04.06.24 durch Dr. Tobias Frische; ALA-Beschluss: ALA bittet um Vorstellung der Prüfwert-Ableitung im Gesprächskreis Schadstoffbewertung (GK Schadstoffbewertung) des ALA
- ▶ Vorstellung der Prüfwert-Ableitung im Rahmen der 52. Sitzung des GK Schadstoffbewertung am 25.09.24 durch Dr. Tobias Frische; Ergebnis: inhaltliche Rückmeldungen an Ad hoc-AG und Sachstandbericht des GK Schadstoffbewertung zur Prüfwert-Ableitung an ALA für dessen 71. Sitzung
- ▶ Vorstellung der von der Ad hoc-AG fachlich konsolidierten Prüfwert-Vorschläge im Rahmen der 71. ALA-Sitzung am 29.01.25 durch Dr. Tobias Frische; ALA-Beschluss: ALA bittet die Ad hoc-AG, dem GK Schadstoffbewertung die Prüfwert-Vorschläge zur Prüfung und gegebenenfalls Aufnahme in das „Informationsblatt für den Vollzug“ zur Verfügung zu stellen
- ▶ Übermittlung der von der Ad hoc-AG erarbeiteten ausführlichen Dokumentation der Prüfwert-Ableitung am 19.03.2025 an den GK Schadstoffbewertung; die fachliche Prüfung wurde mit Befassung des GK Schadstoffbewertung im Rahmen seiner 53. Sitzung am 08./09.04.25 abgeschlossen, Ergebnis: positive schriftliche Stellungnahme des GK Schadstoffbewertung (28.04.25) an ALA inklusive geringfügiger inhaltlicher Änderungsvorschläge an die Ad hoc-AG sowie Sachstandbericht des GK Schadstoffbewertung zur Prüfwert-Ableitung an ALA für dessen 72. Sitzung
- ▶ Vorstellung der fachlich finalisierten Prüfwert-Vorschläge im Rahmen der 72. ALA-Sitzung am 03./04.06.25 durch Dr. Tobias Frische, Ergebnis: ALA schließt sich dem positiven Votum des GK Schadstoffbewertung zu den Prüfwert-Vorschlägen an.
- ▶ Mit Beschluss in der 68. Sitzung am 24./25. September 2025 unterstützt die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) das positive Votum des ALA. Zudem bittet die LABO das BMUKN, die Prüfwertvorschläge im Rahmen einer nächsten Novelle in die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) aufzunehmen und zu verrechtlichen. Ergänzend bittet die LABO das BMUKN, die Vollzugserfahrungen der Länder bei der Prüfung der Aufnahme der Prüfwertvorschläge in die BBodSchV zu berücksichtigen.

3.3 Diskussion und Ausblick

Die von der Ad hoc-AG erarbeiteten Prüfwert-Vorschläge lassen sich aus fachlicher Sicht als robust abgeleitet, aktuell und innovativ einordnen – diese Einordnung wird auch durch die bisherigen Beschlüsse des kompetenten Fachgremiums (ALA) zu den Prüfwert-Vorschlägen im

Grundsatz bestätigt (s. Kap. 3.2.3 und 3.2.3). Diese Einordnung begründet sich insbesondere durch die umfassende Würdigung des aktuellen Bewertungsstandes nationaler (BfR) und internationaler (EFSA, US EPA, IARC) kompetenter Institutionen zu den gesundheitlichen Auswirkungen von PFAS (siehe Anhang 2 und Anhang 3). Besonders hervorzuheben ist hier, dass bisher in keinem der europäischen Länder, die nach einer orientierenden Recherche und persönlicher Mitteilung bereits Bodenwerte zur Gefährdungsabschätzung PFAS-kontaminierter Böden erarbeitet haben oder aktuell erarbeiten bzw. ihre existierenden Werte derzeit aktualisieren (Schweden, Norwegen, Niederlande, Flandern, Dänemark, Schweiz, UK) in der Ableitung die erst kürzlich veröffentlichte Neubewertung der kanzerogenen Wirkungen von PFOA durch IARC berücksichtigt wurde. (Hinweis: Ergebnisse dieser orientierenden Recherche nach PFAS-Bodenwerten in anderen EU-Staaten wurden als Posterpräsentation mit dem Titel *“Guideline Values for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils - a Survey at EU Member State Level”* bei der vom 15.-19.05.2022 in Kopenhagen (Dänemark) stattgefundenen 32. Jahrestagung der europäischen SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) präsentiert. Das Poster findet sich in Anhang 4; Interessierten werden auf Anfrage vom UBA (Fachgebiet II 2.6) die vollständigen Ergebnisse der Recherche elektronisch zur Verfügung gestellt.) Als fachlich und regulatorisch innovativ darf zudem der von der Ad hoc-AG vorgeschlagene Summen-Prüfwert („Summe der PFAS“) für die nicht-kanzerogenen Wirkungen von 24 toxikologisch relativ umfassend charakterisierten PFAS gelten. Vergleichbar explizite Bewertungsansätze für PFAS-Gemische in kontaminierten Böden finden sich nach der o.g. orientierenden Recherche in den anderen europäischen Ländern bisher nur vereinzelt; überwiegend finden sich dort Bodenwerte für insbesondere die beiden Leitsubstanzen PFOA und PFOS. Zudem ist der von der Ad hoc-AG vorgeschlagene Prüfwert „Summe der PFAS“ von 23 µg/kg für das sensibelste Nutzungsszenario (Kinderspielflächen) in seiner Größenordnung konsistent zu den recherchierten PFAS-Bodenwerten für vergleichbare Szenarien in Dänemark und der Schweiz. In beiden Fällen wurde die Ableitung ebenfalls mit dem EFSA4-TWI- bzw. -TDI-Wert vorgenommen woraus folgende Werte resultierten:

- ▶ 10 µg/kg in Dänemark: es handelt sich um einen Prüfwert ähnlich zu Deutschland, dieser gilt aber nur für die Summe der EFSA4-PFAS (Miljö -og Födevareministeriet, 2021)
- ▶ 30 µg/kg in der Schweiz: als sogenannter „Konzentrationswert für die Beurteilung der Sanierungsbedürftigkeit von Böden“, hier für Standorte bei Haus- und Familiengärten, Kinderspielplätzen und Anlagen, auf denen Kinder regelmäßig spielen; im Minimum wird empfohlen neun PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) in den Summenwert aufzunehmen, die Summation erfolgt allerdings toxizitätsgewichtet unter Anwendung der von RIVM vorgeschlagenen relativen Potenzfaktoren (RPF-Werte) (Aicher & Roth, 2017; Hahn, 2024 auf S. 23)

Die genannten Beispiele aus anderen Ländern verdeutlichen die grundsätzlichen fachlich-regulatorischen Herausforderungen in der Ableitung von Bodenwerten insbesondere für die Stoffgruppe der PFAS: So erfassen die bisher bekannten Bodenwerte – wie vorab ausgeführt – in vielen Ländern nur wenige Leitsubstanzen wie PFOA und PFOS als Einzelwerte, die EFSA4-PFAS als Summenwert sowie nur gelegentlich einen größeren Parameterumfang wie mit dem von der Ad hoc-AG erarbeiteten Prüfwert-Vorschlag „Summe der PFAS“ für die nicht-kanzerogenen Wirkungen von 24 PFAS geschehen. In Anbetracht der viele tausende Einzelstoffe umfassenden Stoffgruppe der PFAS wird mit den bisherigen Ansätzen insofern nur „die Spitze des Eisbergs“ adressiert. Dies gilt auch, wenn nur ein (nach wie vor nicht exakt bekannter) Anteil aller PFAS eine Altlastenrelevanz aufweisen wird und führt zu einer grundsätzlichen Unsicherheit in der Gefährdungsabschätzung. Dieser Unsicherheit versucht die Ad hoc-AG mit ihrem Hinweis zur „Ergänzung des Untersuchungsumfangs in speziellen Schadensfällen“ (siehe Kap. 3.2.1)

zumindest für bekanntere Schadensfälle, für die eine Bodenbelastung mit weiteren, nicht standardmäßig im Parameterumfang des Prüfwertes „Summe der PFAS“ berücksichtigten PFAS zu erwarten ist, zu begegnen.

