

TEXTE

51/2026

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**

von:

Lennart Gehrenkemper, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau; Dr. Caroline Baaske-Scholze, Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), Flintbek; Dr. Runa S. Boeddinghaus, Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ), Augustenberg; Titus Ebert, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising; Dr. Sandy Falk, Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Gießen; Dr. Bernd Göckener, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME), Schmallenberg; Dr. Philipp Roth, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf; Prof. Dr. Thorsten Stahl, Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Münsterland-Emscher-Lippe (CVUA-MEL), Münster; Hanna Ulrich, Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU), Wielenbach

unter Mitarbeit von:

Dr. Tobias Frische, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau; Dr. Michael Gierig, Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg; Dr. Johanna Krippner, Justus-Liebig-Universität (JLU), Gießen; Dr. Jörg Leisner (i.R.), Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

**Umwelt 
Bundesamt**

TEXTE 51/2026

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

Forschungskennzahl 3721 74 201 0
FB001921

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

von

Lennart Gehrenkemper, Umweltbundesamt (UBA),
Dessau-Roßlau; Dr. Caroline Baaske-Scholze, Landesamt
für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LLUR),
Flintbek; Dr. Runa S. Boeddinghaus, Landwirtschaftliches
Technologiezentrum (LTZ), Augustenberg; Titus Ebert,
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL),
Freising; Dr. Sandy Falk, Landesbetrieb Hessisches
Landeslabor (LHL), Gießen; Dr. Bernd Göckener,
Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und
Angewandte Oekologie (IME), Schmallenberg; Dr. Philipp
Roth, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima
Nordrhein-Westfalen (LANUK), Düsseldorf; Prof. Dr.
Thorsten Stahl, Chemisches und
Veterinäruntersuchungsamt Münsterland-Emscher-Lippe
(CVUA-MEL), Münster; Hanna Ulrich, Bayrisches
Landesamt für Umwelt (LfU), Wielenbach

unter Mitarbeit von:

Dr. Tobias Frische, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-
Roßlau; Dr. Michael Gierig, Bayrisches Landesamt für
Umwelt (LfU), Augsburg; Dr. Johanna Krippner, Justus-
Liebig-Universität (JLU), Gießen; Dr. Jörg Leisner (i.R.),
Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-
Westfalen (LANUK), Düsseldorf

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Umweltbundesamt, Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Wörlitzer Platz 1
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-8140>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

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

Kurzbeschreibung: Fachliche Ableitung von Prüfwertvorschlägen für den Wirkungspfad Bodenverunreinigung/ Altlast – Pflanze für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)

Dieser Bericht wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ 3721742010) erarbeitet. Zielstellung des Vorhabens war die fachliche Ableitung von Bodenwerten für Vertreter der Stoffgruppe der PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) gemäß Anforderungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und aktuellem Stand des Wissens. Dieser Bericht dokumentiert ausführlich die fachliche Ableitung von Prüfwert-Vorschlägen für ausgewählte PFAS für den Wirkungspfad Boden-Pflanze; die Ableitung erfolgte durch eine im Rahmen des Vorhabens eingerichtete Experten-Arbeitsgruppe. 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).

Abstract: Scientific derivation of guideline value proposals for PFAS for the soil-plant pathway

This report was prepared as an outcome of the research project “Derivation of guideline values for PFAS in soil” (FKZ 3721742010). The objective of the project was the scientific derivation of guideline values for representatives of the PFAS substance group in accordance with the requirements of the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) and the current state of knowledge. This report documents in detail the scientific derivation of guideline value proposals for selected PFAS for the soil-plant pathway; the derivation was carried out by an expert working group set up as part 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).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Vorbemerkung	13
2 Konzeption zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze	14
2.1 Nutzungs- und Schutzgutbezug bei der Beurteilung von Bodenverunreinigungen/Altlasten	14
2.2 Zusammenfassung der Konzeption der Prüf-/Maßnahmenwertableitung für den Wirkungspfad Boden/Pflanze	14
3 Auswahl der Beurteilungsmaßstäbe	15
3.1 Definition der behandelten Schadstoffgruppen	15
3.1.1 EFSA4-PFAS	15
3.1.2 Weitere PFAS	15
3.2 Ableitung/Definition höchstzulässiger PFAS-Gehalte in Pflanzen	16
3.2.1 Höchstzulässige PFAS-Gehalte in Futtermitteln	16
3.2.2 Höchstzulässige PFAS-Gehalte in pflanzlichen Lebensmitteln	17
4 Zusammenstellung und Auswertung vorliegender Boden-Pflanze-Datenpaare zur Beschreibung des Schadstofftransfers	21
4.1 Aufgestellte Kriterien für die Zusammenstellung von Boden-Pflanze-Datenpaaren	21
4.2 Auswertung der vorliegenden Boden-Pflanze-Datenpaare	26
4.3 Systematischer Ausschluss von Datensätzen	31
5 Berechnung zulässiger Bodengehalte als „rechnerische Prüfwertvorschläge“	33
5.1 EFSA4-PFAS	33
5.1.1 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze	33
5.1.2 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze	34
5.2 Weitere PFAS	35
5.2.1 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze	35
5.2.2 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze	35
6 Prüfung der rechnerischen Prüfwertvorschläge auf Plausibilität	37
6.1 Hinreichender Abstand zur PFAS-Grundbelastung	37
6.2 Sichere Bestimmbarkeit der Prüfwertvorschläge	39