Eine Schwierigkeit für die Ableitung von Bodenwerten generell ist dabei die Verfügbarkeit einer wissenschaftlich robusten und aussagekräftigen – und speziell für die Ableitung von Summenwerten möglichst vergleichbaren – Datenbasis zur Toxikologie bzw. den gesundheitlichen Auswirkungen der betrachteten Schadstoffe. Diese liegt nach wie vor nur für die „Spitze des Eisbergs“ (dies ist hier abermals die passende Formulierung) der Stoffgruppe der PFAS vor, d.h. für die bereits seit längerer Zeit bekannten und umfassender untersuchten PFAS („legacy PFAS“) womit die Ableitung entsprechender Bodenwerte für weitere PFAS bzw. die Einbeziehung weiterer PFAS in einen Summenwert begrenzt wird. Unmittelbar mit der Datenverfügbarkeit verknüpft ist zudem die Frage nach den einem Summenwert zugrunde gelegten Annahmen über das Zusammenwirken der berücksichtigten Einzelstoffe. Wie in Anhang 2 (Kap. 5.3) für den von der Ad hoc-AG erarbeiteten Prüfwert-Vorschlag „Summe der PFAS“ ausgeführt, wird bei diesem Vorschlag eine vergleichbare Toxizität der Einzelstoffe (d.h. Summation) und eine additive Kombinationswirkung angenommen. Diese für die 24 standardmäßig in der „Summe der PFAS“ berücksichtigten PFAS getroffenen Annahmen sind vor dem Hintergrund der aktuell verfügbaren Datenlage zwar als fachlich plausibel begründet einzustufen, vollumfassend durch toxikologische oder epidemiologischen Studien bestätigt sind sie derzeit allerdings noch nicht (insbesondere im Blick auf das eigentliche Schutzziel menschliche Gesundheit). Dies betrifft in besonderem Maße auch die Frage nach der vergleichbaren Toxizität der Einzelstoffe bzw. der Entscheidung der Ad hoc-AG gegen einen toxizitätsgewichteten Summenwert auf Grundlage der relativen Potenzfaktoren (Relative Potency Factors, RPF) nach RIVM (2022) in Verbindung mit dem EFSA4-TWI bzw. TDI-Wert aus EFSA (2020), wie in Anhang 2 (Kap. 5.2) diskutiert. Konsistent ist vor diesem Hintergrund ebenfalls die Entscheidung der Ad hoc-AG, einige kurz-kettige ebenso wie sehr langkettige PFCA und PFSA aufgrund ihres abweichenden toxikologischen Profils nicht in der „Summe der PFAS“ zu berücksichtigen. Insofern wurde in der Ableitung des Prüfwertes „Summe der PFAS“ konsequent nach fachlichen (toxikologischen) Argumenten vorgegangen und eine Durchmischung mit regulatorischen Erwägungsgründen (d.h. eine weitergehende Vorsorge-Orientierung) vermieden. Eine Verfolgung des Erkenntnisfortschritts zu relativen Potenzfaktoren von PFAS und deren Umsetzung in der gesundheitlichen Bewertung ist in jedem Fall geboten – womit sich die Einschätzung zur fachlichen Robustheit des Prüfwert-Vorschlag „Summe der PFAS“ in der Zukunft möglicherweise ändern könnte. Allerdings sind diese möglichen zukünftigen Änderungen von „aktuellen Bewertungsunsicherheiten“ infolge des Fortschritts der Wissenschaft ein grundsätzliches regulatorisches Dilemma – womit fachlich begründete Regelungen immer ein vorläufiger Charakter innewohnt.

Angesichts ihrer gesundheitlichen Relevanz in Verbindung mit einer hohen gesellschafts-politischen Aufmerksamkeit ist absehbar, dass die heute bereits intensiven Forschungen zur Toxikologie der PFAS und den gesundheitlichen Auswirkungen der PFAS auf den Menschen in den nächsten Jahren (bis Jahrzehnten, da „forever chemicals“) fortgesetzt werden und ein regelmäßiger Abgleich des Erkenntnisfortschritts mit etablierten Regelungsansätzen erfolgen wird bzw. erfolgen sollte. Im Blick auf die von der Ad hoc-AG erarbeiteten Prüfwert-Vorschläge gilt diese Aussage ebenfalls für die folgende Fragen:

- ▶ Welche Relevanz hat der in der Ableitung des Prüfwert-Vorschlags „Summe der PFAS“ herangezogene EFSA4-TDI-Wert basierend auf verringerter Impfantwort für die menschliche Gesundheit, d.h. für eine Erhöhung der Infektionsrisiken oder Krankheitsfälle (s. Anhang 2 Kap. 4.1)? Diese Frage kann nur mit weiteren aussagekräftigen epidemiologischen Studien beantwortet werden.

- ▶ Wie groß ist der relative Beitrag der direkten Bodenaufnahme zur internen PFAS-Gesamtbelastung der ansässigen Bevölkerung bzw. der Flächennutzer von PFAS-belasteten Standorten (s. Anhang 3 Kap. 12.8)? Auch diese Frage kann nur mit auf diese Fragestellung ausgerichteten epidemiologischen Studien beantwortet werden, die eine Differenzierung zwischen den verschiedenen potenziellen PFAS-Aufnahmewegen ermöglichen.
- ▶ Stützen neue wissenschaftliche Erkenntnisse die Einschätzungen der Ad hoc-AG zur vernachlässigbaren Relevanz des perkutanen (und für alle anderen Nutzungen außer Industrie/ Gewerbe auch inhalativen) Aufnahmepfades im Verhältnis zum oralen Aufnahmepfad (s. Anhang 3 Kap. 12.3 und 12.4)? Für beide Aufnahmepfade ist die aktuelle Informationslage spärlich und für eine bessere Einschätzung sind toxikologische und epidemiologische Studien erforderlich.
- ▶ Sind infolge neuer Erkenntnisse möglicherweise zukünftig auch für andere PFAS die kanzerogenen Wirkungen – wie im Prüfwert-Vorschlag der Ad hoc-AG für PFOA bereits geschehen (s. Anhang 2 Kap. 3.3 und 6.) – zu berücksichtigen? Diese Frage stellt sich aufgrund der Ähnlichkeit in der chemischen Struktur der (langkettigen) PFAS und ist durch entsprechende Evidenzen aus toxikologischen und epidemiologischen Studien zu beantworten.
- ▶ Sind bzw. wie relevant sind potenzielle Kombinationswirkungen einzelner PFAS bzw. von PFAS-Gemischen mit anderen Umweltschadstoffen (an PFAS-belasteten Standorten) für die Gefährdungsabschätzung? (s. Anhang 3 Kap. 12.2). Auch diese Frage lässt sich nur auf Grundlage von weitergehenden Erkenntnissen aus toxikologischen (in-vitro / mechanistisch, in vivo) und epidemiologischen Studien zur Exposition gegenüber Stoffgemischen beantworten.

Zudem wurde seitens des Gesetzgebers die fachliche Aktualität der von der Ad hoc-AG in der Ableitung der Prüfwert-Vorschläge herangezogenen „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) als klärungsbedürftig aufgerufen; wie in Kap. 1.2.3 ausgeführt, fußen diese auf dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand der 1990er-Jahre. Dass eine solche systematische fachliche Überprüfung geboten ist, wurde im Zuge der Arbeiten der Ad hoc-AG besonders an folgenden, intensiv diskutierten Punkten deutlich, zu denen in den „Ableitungsmaßstäbe“ aktuell keine Methoden und Bewertungsmaßstäbe definiert sind:

- ▶ Berücksichtigung von (Nicht-)Effekt-Daten, die mittels moderner statistischer Verfahren wie Benchmark Dose Modelling (vgl. EFSA4-TDI-Wert, s. Anhang 2 Kap. 4.1.1) berechnet wurden,
- ▶ Generelle Empfehlungen zum Umgang mit Stoffgemischen bzw. zur Ableitung von Summenwerten für Stoffgruppen (s. Anhang 2 Kap. 5),
- ▶ Berücksichtigung des Aufnahmepfades „Konsum von Eiern aus Hühnerhaltung im Privatgarten“ als Teil des Szenarios „Wohngebiete“ (s. Kap. 3.2.1)
- ▶ Bewertungsmaßstäbe für den „hinreichenden Abstand“ in der Ableitung von „plausibilisierten“ Prüfwerten, d.h. beim Vergleich von rechnerisch ermittelten Prüfwerten mit den Hintergrundgehalten/-werten in Böden (s. Anhang 3 Kap. 12.6).

4 Fachliche Ableitung von Prüfwerten für PFAS für den Pfad Boden-Grundwasser

4.1 Ausgangspunkt

Derzeit sind in der BBodSchV für sieben PFAS Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser aufgeführt. Darüber hinaus führt der „Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials“ der Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS (PFC) (kurz: „PFAS-Leitfaden“) für sechs weitere PFAS gesundheitliche Orientierungswerte auf, für die bei der Ableitung der GFS-Werte durch die LAWA-LABO-Kleingruppe „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für PFC“ keine ausreichende Datenlage vorhanden war, jedoch ein ähnliches Verhalten zu vermuten ist. Sind diese Werte am Ort der Beurteilung überschritten, ist eine nachteilige Veränderung des Grundwassers zu vermuten. Die geltenden GFS- und GOW-Werte sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung von GFS- und GOW-Werten entsprechend BBodSchV und „PFAS-Leitfaden“, sowie „toxikologisch begründeten Konzentrationen“.

PFAS	GFS [µg/L]	GOW [µg/L]	Toxikologisch begründete Konzentration gemäß Trinkwasserkommission [µg/L]
PFBA	10,0	--	10,0
PFPeA	--	3,0	0,1*
PFHxA	6,0	--	6,0
PFHpA	--	0,3	0,28
PFOA	0,1	--	0,02**
PFNA	0,06	--	0,02**
PFDA	--	0,1	0,035
PFBS	6,0	--	6,0
PFHxS	0,1	--	0,02**
PFHpS	--	0,3	0,1*
PFOS	0,1	--	0,02**

PFAS	GFS [µg/L]	GOW [µg/L]	Toxikologisch begründete Konzentration gemäß Trinkwasserkommission [µg/L]
6:2 FTSA	--	0,1	--
PFOSA	--	0,1	--
Weitere PFAS mit n(C)>3	--	0,1	--
PFUnDA	--	--	0,028
PFDODA	--	--	0,028
PFTrDA	--	--	1,7

*Summe PFAS-20 der TrinkwV (2023) <100 ng/l. Für die Stoffe PFPeA, PFPeS, PFHpS, PFDA, PFUnDS, PFDods und PFTrDS kann kein toxikologisch begründeter Einzelwert angegeben werden. Die Stoffkonzentration für PFPeA, PFPeS, PFHpS, PFDA, PFUnDS, PFDods und PFTrDS darf als Einzelwert und in Summe mit den weiteren Stoffen der PFAS-20 maximal 100 ng/l betragen.

**Summe PFAS-4 der TrinkwV (2023) <20 ng/l. Für die Stoffe PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS darf die aufsummierte Stoffkonzentration maximal 20 ng/l betragen.

4.2 Ableitung von Bodenwerten für den Pfad Boden-Grundwasser

Die Ableitung von Bodenwerten für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser basiert auf GFS-Werten, die durch die LAWA festgelegt werden. Seit der letzten Änderung der BBodSchV wurden keine neuen GFS-Werte für PFAS durch die LAWA festgelegt. Durch die Aktualisierung der europäischen Trinkwasserdirektive (EU-Richtlinie 2020/2184) und daraus folgend der neuen Trinkwasserverordnung (TrinkwV vom 20.06.2023) wurden jedoch die zulässigen Trinkwasser-gehalte für PFAS abgesenkt und erweitert: Ab dem 12.01.2026 gilt für 20 PFAS ein Summengrenzwert von 100 ng/L (PFCAs und PFSAs mit Kettenlängen n(C) = [4;13]), sowie ab dem 12.01.2028 für die EFSA4-PFAS ein Summengrenzwert von 20 ng/L. Die Trinkwasserwerte bilden zusammen mit ökotoxikologischen Werten die Grundlage für GFS-Werte. Nach einer Prüfung auf sensitivere, ökotoxikologische Werte wären die aktualisierten Trinkwasserwerte in GFS-Werte zu übertragen. Sobald die GFS-Werte festgelegt sind, sollten diese mit Hintergrundwerten für die entsprechenden PFAS-Parameter der bundesweiten Eluat-Hintergrundwerte abgeglichen werden, sodass sie (ggf. plausibilisiert) für den Pfad Boden-Grundwasser als Prüfwertvorschläge aufgestellt werden können.

Zusätzlich sollte beachtet werden, dass die deutsche Trinkwasser-Kommission am 14. Juli 2024 durch eine Veröffentlichung des Umweltbundesamtes bestehende Trinkwasserwerte und Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) durch aktualisierte GOW und neue Trinkwasser-Leitwerte (TW-LW) für PFAS ersetzt hat. (UBA 2024). Die Aktualisierung erfolgte, um im Übergang zu den neuen Trinkwasserwerten (vgl. TrinkwV) eine einheitliche Bewertung von PFAS im Trinkwasser sicherzustellen. Die TW-LW sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Derzeit ist die LAWA-Arbeitsgruppe „GFS-Werte“ beauftragt, die bestehenden GFS-Werte für PFAS zu aktualisieren und zu erweitern.

Zeitgleich stehen in der EU neue Umweltqualitätsstandards zur Ergänzung der Schadstoffliste der Grundwasserrichtlinie (EG-2006/118) zur Diskussion. Von der Europäischen Kommission liegt ein Vorschlag zur Änderung der Wasserrahmenrichtlinie vor (COD 2022/0344), der für PFAS eine Grundwasserqualitätsnorm von 4,4 ng/L PFOA-Äquivalenten für die Summe von 24 PFAS (gewichtet über ihre relative Potenz (RPF)) vorsieht. Diese Grundwasserqualitätsnorm wurde auch von SCHEER in ihrer wissenschaftlichen Bewertung dieses Vorschlags unterstützt (SCHEER 2022). Eine Entscheidung über die Umweltqualitätsstandards steht noch aus. Sollte der Vorschlag positiv verabschiedet werden, müsste diese Grundwasserqualitätsnorm in deutsches Recht übernommen werden und Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser entsprechend aufgestellt werden.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist anzumerken, dass die Prüfwerte der BBodSchV für PFAS im Pfad Boden-Grundwasser deutlich zu hoch angesetzt sind und einer Aktualisierung bedürfen – vergleiche derzeitiger Prüfwert PFOA = 100 ng/L vs. Trinkwasser-Wert für EFSA4-PFAS (beinhaltend PFOA) = 20 ng/L vs. vorgeschlagene Grundwasserqualitätsnorm PFOA-Äq. = 4,4 ng/L. Vor einer Festlegung eines Prüfwerts für PFAS im Wirkungspfad Boden-Grundwasser sollte das Ergebnis der Grundwasserqualitätsnorm auf EU-Ebene abgewartet werden.

Neu berechnete PFAS-Prüfwertvorschläge im Pfad Boden-Grundwasser sind darüber hinaus vor PFAS-Hintergrundwerten im Bodeneluat (2:1) und der sicheren Bestimmbarkeit zu plausibilisieren, um die Handlungsfähigkeit der Bodenschutzbehörden sicherzustellen und eine eindeutige Abgrenzung zwischen Hintergrundwerten und schädlichen Bodenveränderungen zu gewährleisten. Die für NRW im LANUV-Fachbericht 150 veröffentlichten Hintergrundwerte für neun PFAS (C4-C9 PFCAs und C4, C6 und C8 PFASs) im 2:1-Eluat in Oberböden von Agrarflächen des ländlichen Raums reichen von 3–288 ng/L. Diese Werte liegen in der Größenordnung der Trinkwasser-Leitwerte und teilweise darüber. Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS im 2:1-Eluat in Oberböden von Agrarflächen des ländlichen Raums werden derzeit abgeleitet. Sobald deren Ableitung erfolgt ist, wird empfohlen die in der TrinkwV beinhalteten Trinkwasserwerte und die potentiellen Umweltqualitätsstandards mit den Hintergrundwerten zu plausibilisieren.