6.3	Beurteilung phytotoxischer Wirkungen	40
7	Forschungsbedarf.....	41
	Quellenverzeichnis	43
	Anhang Datensätze (erarbeitet von Lennart Gehrenkemper)	47
A.1	Datensätze zur Transferbestimmung für EFSA4-PFAS	47
A.2	Datensätze zur Transferbestimmung für weitere PFAS	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Zusammenstellung der Datenpaare für PFDA in Getreidekörner mit eingezeichnetem abgeleitetem höchst zulässigem Gehalt (lila gepunktet) und berechneten Regressionsgraden (P50 grün; P80 blau).	33
-------------	--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Maximal mögliche Gehalte in Futtermitteln gemäß BfR-Stellungnahme 033/2024 (BfR, 2024).	17
Tabelle 2:	Lebensmittelgruppen gemäß EFSA <i>Comprehensive European Food Consumption Database</i> mit den entsprechenden Wasseranteilen gemäß BLS und berechneten Anteilen am Nahrungskorb, sowie täglicher Aufnahme für deutsche Kinder.	18
Tabelle 3:	<i>TDI</i> (-Äquivalente), die gemäß Ableitungsmaßstäben berücksichtigten Sicherheitsfaktoren (SF_c und SF_d) und entsprechend resultierenden Gefahrenfaktoren (F_{Gef}).	19
Tabelle 4:	Berechnete gesundheitsbasierte Referenzwerte (RW) bezogen auf Trockengewicht- (dw) Gehalte für ausgewählte Lebensmittelkategorien.	20
Tabelle 5:	Höchstzulässige Pflanzengehalte (Trockengewicht) basierend auf gesundheitsbasierten Referenzwerten und Gefahrenfaktoren.....	20
Tabelle 6:	Übersicht der Datenquellen für die Zusammenstellung von Boden-Pflanze-Datenpaaren.	23
Tabelle 7:	Kombinationen von PFAS und Lebensmittelkategorien mit als plausibel bewerteten systemischem Transferverhalten. Ausgewertete Datenbereiche der Bodengehalte in eckigen Klammern angegeben.	27
Tabelle 8:	Zusammenstellung der Transferregressionen für verfügbare Kombinationen von PFAS und Lebensmittelkategorien (P50 repräsentiert das 50. Perzentil; P80 die obere Grenze des 60%-Vertrauensintervalls um P50 und entspricht dem 80. Perzentil) und charakterisierenden Angaben (Bestimmtheitsmaß R^2 ; Anzahl Datenpaare n ; Datenquellen).	27
Tabelle 9:	Maximal mögliche Gehalte (BfR, 2024) von EFSA4-PFAS in Futtermitteln (vgl. Tabelle 1) und rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittel.	34
Tabelle 10:	Rechnerische Summen-Prüfwertvorschläge für EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze.	35

Tabelle 11:	Rechnerische Einzelstoff-Prüfwertvorschläge für weitere PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze.	35
Tabelle 12:	Gegenüberstellung rechnerische Prüfwertvorschläge EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze und EFSA4-Hintergrundwerte für den ländlichen Raum.	38
Tabelle 13:	Gegenüberstellung rechnerische Prüfwertvorschläge weiterer PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze und PFAS-Hintergrundwerte für den ländlichen Raum.	39