5 Grundsätzliche Überlegungen zur Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS

5.1 Ableitung von Vorsorgewerten – rechtliche und fachliche Ausgangslage

Paragraph 8 Absatz 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes ermächtigt die Bundesregierung Vorsorgewerte zu erlassen, „*bei deren Überschreitung unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten in der Regel davon auszugehen ist, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht*“. Mit den Vorsorgewerten erfolgt die materielle Ausgestaltung der in Paragraph 7 formulierten Vorsorgepflicht hinsichtlich der Belastung von Böden mit Schadstoffen. Eine Beschreibung des Schutzziels sowie der Vorgehensweise zur fachlichen Ableitung von Vorsorgewerten findet sich bei Vogel et al. (2009). Übergeordnetes Schutzziel der Vorsorgewerte ist nach diesen Autor*innen „*der langfristige[r] Schutz der Böden vor zukünftigen Einwirkungen sowie der Erhalt der vielfältigen Nutzbarkeit der Böden. Sie sind der stoffliche Maßstab für gute Bodenqualität*.“ Die Ableitung der Vorsorgewerte erfolgt dabei für den Pfad Boden – Bodenorganismen, wobei Mikroorganismen, Pflanzen und wirbellose Bodentiere betrachtet werden. Zentrale Bedeutung kommt den für den jeweiligen Schadstoff vorliegenden validen Ergebnissen aus standardisierten ökotoxikologischen Laborverfahren mit Bodenorganismen zu. Der Datensatz muss dabei definierten Anforderungen hinsichtlich Datenumfang und Repräsentativität der untersuchten Bodenorganismen und trophischen Ebenen genügen. Eingangsdaten für die anschließenden Berechnungen sind die in den Experimenten ermittelten (Nicht-)Effekt-Konzentrationen, d.h. die NOEC- (= No-Observed-Effect-Concentration) oder EC10- (10% Effective Concentration) Werte. Aus diesen wird mit Hilfe eines mathematischen Verteilungsmodells eine Art-Empfindlichkeits-Verteilung (SSD = species sensitivity distribution) erstellt, aus welcher schließlich ein in seiner generellen Gefährdungshöhe per Konvention festgelegter Schwellenwert (HC5 = hazardous concentration for 5% of the species) für die (Nicht-)Gefährdung der Lebensgemeinschaft der Bodenorganismen durch den jeweiligen Schadstoff errechnet wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der errechnete Schwellenwert nicht nur die bodenlebenden Arten bzw. die Diversität der Bodenlebewesen, sondern auch die von ihnen getragenen Ökosystemfunktionen (wie z.B. Streuabbau) angemessen schützt. Die Plausibilität der auf diesem Wege rechnerisch ermittelten Vorsorgewerte ist schließlich nach Vogel et al. (2009) durch einen Vergleich „*mit Hintergrundkonzentrationen, Prüfwerten für andere Pfade, Effektdaten aus dem Freiland sowie internationalen Bodenwerten*“ zu überprüfen.

5.2 Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS – grundsätzliche rechtliche und fachliche Überlegungen

Zur fachlichen Ableitung und rechtlichen Umsetzung von Vorsorgewerten für die Stoffgruppe der PFAS sind insbesondere die nachfolgenden grundsätzlichen Aspekte zu adressieren:

► **Verfügbarkeit und Aussagekraft von Daten zur direkten Toxizität von PFAS gegenüber Bodenorganismen (Wirbellose, Pflanzen, Mikroorganismen)**

In ihrem den Stand der Literatur zusammenfassenden Review-Artikel beschreiben Ankley et al. (2021), dass die insgesamt recherchierte ökotoxikologische Datenbasis deutlich von PFOA und PFOS dominiert wird und dass für terrestrische Invertebraten/ Bodenorganismen vergleichsweise wenige Daten vorliegen. Vor diesem Hintergrund weisen die Autor*innen deutlich auf die generellen Herausforderung einer ökotoxikologischen Risikobewertung (bzw. Definition von Umweltqualitätszielen) für die Stoffgruppe der PFAS angesichts der

beschränkten Datenlage hin: *„In conclusion, the core challenge posed in assessing the ecological risks of PFAS as a broad class of either discrete chemicals or mixtures involves a lack of information to adequately assess their potential fate, exposure, and effects. Although it is certainly possible to generate the empirical exposure and effects data needed to conduct robust ecological assessments for a handful of high-priority PFAS, it is not reasonable to expect that extensive empirical data can or will be collected for the majority of PFAS precursors, parents, and metabolites/degradates of possible concern. Consequently, there is a need to consider resources such as curated knowledgebases, computational models, and cost-effective/rapid measures of persistence and biological activity as a basis for predictive approaches to help support risk assessment efforts for PFAS.“*

Eine aktuelle Posterpräsentation von Gelshorn, L. & Junghans, M. (2025) unterstreicht diese Feststellung nachdrücklich: Die Autorinnen konnten insgesamt lediglich 125 Effekt- bzw. Nicht-Effekt-Daten aus kurzfristigen (akuten) sowie 109 entsprechende Daten aus langfristigen (chronischen) Toxizitätstest mit Regenwürmern, Springschwänzen (Collembolen), Pflanzen und Mikroorganismen für elf PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFBS, PFHxS, PFOS) identifizieren, wobei sich die Anzahl der als valide und aussagekräftig eingestuften Werte nochmals reduzierte. Das generelle Fazit der Autorinnen zur Datenlage ist daher: *„For the majority of the PFAS only few or no effect data for soil organisms are available.“* Die Reihung im Blick auf den für Bodenorganismen verfügbaren Datenumfang entspricht Anklej et al. (2021), d.h. PFOS mit den meisten Daten wird gefolgt von PFOA und PFHxS, auf die restlichen betrachteten PFAS entfielen jeweils nur wenige Daten. Die von den Autorinnen im Überblick gezeigten akuten Effektdaten (EC50 bzw. LC50-Werte, d.h. die 50% effektive bzw. letale Konzentration) liegen überwiegend im zwei- bis dreistelligen mg/kg-Bereich und die entsprechenden Effekt- bzw. Nicht-Effekt-Daten (NOEC- bzw. EC10-Werte) aus langfristigen Tests überwiegend im ein- bis zweistelligen mg/kg-Bereich. Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass die bisher verfügbaren Daten für (dahingehend untersuchte) PFAS eine eher geringe direkte Toxizität gegenüber Bodenorganismen erkennen lassen. Auf Grundlage dieser Datenlage haben Gelshorn, L. & Junghans, M. (2025) eine Ableitung von „guide values“ (Richtwerte, vergleichbar den Vorsorgewerten in Deutschland) für die elf betrachteten PFAS vorgenommen, die im Grundsatz der in Kap. 5.1 skizzierten Ableitungsmethodik gemäß Vogel et al. (2009) vergleichbar ist. Im Ergebnis war den Autorinnen die Ableitung für sechs PFAS (PFBA, PFOA, PFNA, PFDA, PFHxS, PFOS) möglich, wobei sich unter Berücksichtigung von Extrapolationsfaktoren zur Abbildung der Datenunsicherheiten (10 für das „datenreiche“ PFOS bis 100 für die PFAS mit weniger Daten) Richtwerte für die direkte Toxizität gegenüber Bodenorganismen im zweistelligen µg/kg-Bereich (z.B. PFOS 79 µg/kg) errechneten; für die fünf anderen PFAS mit unzureichender Datenbasis wurden mittels Extrapolation von PFOS z.T. deutlich höhere Richtwerte ermittelt. Bedeutsam zur Einordnung ist hier aber besonders das Ergebnis der von den Autorinnen parallel vorgenommene Ableitung von Richtwerten für Nahrungsketteneffekte, d.h. zu sekundären Vergiftungen (secondary poisoning) von Regenwurm-fressenden Vögeln und Säugern. Bis auf einen Fall (mit etwa vergleichbaren Werten) liegen die Richtwerte für sekundäre Vergiftungen deutlich niedriger als die jeweiligen Richtwerte für die direkte Toxizität gegenüber Bodenorganismen (z.B. PFOS 5,75 µg/kg, d.h. Faktor 13 niedriger). Das Fazit der Autorinnen zu dieser Beobachtung ist insofern folgerichtig: *“Direct toxicity does not protect against secondary poisoning especially for longer chain PFAS.“* Diese Feststellung deckt sich mit den Ergebnissen öffentlich zugänglicher vergleichbarer Ableitungen wie z.B. für PFOS in den Niederlanden (RIVM, 2020). Als vorläufige Schlussfolgerung ist somit festzustellen, dass die Verfügbarkeit von Daten zur direkten Toxizität von PFAS gegenüber Bodenorganismen

(Wirbellose, Pflanzen, Mikroorganismen) generell begrenzt ist und sich auf eine relative geringe Anzahl besser untersuchter PFAS beschränkt. Damit wäre die Ableitung von fachlich robusten Vorsorgewerten ausgehend von Daten zur direkten Toxizität gegenüber Bodenorganismen derzeit nur für einige wenige besser untersuchte PFAS möglich. Zu klären wäre in diesem Zusammenhang zudem die Frage, ob bzw. welcher Ansatz für eine Gruppenbewertung mehrerer PFAS bzw. der Stoffgruppe der PFAS ausgehend von der aktuellen Datenbasis zur direkten Toxizität gegenüber Bodenorganismen möglich bzw. adäquat wäre. Als weitere vorläufige Schlussfolgerung deuten die vorliegenden Erkenntnisse stark darauf hin, dass die direkte Toxizität der (dahingehend vergleichend betrachteten) PFAS gegenüber Bodenorganismen (Wirbellose, Pflanzen, Mikroorganismen) für die Ableitung von Vorsorgewerten offensichtlich weniger relevant ist als die zu besorgende sekundäre Vergiftung (secondary poisoning) von terrestrischen Wirbeltieren infolge der PFAS-Belastung von Böden (s. dazu auch nachfolgender Anstrich).