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ad hoc-AG	ad hoc-Arbeitsgemeinschaft „PFAS-Prüfwerte / Boden-Pflanze“
AOF	Adsorbierbares, organisch gebundenes Fluor
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BLS	Bundeslebensmittelschlüssel (Version 3.02, Stand 09/2024)
bw	Körpergewicht (<i>body weight</i>)
8:2 diPAP	Fluortelomerphosphatdiester mit 8 perfluorierten und 2 nicht-fluorierten C-Atomen je Kohlenstoffkette
dw	Trockengewicht (<i>dry weight</i>)
EFSA	European Food Safety Authority
EFSA4-PFAS	PFHxS, PFOA, PFOS und PFNA
EOF	Extrahierbares, organisch gebundenes Fluor
EU	Europäische Union
F_{Gef}	Gefahrenfaktor
FOSA	Perfluorooctansulfonamid (längste C-Kette: C8)
IARC	Internationale Agentur für Krebsforschung der Weltgesundheitsorganisation (<i>international agency for research on cancer</i>)
MRL	Maximale Rückstandskonzentration (<i>maximum residue level</i>)
PFAS	per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen
PFBA	Perfluorbutansäure (längste C-Kette: C4)
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure (längste C-Kette: C4)
PFCA	Perfluorcarbonsäuren
PFDA	Perfluordecansäure (längste C-Kette: C10)
PFHpA	Perfluorheptansäure (längste C-Kette: C7)
PFHxA	Perfluorhexansäure (längste C-Kette: C6)
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure (längste C-Kette: C6)
PFNA	Perfluorononansäure (längste C-Kette: C9)

Abkürzung	Erläuterung
PFOA	Perfluorooctansäure (längste C-Kette: C8)
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure (längste C-Kette: C8)
PRIMo	Pestizidrückstände-Aufnahme-Modellierung der EFSA (<i>pesticide residue intake model</i>)
PFSA	Perfluorsulfonsäuren
RW	gesundheitsbasierter Referenzwert
SF_i	Sicherheitsfaktor <i>i</i>
TDI	tolerierbare tägliche Aufnahme (<i>tolerable daily intake</i>)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UBA	Umweltbundesamt
ww	Frischgewicht (<i>wet weight</i>)

Zusammenfassung

Der hier vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse der ad hoc-Arbeitsgemeinschaft (ad hoc-AG) zur Ableitung von Prüfwertvorschlägen für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Wirkungspfad Boden-Pflanze. Die ad hoc-AG hat sich über insgesamt 10 Sitzungen (digital oder hybrid) mit der Schadstoffgruppe PFAS, dem Transfer ausgewählter PFAS vom Boden in Lebensmittel- und Futtermittelpflanzen, möglichen Referenzwerten für höchstzulässige Gehalte von PFAS in Pflanzen, der rechnerischen Ableitung von Prüfwertvorschlägen, sowie Hintergrundwerten für PFAS in deutschen Oberböden des ländlichen Raums beschäftigt. Dabei konnte die ad hoc-AG Prüfwertvorschläge für ausgewählte PFAS im Wirkungspfad Boden-Futtermittel und im Wirkungspfad Boden-Lebensmittel ableiten. Auf Grund des sich noch entwickelnden Wissenstandes über PFAS und u.a. ihrem Verhalten in Boden-Pflanze-Systemen mussten einige Näherungen und Annahmen getroffen werden. Zeitgleich sieht die ad hoc-AG das Setzen von Näherungen und Annahmen als geboten angesichts der zunehmenden Anzahl von PFAS-Befunden in deutschen Böden, um die Basis für eine einheitliche Bewertung von PFAS in den Wirkungspfaden Boden-Pflanze zu ermöglichen.

Tabelle: Prüfwertvorschläge für EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze

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

Tabelle: Prüfwertvorschläge für weitere PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze

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

1 Vorbemerkung

Auf der 87. Umweltministerkonferenz am 02.12.2016 in Berlin wurde der Beschluss gefasst, Bodenwerte (Prüf- und Maßnahmenwerte gemäß der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)) für die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylverbindungen zu erarbeiten. Die novellierte BBodSchV von 2021 beinhaltet für sieben Einzelstoffe aus der Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser. Am Umweltbundesamt (UBA) wurde ein Eigenforschungsvorhaben „Ableitung von Bodenwerten für PFAS“ (FKZ: 3721742010) durchgeführt, um die Prüfwerte für die weiteren Wirkungspfade zu erarbeiten und die Liste der PFAS mit bestehenden Prüfwerten zu überprüfen. Das Forschungsvorhaben sollte die fachlichen Grundlagen für eine zukünftige Festlegung der notwendigen Bodenwerte erarbeiten. Zur Erarbeitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze wurde eine ad hoc-Arbeitsgemeinschaft „PFAS-Prüfwerte / Boden-Pflanze“ (im Folgenden kurz „ad hoc-AG“) als Begleitung dieses Aspektes des Forschungsvorhabens, sowie zur Diskussion und zum Beschluss von fachlichen Prüfwertvorschlägen gegründet. Die ad hoc-AG setzte sich zusammen aus Vertreter*innen von Landes- und Bundesbehörden und von Universitäten und Forschungseinrichtungen. Geleitet wurden die ad hoc-AG-Sitzungen von einem der UBA-internen Forschungsnehmer.

Über zehn Sitzungen hat die ad hoc-AG vier Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze und sechs Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze abgeleitet. Die Ableitung dieser Prüfwerte ist in diesem Abschlussbericht dokumentiert.

2 Konzeption zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze

2.1 Nutzungs- und Schutzgutbezug bei der Beurteilung von Bodenverunreinigungen/Altlasten

Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) sieht Prüf- und Maßnahmenwerte zur Beurteilung von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten unter Berücksichtigung der Bodennutzung vor. Hierbei soll auch der Wirkungspfad Boden-Pflanze beurteilt werden.

Prüfwerte: Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegen (BBodSchG §8(1)1).

Maßnahmenwerte: Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind (BBodSchG §8(1)2).

Die Prüf- und Maßnahmenwerte sind in der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) Anlage 2 zusammengefasst. Für Schadstoffe, für die keine Prüf- oder Maßnahmenwerte verordnet sind, ist nach §15(4) BBodSchV bei der Bewertung dieser Schadstoffe auf die Methoden und Maßstäbe zurückzugreifen, die zur Ableitung der verordneten Prüf- und Maßnahmenwerten herangezogen worden sind. Diese sind im Bundesanzeiger Nummer 161a vom 28. August 1999 veröffentlicht und werden im Folgenden als „Ableitungsmaßstäbe“ bezeichnet (BMU, 1999).

Gemeinsam mit der ursprünglichen Veröffentlichung zum Wirkungspfad Boden-Pflanze¹ von 1998 (König und Utermann, 1998) dienen die „Ableitungsmaßstäbe“ der ad hoc-AG als Leitfaden für die Ableitung der fachlichen Prüfwertvorschläge.

2.2 Zusammenfassung der Konzeption der Prüf-/Maßnahmenwertableitung für den Wirkungspfad Boden/Pflanze

1. Definition der behandelten Schadstoffgruppen
2. Ableitung/Definition höchstzulässiger PFAS-Gehalte in Pflanzen
3. Zusammenstellung und Auswertung vorliegender Boden-Pflanze-Datenpaare zur Beschreibung des Schadstofftransfers
4. Berechnung zulässiger Bodengehalte als „rechnerische Prüfwertvorschläge“
5. Prüfung der rechnerischen Prüfwertvorschläge auf Plausibilität

¹ ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Hrsg. W. König, J. Utermann) Beitrag 9009 „Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze – ad-hoc AG „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ des AK „Bodenbelastung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)“

3 Auswahl der Beurteilungsmaßstäbe

3.1 Definition der behandelten Schadstoffgruppen

Die Gruppe der PFAS stellt eine Schadstoffgruppe dar, die derzeit erhöhte Aufmerksamkeit durch Wissenschaft und Öffentlichkeit erfährt. Unter dem Akronym PFAS werden über 10.000 Einzelsubstanzen subsumiert, die das gemeinsame Strukturmotiv mindestens einer perfluorierten Methylengruppe (R-CF₂-R') enthält, an welche nicht direkt ein Wasserstoff, Chlor, Brom oder Iod gebunden ist (OECD, 2021). Dieses Strukturmotiv ist Hauptgrund für die der Substanzklasse gemeinsamen physikochemischen Eigenschaften, die sie für zahlreiche technische Anwendungen vorteilhaft machen, aber zeitgleich in toxikologischen, wie auch in Umweltschutz-Aspekten zu Bedenken führen. Auf Grund der großen Anzahl an subsumierten Einzelsubstanzen ergibt sich eine sehr heterogene Situation, was den Wissensstand und demzufolge die Bewertung und Regulierung der einzelnen Substanzen betrifft. Momentan liegen nur für ausgewählte PFAS ausreichend Informationen vor, um eine Bewertung mit Prüf- oder Maßnahmenwerten durchzuführen. Diese werden im Folgenden in die Gruppen „EFSA4-PFAS“ sowie „weitere PFAS“ eingeteilt und getrennt behandelt.

3.1.1 EFSA4-PFAS

Für die Verbindungen Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS), Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und Perfluornonansäure (PFNA) liegt eine gemeinsame toxikologische Bewertung aus 2020 von der *European Food Safety Authority* (EFSA) vor [EFSA CONTAM Panel, 2020].² Dieser gemeinsamen Bewertung zu Folge haben die vier zuvor genannten PFAS (im Folgenden als „EFSA4-PFAS“ zusammengefasst) den überwiegenden Anteil an der externen wie internen humanen PFAS-Belastung und ebenso an den durch PFAS verursachten adversen Effekten. Näheres zur Bewertung der EFSA4-PFAS findet sich unter Kapitel b.

Als solche finden sie Eingang in die aktuelle europäische bzw. deutsche Gesetzgebung (vgl. Verordnung (EU) 2023/915 zu Höchstgehalten an PFAS in Lebensmitteln oder deutsche Trinkwasserverordnung (TrinkwV)).