► **Aktualität und Eignung der bisherigen Ableitungsmethodik**

In der von Vogel et al. (2009) beschriebenen Vorgehensweise zur Ableitung der Vorsorgewerte wird u.a. auf mittlerweile überholte europäische Leitlinien zur Umweltrisikobewertung von Industriechemikalien verwiesen. Es ist insofern klärungsbedürftig, welcher aktuelle Sachstand zur Ableitung vergleichbarer Umweltqualitätsziele mittlerweile im europäischen/ internationalen regulatorisch-wissenschaftlichen Kontext etabliert ist, der ggfs. für eine Ableitung von Vorsorgewerten gemäß aktuellem Stand der Wissenschaft angemessener ist als die bisherige Ableitungsmethodik. Hierbei ist für die Stoffgruppe der PFAS insbesondere auch der Frage nachzugehen, wie die ökotoxikologischen – und beim weiteren Transfer zum Menschen als Konsumenten von tierischen Produkten (hier: Wildtieren) – ggfs. auch toxikologischen Auswirkungen infolge des Transfers von PFAS aus belastetem Boden in die terrestrische Nahrungskette (Biomagnifikation bzw. sekundäre Vergiftung) bzw. die PFAS-Aufnahme (Bioakkumulation) durch terrestrische Wirbeltiere angemessen in der Ableitung der Vorsorgewerte zu berücksichtigen sind. Dass dieser Transferpfad „Boden – Wirbeltier = Nahrungsquelle – Mensch“ für die Stoffgruppe der PFAS bzw. die daraus resultierende PFAS-Exposition von Schutzgütern von hoher Relevanz ist, muss – ungeachtet nach wie vor großer Wissenslücken zu diesem Transferpfad – als belegt gelten. Die Wissenslücken betreffen dabei einerseits die generell noch begrenzte Informationslage zur internen PFAS-Belastung von terrestrischen Wildtieren, da erst in jüngerer Vergangenheit eine hinreichend leistungsfähige und für den Routineeinsatz geeigneten PFAS-Analytik verfügbar geworden ist. Mithin fehlen auch viele Detailkenntnisse zu den Aufnahmeprozessen von PFAS aus belastetem Boden in terrestrische Wirbeltiere und zum Transfer in der terrestrischen Nahrungskette (z.B. zur relativen Bedeutung von direkter Bodenaufnahme, belastetem Futter und Tränkwasser für die PFAS-Anreicherung, sowie weitere von der Biologie der jeweiligen Spezies abhängige Faktoren). Nach derzeitigem Kenntnisstand ist die Anreicherung bzw. der Transfer von PFOS hier von besonderer Bedeutung, welches oft die PFAS-Belastung von Wirbeltieren dominiert (siehe z.B. Guckert et al. 2023). In der jüngeren Vergangenheit prominent diskutierte Beispiele für diesen Transferpfad sind:

- i. der Transfer von PFAS in das Fleisch von Weiderindern an einem Schadensfall in Dänemark (siehe: <https://www.slagelse.dk/da/service-og-selvbetjening/bolig-og-byggeri/vand-og-kloak/spildevand/pfos-forurening-i-korsoer/>)
- ii. der Transfer von PFAS in Hühnereier aus Freiland-Haltung in den Niederlanden (siehe: <https://www.rivm.nl/nieuws/rivm-adviseert-geen-particuliere-eieren-meer-te-eten> bzw. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0011.pdf>)

- und Frankreich (siehe: [PFAS : focus sur la situation au sud de Lyon | Agence régionale de santé Auvergne-Rhône-Alpes \(sante.fr\)](#))
- iii. die Anreicherung von PFAS in Wildschweinen (speziell in der Leber) in Deutschland, weshalb das Umweltministerium der Bevölkerung generell den Verzicht auf den Konsum von Wildschweinleber empfiehlt (siehe: <https://www.bmu.de/themen/gesundheitspolitik/lebensmittelsicherheit/verbrauchertipps-gesundheit-und-lebensmittelsicherheit>). In Bezug auf die PFAS-Anreicherung in Wildschweinen wurde zudem im Rahmen des hier dokumentierten Projektes eine Analyse bereits publizierter Daten durchgeführt; diese Fallstudie widmete sich dabei dem Vergleich der PFAS-Belastungsmuster in Probenmaterial von Oberboden und Wildschwein (Leber), entnommen von bzw. erlegt unter anderem im Bereich einer bekannten großflächigen PFAS-Kontamination (Baden-Rastatt, Baden-Württemberg). Die Ergebnisse der Fallstudie wurden unter dem Titel „Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil and Wild Boar Samples from a PFAS Hot Spot Area – a Comparative Chemical Fingerprinting Exercise“ bei der vom 30.04.-04.05.2023 in Dublin (Irland) durchgeführten 33. Jahrestagung der europäischen SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) als Posterbeitrag präsentiert; das Poster findet sich in Anhang 5.

Schlussfolgernd ist zu betonen, dass der Transfer von Schadstoffen (d.h. dies betrifft nicht nur die Stoffgruppe der PFAS) aus belastetem Boden in die terrestrische Nahrungskette (Biomagnifikation bzw. sekundäre Vergiftung) bzw. die PFAS-Aufnahme (Bioakkumulation) durch terrestrische Wirbeltiere gemäß der bisherigen Ableitungsmethodik für Vorsorgewerte nicht vorgesehen ist. Dies bedeutet, dass – mindestens für Stoffe mit hoher Neigung zur Bioakkumulation und Biomagnifikation (was für einige, insbesondere langkettige PFAS offenkundig ist) – eine erhebliche Bewertungslücke in den aktuell geltenden vorsorgenden bodenschutzrechtlichen Regelungen vorliegt. Demgegenüber wird dieser Transferpfad gemäß der in Kap. 3.3. bereits erwähnten orientierenden Recherche zur Ableitung von Bodenwerten (für PFAS) in einigen anderen europäischen Ländern adressiert; beispielhaft seien hier die Niederlande genannt, in deren Ableitung der Transfer in der terrestrischen Nahrungskette (Regenwurm-fressender Vogel und Säugetier) Berücksichtigung findet (z.B. für PFOS dokumentiert in RIVM, 2020).

► Grundsätzliche umweltpolitische Fragen

Aus übergeordneter regulatorisch-politischer Perspektive zu beantworten ist zudem die Frage, ob die Festsetzung von Vorsorgewerten für PFAS nicht ein umweltpolitisch falsches, weil nicht konsequent am vorsorgenden Bodenschutz orientiertes Signal setzen würde – im Sinne von: bis zum Vorsorgewert darf „aufgefüllt“, d.h. der Boden belastet werden. Zu bedenken ist hierbei auch, dass Flächeneigner gar keine realistischen Handlungsoptionen haben, um vorsorglich eine ggfs. fortschreitende diffus-ubiquitäre Belastung der Böden mit PFAS (insbesondere über atmosphärischen Eintrag) zu verhindern. Wie in Anhang 3 Kap. 7 beschrieben, bestätigen aktuelle Untersuchungen eine flächendeckenden Grundbelastung der deutschen Oberböden mit PFAS im niedrigen µg/kg-Bereich. Diese PFAS-Grundbelastung gilt also auch für „unbelastete Regionen“ Deutschlands fernab bekannter PFAS-Emmissionsquellen oder Schadensfälle. Die Bedeutung dieser flächendeckenden PFAS-Grundbelastung für ökologische und gesellschaftliche Schutzgüter ist derzeit noch nicht überschaubar, wird aber aufgrund der Persistenz der Stoffgruppe sowie ihrer Neigung zur Anreicherung in Organismen und entlang von Nahrungsketten erwartbar auf lange Zeit eine umweltpolitische Herausforderung bleiben. Mit Blick auf die bereits erwähnte Anreicherung

von PFAS in Wildschweinleber und die generelle Empfehlung des Umweltministeriums (BMUKN), auf den Konsum von Wildschweinleber zu verzichten, ist zu konstatieren: Das nach Vogel et al. (2009) mit den Vorsorgewerten angestrebte übergeordnete Schutzziel „*Erhalt der vielfältigen Nutzbarkeit der Böden*“ ist für die Stoffgruppe der PFAS mit der bereits heute in Deutschland bekannten PFAS-Grundbelastung nicht mehr einlösbar, d.h. eine „uneingeschränkte Nutzung“ ist bereits bei der heutigen PFAS-Grundbelastung nicht mehr möglich. Diese ernüchternde Erkenntnis darf als ein weiteres Kennzeichen des „Anthropozän-Erdzeitalters“ gelten. Insofern steht eine politische Einordnung der heutigen PFAS-Grundbelastung der Oberböden in Deutschland im Sinne des oben bereits zitierten Paragraphen 8 Absatz 2 an; also, dass diese eine „*großflächig siedlungsbedingte*“ Realität darstellt und insofern keine „*Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht*“. Aus Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes sollten allerdings auch bei einer solchen „realpolitischen Feststellung“ alle mach- und wirksamen Maßnahmen umgesetzt werden, um die wertvolle Ressource Boden vor dem weiteren Eintrag von PFAS über sämtliche potenziellen Eintragspfade so gut wie möglich zu schützen.