Die EFSA4-PFAS weisen neben der gemeinsamen, konsentierten toxikologischen Bewertung eine Relevanz für den Bodenschutz auf. So werden sie ubiquitär in deutschen Oberböden im ländlichen Raum nachgewiesen (Umweltbundesamt, Fachgebiet II 2.6, Schmidt et al. in Vorbereitung). Weltweit sind zudem zahlreiche schädliche Bodenveränderungen durch Vertreter der EFSA4-PFAS dokumentiert.

Für diese PFAS liegen hinreichend viele Boden-Pflanze-Datenpaare vor, um einen systemischen Transfer aus Bodenverunreinigungen/Altlasten in pflanzliche Lebensmittel plausibel darzustellen.

3.1.2 Weitere PFAS

Die EFSA4-PFAS stellen wahrscheinlich die bestuntersuchten Vertreter der Gruppe der PFAS dar. Dennoch sind auch für einige weitere PFAS ausreichend Informationen vorhanden, um eine Bewertung im Sinne von Prüf- und Maßnahmenwerten durchzuführen. Die Heterogenität der bekannten PFAS-Schadensfälle macht es notwendig, die Bewertung von PFAS so breit wie möglich anzugehen, um eine bundeseinheitliche Beurteilung zu ermöglichen und

² Dabei stehen die genannten Säuren nominell stellvertretend für die entsprechenden Säuren und ihre Salze: Mit PFOA ist also sowohl die Perfluoroctansäure (C₇F₁₅COOH) als auch bspw. das Natrium-Salz (Na⁺C₇F₁₅COO⁻) und alle weiteren Salze gemeint.

Handlungsfähigkeit bei den Behörden herzustellen. Die ad hoc-AG kommt zu dem Ergebnis, dass beim Wirkungspfad Boden-Pflanze neben den EFSA4-PFAS eine solche Bewertung aufgrund der vorliegenden Informationen für die folgenden fünf weiteren PFAS möglich ist:

Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorbutansulfonsäure (PFBS), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorheptansäure (PFHpA) und Perfluordecansäure (PFDA).³

Die Auswahl der genannten Substanzen basiert ausschließlich auf der Verfügbarkeit von sowohl lebensmittelrechtlichen Richtwerten für diese Substanzen oder abgeleiteten toxikologischen Bewertungen dieser Substanzen, um einen gesundheitsbasierten Referenzwert aufstellen zu können, als auch auf hinreichend vielen Boden-Pflanze-Datenpaaren, um einen systemischen Transfer aus Bodenverunreinigungen/Altlasten in pflanzliche Lebensmittel plausibel darzustellen.

Alle genannten PFAS werden regelmäßig in deutschen Oberböden im ländlichen Raum nachgewiesen und sind aus PFAS-Schadensfällen bekannt. Zudem sind sie u.a. in der TrinkwV reguliert und teilweise unter REACH als persistente, bioakkumulierende und toxische Stoffe (PBT-Stoffe) beschränkt (bspw. PFBS und PFDA) (ECHA, 2025).

3.2 Ableitung/Definition höchstzulässiger PFAS-Gehalte in Pflanzen

3.2.1 Höchstzulässige PFAS-Gehalte in Futtermitteln

Derzeit liegen für PFAS keine festgelegten futtermittelrechtlichen Höchstgehalte vor. Jedoch ist der Transfer von PFAS aus Futtermitteln in tierische Lebensmittel gut beschrieben (Mikkonen et al., 2023) und es bestehen lebensmittelrechtliche Höchstgehalte für tierische Produkte (vgl. Verordnung (EU) 2022/2388). Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) hat maximal mögliche Gehalte für Alleinfuttermittel empfohlen, bei deren Einhaltung eine Überschreitung der verordneten Höchstgehalte in tierischen Lebensmitteln als „eher unwahrscheinlich“ eingestuft wurden (vgl. BfR, 2024). Diese maximal möglichen Gehalte wurden für die EFSA4-PFAS jeweils einzeln modelliert. Sie können demnach für Futtermittel als höchstzulässige Gehalte zur Ableitung von Einzelsubstanzprüfwerten für PFHxS, PFOA, PFOS und PFNA verwendet werden. Die abgeleiteten Werte sind in **Tabelle 1** zusammengestellt und der jeweils sensitivste Wert⁴ ist fett hervorgehoben.

Für weitere PFAS können derzeit keine höchstzulässigen Gehalte in Futtermitteln abgeleitet oder definiert werden.

³ Dabei stehen die genannten Säuren nominell stellvertretend für die entsprechenden Säuren und ihre Salze: Mit PFBA ist also sowohl die Perfluorbutansäure (C₃F₇COOH) als auch bspw. das Natrium-Salz (Na⁺C₃F₇COO⁻) und alle weiteren Salze gemeint.

⁴ Wurden für unterschiedliche Verwendungen des Futters unterschiedliche Werte abgeleitet, so ist der betragsniedrigste Wert der sensitivste.

Tabelle 1: Maximal mögliche Gehalte in Futtermitteln gemäß BfR-Stellungnahme 033/2024 (BfR, 2024).

Nutztier	PFHxS [$\mu\text{g}/\text{kg dw}$]	PFOA [$\mu\text{g}/\text{kg dw}$]	PFOS [$\mu\text{g}/\text{kg dw}$]	PFNA [$\mu\text{g}/\text{kg dw}$]
Legehennen	0,17	0,25	0,42	0,29
Mastrind	1,00	k.A.	0,14	k.A.
Schaf	k.A.	k.A.	0,21	k.A.
Mastschwein	0,06	0,05	0,07	k.A.
Milchkuh	3,7	6,5	0,07	k.A.

Der jeweils sensitivste Gehalt ist fett hervorgehoben; Werte bezogen auf Trockengewichte der jeweiligen Futtermittel; k. A. = keine Angabe.

3.2.2 Höchstzulässige PFAS-Gehalte in pflanzlichen Lebensmitteln

Im Hinblick auf die „Vermarktungsfähigkeit von Lebensmitteln“ (BMU, 1999) liegen derzeit für PFAS keine festgelegten lebensmittelrechtlichen Höchstgehalte für pflanzliche Lebensmittel vor. Für die EFSA4-PFAS wurden von der EU-Kommission 2022 Richtwerte in pflanzlichen Lebensmitteln empfohlen, bei deren Überschreiten die Ursache der Kontamination untersucht werden soll (Europäische Kommission, 2022a).

Im Hinblick auf den „Ausschluss von humantoxische[n] Wirkungen beim Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln, insbesondere von Weizen, Kartoffeln und Gemüse“ (BMU, 1999) können mit entsprechenden humantoxikologischen Bewertungen und über statistische Untersuchungen zur Ernährung in Deutschland gesundheitsbasierte Referenzwerte (RW) berechnet werden. In Verbindung mit Gefahrenfaktoren können so höchstzulässige Gehalte in pflanzlichen Lebensmitteln sowohl für die EFSA4-PFAS als Summenwert, als auch für die weiteren PFAS als Einzelwerte abgeleitet werden. Die Verwendung von Gefahrenfaktoren erfolgt dabei analog zur Prüfwertableitung im Wirkungspfad Boden-Mensch (BMU, 1999). Die verwendeten Gefahrenfaktoren finden sich in Tabelle 3.

Bei der Berechnung der RW wurde sich eng an der Berechnung von maximalen Rückstandsgehalten (Maximum Residue Level, *MRL*) mit den Annahmen entsprechend der Berechnung bei Pflanzenschutzmitteln orientiert, wie sie für Pestizidrückstände durchgeführt wird und von der EFSA veröffentlicht ist (vgl. EFSA PRIMo). Um Konsistenz mit der Ableitung von Trinkwasserwerten herzustellen, wurde die dort angegebene Standard-Allokation (Aufteilung eines humantoxikologischen Beurteilungswertes zu 10% auf Trinkwasser, zu 90% auf Lebensmittel und zu 1% auf Luft) in die Berechnung aufgenommen.

$$\begin{aligned}
 RW(\text{PFAS}; i) \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{kg ww}} \right] \\
 = \frac{TDI \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{kg bw d}} \right] \cdot \text{Allokationsfaktor} \cdot bw [\text{kg}] \cdot \text{Anteil}(i)_{\text{Nahrungskorb}}}{\text{tägliche Aufnahme}(i) \left[\frac{\text{kg}}{\text{d ww}} \right]} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Die benötigten Größen „Anteil am Nahrungskorb“ und „tägliche Aufnahme“ wurden je Lebensmittelkategorie der „EFSA Comprehensive European Food Consumption Database“ entnommen (jeweils entsprechende Werte für Deutschland) (EFSA, 2024). Ebenfalls aus dieser Datenbank wurde das Körpergewicht (bw) von 16,2 kg für ein 4–6-jährige Mädchen übernommen. Auch diese Annahme bezüglich der empfindlichsten Bevölkerungsgruppe wurde aus der *MRL*-Berechnung übernommen. Die verwendeten Lebensmittelgruppen und ihre Anteile am Nahrungskorb, sowie die tägliche Aufnahme sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Zur Ableitung von Prüfwertvorschlägen wurden Pflanzengehalte bezogen auf das Trockengewicht verwendet. Die Berechnungen der RW basierte auf Frischgewicht-Angaben. Für die Umrechnung von Frischgewicht (ww)-Gehalten in Trockengewicht (dw)-Gehalte wurden die Wasseranteile je Lebensmittelkategorie dem Bundeslebensmittelschlüssel (BLS), Version 3.02, Stand 2024 verwendet (BLS, 2024). Der BLS weist eine umfangreichere Datenbasis auf, erfasst direkt neben einzelnen Produkten auch die Lebensmittelkategorien entsprechend der verwendeten EFSA „Comprehensive European Food Consumption Database“ und die erhobenen Werte stammen u.a. aus Untersuchungsämtern Landeslaboren der deutschen Bundesländer, womit eine hohe Einheitlichkeit der durchgeführten Analysen zu erwarten war. Dieser wurde als Standardinstrument zur Auswertung von bspw. ernährungsepidemiologischen Studie in Deutschland entwickelt. Damit qualifizierte sich der BLS gegenüber anderen verfügbaren Quellen wie der Souci-Fachmann-Kraut-Datenbank. Die verwendeten Wassergehalte sind in Tabelle 2 den entsprechenden Lebensmittelgruppen zugeordnet.