6 Zusammenfassende Diskussion der Projektergebnisse und Ausblick

Die Zielstellung des in diesem Bericht dokumentierten Forschungsvorhabens – die fachliche Ableitung von Bodenwerten für Vertreter der Stoffgruppe der PFAS gemäß Anforderungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und aktuellem Stand des Wissens – wurde teilweise erreicht. Die Arbeitsergebnisse lassen sich in der Zusammenschau kursorisch wie folgt zusammenfassen, wobei jeweils der Sachstand im fachlichen/ politischen Abstimmungs- und Umsetzungsverfahren notiert ist:

- ▶ **Pfad Boden-Pflanze (s. Kap. 2):** Erarbeitet wurden wissenschaftlich abgeleitete Prüfwert-Vorschläge für vier einzeln betrachtete PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze und sechs Prüfwert-Vorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze (PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA, PFBS als Einzelsubstanzen sowie die Summe der EFSA4-PFAS, d.h. Summe von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS). Eine Vorstellung der Prüfwert-Vorschläge in kompetenten Fachgremien ist noch nicht erfolgt.
- ▶ **Pfad Boden-Mensch (s. Kap. 3):** Erarbeitet wurde ein fachlich begründeter 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). Diese Prüfwert-Vorschläge wurden bereits vom Ständigen Ausschuss Altlasten (ALA) der Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) fachlich befürwortet; die Befassung durch weitere Fachgremien steht, ebenso wie die politische Diskussion, noch aus.
- ▶ **Pfad Boden-Grundwasser (s. Kap. 4):** Die Erarbeitung von aktualisierten Prüfwert-Vorschlägen für die sieben derzeit in der BBodSchV (2021) mit Prüfwerten für den Pfad Boden-Grundwasser hinterlegten PFAS sowie ggfs. die Erarbeitung von zusätzlichen Prüfwert-Vorschlägen für weitere PFAS ist nicht erfolgt. Der Grund dafür ist, dass die relevanten Vorarbeiten für die Ableitung für den Pfad Boden-Grundwasser, d.h. die Aktualisierung der Regelungen für PFAS gemäß Trink- und Grundwassergesetzgebung auf sowohl europäischer als auch nationaler Ebene im Bearbeitungszeitraum des hier berichteten Projektes noch nicht abgeschlossen waren.
- ▶ **Ableitung von Vorsorgewerten (s. Kap. 5):** Zur Ableitung von Vorsorgewerten für PFAS wurden im Sinne einer „kursorischen Vorarbeit“ einige grundsätzliche rechtliche und fachliche Überlegungen angestellt.

In der Gesamtschau über alle Pfade lassen sich für die Ableitung von Bodenwerten für die Stoffgruppe der PFAS die folgenden wesentlichen fachlichen Hemmnisse bzw. Herausforderungen benennen:

- ▶ **Die sehr große Stoffgruppe:** Es ist zu konstatieren, dass die bisher üblichen Ansätze zur Ableitung von Umweltqualitätszielen (bzw. hier von Bodenwerten) in Anbetracht der viele tausend einzelne Stoffe umfassenden Gruppe der PFAS überfordert sind. So ist davon auszugehen, dass trotz des in den letzten Jahren deutlichen Fortschritts in den chemischen Nachweisverfahren für PFAS in Umweltmedien (hier: Target-Analytik für Boden, Sicker- und

Grundwasser) nach wie vor nicht sämtliche potenziell (Altlasten- bzw. Schadensfall- bzw. Umwelt-)relevanten PFAS überhaupt erfasst wurden und werden. Dieses Dilemma („man misst nur, wofür man ein (Standard-)Verfahren hat“) wurde durch die sukzessive Identifikation von PFAS-Vorläuferverbindungen und Ersatzstoffen (neue PFAS als Ersatz für ehemals verwendete PFAS) deutlich aufgezeigt. In der Konsequenz führt dies dazu, dass bereits mit der aus chemisch-analytischen Gründen begrenzten Anzahl berücksichtigter Einzelstoffe davon auszugehen ist, dass möglicherweise nur „die Spitze des PFAS-Eisbergs“ adressiert wird. Diese Situation führt zu einer grundsätzlichen Unsicherheit in der Ableitung von Bodenwerten und deren anschließender Nutzung in der Praxis der Gefährdungsabschätzung. Inwieweit in der Zukunft jüngere bzw. in Entwicklung befindliche chemische Verfahren für Summenparameter (wie z.B. TOP-Assay) oder Suspect-/Non-Target-Screening eine umfassendere Bewertung von PFAS im Boden unterstützen können, ist Gegenstand aktueller Forschungen.

- ▶ **Das begrenzte Wissen/ die fehlenden Daten:** Ein weiterer Grund dafür, dass durch bisherige Bewertungsansätze nur „die Spitze des PFAS-Eisbergs“ adressiert wird, ist das für den Großteil der PFAS nur begrenzte Wissen bzw. die fehlenden Daten zu den relevanten Stoffeigenschaften der einzelnen PFAS (betreffend physikochemische Eigenschaften, Umweltverhalten, Auftreten in der Umwelt/ Monitoring, Toxikologie und Ökotoxikologie). Eine für die Ableitung hinreichende wissenschaftlich robuste Datenbasis liegt derzeit nur für relativ wenige, bereits seit längerer Zeit im Fokus stehende PFAS vor. Somit ist die Ableitung von Bodenwerten für viele potenziell umweltrelevante PFAS derzeit gemäß der üblichen Ansätze nicht möglich. Dies wird sich in Anbetracht des (nicht nur zeitlichen) Aufwandes zur Generierung entsprechender empirischer Daten in naher Zukunft nicht ändern – auch, wenn aktuell sehr viel zur Thematik geforscht wird. Inwiefern hier zukünftig mit Hilfe moderner Methoden (z.B. in silico) oder neuer Extrapolationsverfahren und strukturanaloger Ansätze (read-across) dennoch ein regulatorischer Fortschritt möglich sein wird, bleibt zu zeigen. Das begrenzte Wissen betrifft zudem nicht nur die Informationen/ Daten zu den einzelnen PFAS, sondern ebenfalls das Verständnis zum Zusammenwirken von PFAS (Kombinationswirkungen/ Mischungstoxizität). So ist zwar offenkundig, dass die Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber PFAS typischerweise als PFAS-Stoffgemisch erfolgt (zuzüglich je nach Altlast/ Schadensfall weitere Schadstoffe). Die Forschungsarbeiten und die regulatorische Diskussion zur Frage, mit welchem (Summen-)Ansatz bzw. welchen Annahmen über das Zusammenwirken der berücksichtigten (PFAS-)Einzelstoffe solche multiplen Expositionen zu bewerten sind, ist jedoch noch nicht abgeschlossen.
- ▶ **Die fachlich veralteten Ableitungsmethoden und -maßstäbe:** Neben den vorab genannten, für die Stoffgruppe der PFAS spezifischen Herausforderungen, zeigten die im Rahmen des hier berichteten Projektes durchgeführten Arbeiten auf, dass die für die Ableitung von Bodenwerten in Deutschland maßgeblichen „Ableitungsmaßstäbe“ (BMU, 1999) nicht mehr dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen und/oder deutliche „Bewertungslücken“ bestehen (s. Kap. 2 und Kap. 3.3).