Tabelle 2: Lebensmittelgruppen gemäß EFSA *Comprehensive European Food Consumption Database* mit den entsprechenden Wasseranteilen gemäß BLS und berechneten Anteilen am Nahrungskorb, sowie täglicher Aufnahme für deutsche Kinder.

Lebensmittelgruppe	Lebensmittel (Auswahl)	Wasseranteil [%]	Anteil am Nahrungskorb Kind	Tägliche Aufnahme Kind [(kg ww)/ d]
Knollen- und Wurzelgemüse	Karotten, Knollensellerie, Pastinake, Radieschen, Rettich, Rübe, Schwarzwurzel	88,0	0,0617	0,0612
Kartoffeln		79,6	0,0426	0,0423
Fruchtgemüse	Aubergine, Gurke, Kürbis, Paprika, Tomate, Zucchini	95,6	0,0369	0,0366
Blattgemüse	Bleichsellerie, Chicorée, Kopfsalat, Mangold, Spinat	92,0	0,0078	0,0078
Getreide	Gerste, Hafer, Triticale, Weizen	12,1	0,0927	0,0920

Als toxikologische Bezugsgröße für die EFSA4-PFAS wurde die von der EFSA modellierte tolerierbare tägliche Aufnahme (*TDI*) verwendet. Dieser gibt an, welche Menge an EFSA4-PFAS bei täglicher Aufnahme auch für die sensibelste Gruppe nach Modellierung keinen negativen Effekt auslöst. Er beträgt 0,63 ng/(kg *bw* · d) (EFSA CONTAM Panel, 2020). Der EFSA4-TDI wurde auch vom BfR in der Stellungnahme 020/2021 für die Bewertung von Lebensmitteln empfohlen (BfR, 2021).

Mit diesen Annahmen ergab sich durch die enthaltene Normierung auf Nahrungskorbanteil und tägliche Aufnahme für die maximalen Frischgewichtgehalte der betragsgleiche Wert je Lebensmittelkategorie nach Formel (1) für die RW rechnerisch 0,0093 µg/(kg *ww*). Dieser Wert liegt in der Größenordnung der durch die EU-Kommission empfohlenen Richtwerte zur Überwachung von PFAS in Lebensmitteln (Europäische Kommission, 2022a), bei deren Überschreitung die Ursache der Kontamination untersucht werden sollte. Die berechneten Werte sind in **Tabelle 4** zusammengefasst. Dabei sind Kartoffeln auf Grund ihres signifikant anderen Wassergehalts gesondert von Knollen- und Wurzelgemüsen aufgeführt (BLS, 2024).

Als toxikologische Bezugsgröße für die weiteren PFAS wurden die entsprechenden *TDIs* oder *TDI*-Äquivalente verwendet, wie sie von der deutschen Trinkwasserkommission zur Berechnung der neuen Trinkwasser-Leitwerte verwendet wurden. In der Empfehlung des Umweltbundesamtes „Bewertung der PFAS-20 aus der Trinkwasserverordnung“ vom 14. Juni 2024 wurden die in **Tabelle 3** zusammengefassten *TDIs* veröffentlicht. Für diese *TDIs* liegt derzeit keine Empfehlung des BfRs vor, sie für die Bewertung von anderen Lebensmitteln zu verwenden. Eine Übertragbarkeit vom Trinkwasser auf andere Lebensmittel scheint aber plausibel und wurde folgend angenommen.

Tabelle 3: *TDI*(-Äquivalente), die gemäß Ableitungsmaßstäben berücksichtigten Sicherheitsfaktoren (SF_c und SF_d) und entsprechend resultierenden Gefahrenfaktoren (F_{Gef}).