7 Quellenverzeichnis

- Aicher, L. & Roth, N. (2017). Risikobeurteilung von Bodenschadstoffen in Haus- und Familiengärten gemäss Anhang 3, Ziffer 2 AltIV für die menschliche Gesundheit, SCAHT, 24. Januar 2017.
[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/risikobeurteilung-von-bodenschadstoffen-in-haus-und-familiengaerten-gemaess-anhang3-ziffer2-altiv-fuer-die-menschliche-gesundheit.pdf.download.pdf/Risikobeurteilung Stoffe Boden AltIV.pdf&ved=2ahUKEwittMjqkLKNAX0zGIHHYivG9gQFnoECBkQAQ&usq=AOvVaw0G8VXN--fCzOh-BkbJrEQ](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/risikobeurteilung-von-bodenschadstoffen-in-haus-und-familiengaerten-gemaess-anhang3-ziffer2-altiv-fuer-die-menschliche-gesundheit.pdf.download.pdf/Risikobeurteilung%20Stoffe%20Boden%20AltIV.pdf&ved=2ahUKEwittMjqkLKNAX0zGIHHYivG9gQFnoECBkQAQ&usq=AOvVaw0G8VXN--fCzOh-BkbJrEQ)
- Ankley, G. T., Cureton, P., Hoke, R. A., Houde, M., Kumar, A., Kurias, J., Lanno, R., McCarthy, C., Newsted, J., SAlice, C. J., Sample, B. E., Sepulveda, M. S., Steevens, J. & Valsecci, S. (2021). Assessing the Ecological Risks of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Current State-of-the Science and a Proposed Path Forward. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40, 564-605. <https://doi.org/10.1002/etc.4869>
- Bachmann, G., Bannick, C.-G., Giese, E., Glante, F., Kiene, A., Konietzka, R., Rück, F., Schmidt, S., Terytze, K. & von Borries, D. (1997). Fachliche Eckpunkte zur Ableitung von Bodenwerten im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes. In: Rosenkranz, D. (Hrsg.) *Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege, und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2025). Leitlinien zur Bewertung von PFAS (Stand: Februar 2025). https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/pfas/rechtliches/doc/leitlinien_zur_bewertung_von_pfas.pdf
- Biegel-Engler, A., & Frauenstein, J. (2022). PFAS in Soil and Groundwater: Comprehensive Challenges and Progress in Regulation and Management in Germany. In *International Yearbook of Soil Law and Policy* (Vol. 2022, pp. 285-304). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40609-6_12
- 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.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf
- 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_f_und_ma_nahmenwerte.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2021). Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung.
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) (1998). <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BJNR050210998.html>
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) (2023). https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv_2023/index.html
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) (1999).
http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl199s1554.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2021). Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. *Bundesgesetzblatt*, 43.

Dieter, H. H., Frank, D., Gühr, R., Konietzka, R., Moll, B., Stockerl, R., von der Trenck, K. T., Schudoma, D. & Zedler, B. (2017). Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser (Aktualisierte und überarbeitete Kurzfassung 2016). Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.). https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf

Breitschwerdt, A., Herrchen, M., Klein, M., Kördel, W., Storm, A. & Wahle, U. (2002). Erhebungsuntersuchungen zum Transfer organischer Schadstoffe vom Boden in Nahrungs- und Futterpflanzen und Ableitung von Prüfwerten nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz. Texte 50/02. Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2201.pdf>

Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites [Review]. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), Article 20. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

Brusseau, M. L., Anderson, R. H., & Guo, B. (2020). PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites. *Science of The Total Environment*, 740, 140017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140017>

Dasu, K., Xia, X., Siriwardena, D., Klupinski, T. P., & Seay, B. (2022). Concentration profiles of per- and polyfluoroalkyl substances in major sources to the environment. *J Environ Manage*, 301, 113879. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113879>

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/https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>

Gelshorn, L. & Junghans, M. (2025): Scientific basis for guide values for 11 PFASs in soil. SETAC Europe 35th Annual Meeting, 11 May - 15 May 2025, Vienna (Austria).

Guckert, M., Rupp, J. Nürnberg, G., Nödler, K. Koschorreck, J., Berger, U., Drost, W., Siebert, U., Wibbelt, G., Reemtsma, T. (2023). Differences in the internal PFAS patterns of herbivores, omnivores and carnivores - lessons learned from target screening and the total oxidizable precursor assay. *Science of The Total Environment*, Volume 875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162361>

Hahn, B. 2024. Lösungsansätze für den Umgang mit PFAS-belasteten Standorten - Ergebnisbericht der Altlasten- und Abfall-Arbeitsgruppen BAFU-Kantone 2022/2023. Bern, 23. Oktober 2024. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/projekt-pfas-im-bereich-altlasten-und-abfall-loesungsansaetze-fuer-den-umgang-mit-pfas-belasteten-standorten.pdf.download.pdf/Ergebnisbericht_Projekt_PFAS_de.pdf&ved=2ahUKEwjEutXXhrKNaxXR3gIHHZ-3KV8QFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2eO-JyrTD_0s2pfnYnPZ6H

Holzwarth, F., Radtke, H., Hilger, B. & Bachmann, G. 2000. Bundes-Bodenschutzgesetz/Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung - Handkommentar.

Kotthoff, M., Fliedner, A., Rüdell, H., Göckener, B., Bücking, M., Biegel-Engler, A., & Koschorreck, J. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – Levels and patterns in different matrices. *Science of The Total Environment*, 740, 140116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140116>

- 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
- Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (1998). Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigungen/Altlasten-Pflanze. In: Rosenkranz, D., Einsele, G., Bachmann, G. & Harreß, H.-M. (eds.) Handbuch Bodenschutz. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2017). Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser - Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC). https://www.lawa.de/documents/03_anlage_3_bericht_gfs_fuer_pfc_endfassung_22_11_2017_2_155230220_8.pdf
- Miljø -og Fødevarerministeriet (Opdateret juli 2021): Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord (Ministerium für Umwelt und öffentliche Gesundheit; Aktualisiert Juli 2021; Liste der Qualitätskriterien in Bezug auf kontaminierte Böden). https://edit.mst.dk/media/twgdfltx/liste-over-jordkvalitetskriterier-juli-2021_final_rev.pdf
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) (2020). Ecotoxicologische risicogrenzen voor PFOS in bodem en grondwater. RIVM-briefrapport Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). 2020-0085: 80. <https://dx.doi.org/10.21945/RIVM-2020-0085>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM (2022). Risicogrenzen voor PFAS in oppervlaktewater (RIVM-briefrapport 2022-0074). DOI 10.21945/RIVM-2022-0074 <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0074.pdf>
- Umweltministerkonferenz (2016). 87. Umweltministerkonferenz am 2. Dezember 2016 in Berlin - Ergebnisprotokoll. <https://www.umweltministerkonferenz.de/Startseite.html>
- Vogel, I., Terytze, K., Römbke, J. & Jänsch, S. 2009. Methodologie der Ableitung von Vorsorgewerten unter besonderer Berücksichtigung der Bodenorganismen im Hinblick auf den Schutz der Lebensraumfunktion von Böden. In: Rosenkranz, D. (Hrsg.) Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege, und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Wellnitz, 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>

Anhang 1 „Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ – Dokumentation der Ad hoc-AG „PFAS-Prüfwerte / Boden-Pflanze“ vom 30.04.2025

DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8140>

Anhang 2 „Fachliche Ableitung von toxikologisch begründeten tolerierbaren resorbierten Körperdosen (TRD-Werten) für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)“ – Dokumentation der Ad hoc-AG „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ vom 30.04.2025

DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8139>

**Anhang 3 „Fachliche Ableitung von Prüfwerten für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) für den Wirkungspfad Boden-Mensch“ –
Dokumentation der Ad hoc-AG „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“
vom 30.04.2025**

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

Anhang 4 Posterpräsentation „Guideline values for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils – a survey at EU Member State Level” (Quelle: eigene Darstellung T. Frische, UBA)

Guideline Values for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils – a Survey at EU Member State Level

Tobias Frische, Arno Märten, Annegret Biegel-Engler
German Environment Agency (UBA), Section II 2.6 “Soil Protection Measures”
Contact: tobias.frische@uba.de

SETAC Europe
32nd Annual Meeting
15-19 May 2022
Copenhagen, Denmark

Background There is concern across the EU about the hazards and impacts of PFAS-contaminated soils on human health, wildlife and ecosystems. To enable local authorities in decision-making regarding the need for site-specific assessment or management, scientifically justified guideline values for PFAS in soil are essential. A rough overview of publicly available guideline values collated from five EU Member States is presented, focusing on sensitive sites uses.



Conclusion The survey revealed that national guideline values are not easy to compare due to differences in regulatory scope, site use scenarios, input data and calculation methods. Yet, critical (PFOS and PFOA) soil contents derived for sensitive site uses are mostly in a similar range, and, rather low if compared to “typical” soil pollutants. Especially PFAS exposure of humans and wildlife via bioaccumulation and biomagnification in local food chains at PFAS-contaminated sites requires more targeted research (e.g. biomonitoring).



NOTE: Albeit collated with reasonable care, definite accuracy of details cannot be assured, especially in case of translations from references in national languages.

Anhang 5 Posterpräsentation „Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil and Wild Boar Samples from a PFAS Hot Spot Area – a Comparative Chemical Fingerprinting Exercise” (Quelle: eigene Darstellung T. Frische, UBA)

Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil and Wild Boar Samples from a PFAS Hot Spot Area – a Comparative Chemical Fingerprinting Exercise

Tobias Frische¹, Annegret Biegel-Engler¹, Marc Guckert², Jan Koschorreck¹, Raphaela Osterauer³, Christina Riemenschneider⁴, Jana Rupp⁵, Reiner Söhlmann⁶

¹German Environment Agency (UBA) *DVGW-Technologiezentrum Wasser (German Water Centre)
²State Institute for Environment Baden-Wuerttemberg (LUBW) *State Institute for Chemical and Veterinary Analysis of Food (CVUA)
³Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ *District Office Rastatt, Office for Environment and Commercial Operator Inspection
tobias.frische@uba.de



SETAC Europe
33rd Annual Meeting
30 April - 04 May 2023
Dublin, Ireland

Hypothesis The internal exposure of wild boars (*Sus scrofa L.*, liver samples) reflects the PFAS soil contamination in a PFAS hot-spot area.

Approach

Published data are compared on PFAS patterns of surface soil (SOIL) and wild boar liver tissue (WBL) sampled from a well-known PFAS hot-spot area (Rastatt case, about 200 km²) in Germany. First, WBL and SOIL data obtained from extensive target analysis (~40 PFAS, for details refer to original papers) were compared. Second, WBL hot-spot data were put into context with PFAS data from wild boar sample collectives with increasing distance to the hot-spot area (Table 1). The pattern of those 16 PFAS (PFAS-16, Table 2) dominating in WBL samples were considered in more detail.

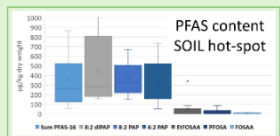


Table 1	Table 2
Wild boar liver tissue sample collectives (WBL) – description and data source	PFAS-16 considered in detailed analysis and their Relative Potency Factors (RPF)
WBL hot-spot 9 samples from wild boars culled in the centre of the hot-spot area Rupp et al. (2023)	group compound RPF
WBL regional <40 km 17 samples from wild boars culled in the region with less than 40 km hot-spot area – assumed to be the maximum potential home range of wild boars CVUA (2019) and personal communication)	11 Perfluorobutanoic acid (PFBA) 0.05
WBL regional 40-100 km 15 samples from wild boars culled in the region with 40-100km distance to the hot-spot area Rupp et al. (2023)	PFAs 1 Perfluoropentanoic acid (PFPA) 0.03
WBL regional >100 km 11 samples from wild boars culled in a region with more than 100km distance to the hot-spot area – considered as reference region (i.e. only diffuse airborne “background” PFAS contamination) Rupp et al. (2023)	2 Perfluorohexanoic acid (PFHA) 0.01
Surface soil sample collective (SOIL) – description and data source	3 Perfluoroheptanoic acid (PFHpA) 0.51
SOIL hot-spot 10 samples from the upper mineral soil layer (0-30cm) of 10 arable land sites in the centre of the hot-spot area Kotthoff et al. (2020)	4 Perfluorooctanoic acid (PFDA) 1
	5 Perfluorononanoic acid (PFNA) 10
	6 Perfluorodecanoic acid (PFDA) 7
	7 Perfluoroundecanoic acid (PFUnDA) 4
	8 Perfluorododecanoic acid (PFDoDA) 3
	9 Perfluorotridecanoic acid (PFTriDA) 1.65
	10 Perfluorotetradecanoic acid (PFTrDA) 0.3
	5 Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS) 0.001
	PFAs 11 Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS) 0.6
	12 Perfluoroheptanesulfonic acid (PFHpS) 1.3
	13 Perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) 2
	14 Perfluorodecansulfonic acid (PFDS) 2

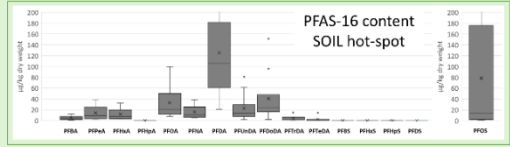
Third, PFOA-equivalents as a toxicological descriptor were calculated with WBL data based on the relative potency factor (RPF) approach following JRC (2021): The respective liver content of each of the PFAS-16 targets is scaled relative to the index compound PFOA, i.e. multiplied by the individual RPF-value (derived by Bil et al. (2021) from rat liver toxicity data) (Table 2). Summation of the individual PFOA-equivalents provides a measure of the total “toxic load”; the relative contribution (%) of individual PFAS compounds to the summed PFOA-equivalents illustrates the “toxic load pattern”.

Results and discussion

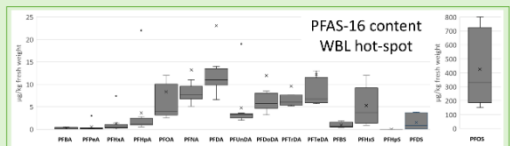
Note:
Box-Whisker-Plots display minimum, maximum, quartiles 1-3, arithmetic mean, outlier; all numbers provided are median values.



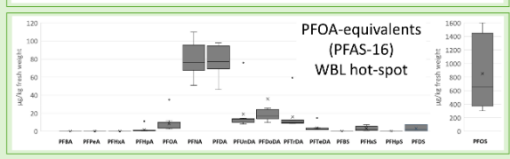
- **SOIL hot-spot** samples contain high overall PFAS loads (1248 µg/kg, median sum of all 41 quantifiable target PFAS)
- Six precursor compounds make up 79% of all PFAS determined, while the sum of PFAS-16 make up only 21% (266 µg/kg)
- Contamination by further (PFOS-)precursor compounds not included in the here considered data is known for the Rastatt hot-spot (e.g. SamPAP = Perfluorooctane sulfonamidoethanol-based phosphate esters)



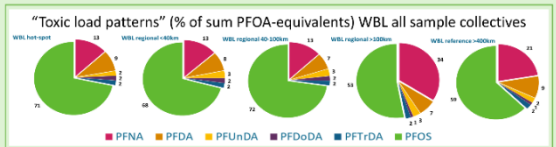
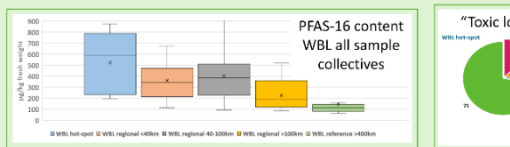
- In **SOIL hot-spot** samples PFAS-16 pattern is dominated by long-chain PFAs (see also Rupp et al., 2023)
- PFOS contributes 7% to the sum of PFAS-16 (266 µg/kg)
- PFOS/PFOA-ratio is low (0.7)
- Data are largely scattering between individual samples indicating spatial heterogeneity of soil contamination in the hot-spot area



- In **WBL hot-spot** samples the PFAS-16 make up 99.5% of the median sum content of all 42 quantifiable PFAS (Σ 590 µg/kg), while contamination by analysed precursor compounds is negligible
- PFAS-16 content pattern is dominated by long-chain PFAs and PFOS
- PFOS contributes 83% to the sum of PFAS-16 and the PFOS/PFOA-ratio is high (67) - consistent to published WBL data from other hot-spots
- Data are largely scattering between individual samples supposedly due to heterogeneity of living habitats and biology (age, sex, home range, etc.)



- The overall toxic load (PFAS-16) of **WBL hot-spot** samples is high with a median sum of PFOA-equivalents of 1278 µg/kg
- PFOS clearly dominates the toxic load by a relative contribution of 71%
- Beside PFOS, further 5 long-chain PFAs make a relevant contribution (i.e. >1 %) to the overall toxic load, in decreasing rank order: PFOS >> PFNA > PFDA > PFUnDA = PFDoDA = PFTriDA



→ Compared to the **WBL hot-spot** samples, the sum of PFAS-16 contents are lower in **WBL regional >100km** and **WBL reference >400km** samples, but not in the other two collectives sampled closer to the hot-spot area.

→ Toxic load patterns of **WBL hot-spot, WBL regional <40km** and **WBL regional 40-100km** are similar, but differ from the less contaminated collectives sampled farther away from the hot-spot area.

Conclusion The results confirm the potential indicative value of liver samples taken from wild boars living in a PFAS hot-spot area – both regarding the extent of internal exposure and the toxic load pattern. Still, spatially representative transect studies for a generalization are needed. The significance of PFAS precursors demands further research, too.

References: JRC (2021) Draft EQS dossier on PFAS. EC Joint Research Centre, Ispra. Bil et al. (2021) DOI 10.1002/etc.4815. Rupp et al. (2023) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162028 CVUA (2019) https://www.uauw.de/pub/beitrag.asp?subid=28,Thema_ID=7&ID=3061&Pfl=No&lang=DE. Kotthoff et al. (2020) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140116