PFAS	<i>TDI</i> (-Äquivalent) [ng/(kg·d)]	SF_c	SF_d	F_{Gef}
PFBA	3000 ¹	2,5	10	5
PFHxA	1840 ¹	2,5	10	5
PFHpA	80 ¹	2,5	10	5
PFDA	10 ¹	2,5	10	5
PFBS	1640 ¹	2,5	10	5
ΣEFSA4-PFAS	0,63 ²			2

Entnommen aus ¹) UBA 2024 (inkl. Referenz darin: UBA 2016); ²) EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain 2020. SF_c – zur Überbrückung der zwischenartlichen Varianz zwischen Mensch und Versuchstier; SF_d - zur Überbrückung der innerartlichen Varianz beim Menschen.

Auf Basis der in **Tabelle 3** aufgeführten Werte wurden die in **Tabelle 4** zusammengefassten RWs bezogen auf das Trockengewicht der jeweiligen Lebensmittelkategorie erhalten. Auch hier sind Kartoffeln auf Grund ihres signifikant anderen Wassergehalts gesondert von Knollen- und Wurzelgemüsen aufgeführt.

Tabelle 4: Berechnete gesundheitsbasierte Referenzwerte (RW) bezogen auf Trockengewicht- (dw) Gehalte für ausgewählte Lebensmittelkategorien.

Lebensmittelkategorie	RW EFSA4-PFAS [µg/(kg dw)]	RW PFBA [µg/(kg dw)]	RW PFHxA [µg/(kg dw)]	RW PFHpA [µg/(kg dw)]	RW PFDA [µg/(kg dw)]	RW PFBS [µg/(kg dw)]
Knollen- und Wurzelgemüse	0,077	367,2	225,2	9,791	1,224	200,7
Kartoffeln	0,045	216,0	132,5	5,759	0,720	118,1
Fruchtgemüse	0,210	1001	614,2	26,703	3,338	547,4
Blattgemüse	0,116	550,7	337,8	14,69	1,836	301,1
Getreide	0,011	50,12	30,74	1,337	0,167	27,40

Unter Berücksichtigung der Gefahrenfaktoren (Tabelle 3) wurden basierend auf den gesundheitsbasierten Referenzwerten (Tabelle 4) als höchstzulässige PFAS-Gehalte in pflanzlichen Lebensmitteln (*dw*) die in Tabelle 5 zusammengestellten Werte abgeleitet.

Tabelle 5: Höchstzulässige Pflanzengehalte (Trockengewicht) basierend auf gesundheitsbasierten Referenzwerten und Gefahrenfaktoren.

Lebensmittelkategorie	Höchstzulässiger EFSA4-PFAS-Gehalt [µg/kg dw]	Höchstzulässiger PFBA-Gehalt [µg/kg dw]	Höchstzulässiger PFHxA-Gehalt [µg/kg dw]	Höchstzulässiger PFHpA-Gehalt [µg/kg dw]	Höchstzulässiger PFDA-Gehalt [µg/kg dw]	Höchstzulässiger PFBS-Gehalt [µg/kg dw]
Knollen- und Wurzelgemüse	0,1542	1836	1126	48,96	6,119	1004
Kartoffeln	0,0907	1080	662,3	28,80	3,600	590,3
Fruchtgemüse	0,4206	5007	3071	133,5	16,69	2737
Blattgemüse	0,2313	2754	1689	73,43	9,179	1505
Getreide	0,0211	250,6	153,7	6,683	0,835	137,0

4 Zusammenstellung und Auswertung vorliegender Boden-Pflanze-Datenpaare zur Beschreibung des Schadstofftransfers

4.1 Aufgestellte Kriterien für die Zusammenstellung von Boden-Pflanze-Datenpaaren

Derzeit existiert keine systematische Erfassung von PFAS-Pflanzengehalten und korrespondierenden Bodengehalten mit Zusammenstellung in einer zentralen Datenbank. Eine quantitative Analyse von PFAS-Feststoffgehalten in der Größenordnung von unbelasteten/niedrig belasteten Böden ist erst seit wenigen Jahren möglich. Gemäß den „Ableitungsmaßstäben“ soll der Transfer aus der Korrelation von logarithmierten Pflanzengehalten zu logarithmierten Bodengehalten daher abgeschätzt werden. Dabei sollen Datensätze entfernt werden, „die aus mit künstlicher Schadstoffbelastung des Bodens (insbesondere durch Zusatz von wasserlöslichen Schwermetallsalzen) und/oder aus Gefäßversuchen stammen.“ Stattdessen soll sich auf realistische Freilanduntersuchungen beschränkt werden (BMU, 1999).

Bei den hier betrachteten PFAS handelt es sich ausschließlich um anthropogene Substanzen und jede Schadstoffbelastung des Bodens ist als „**künstlich**“ zu bewerten. Ein Ausschluss aller künstlichen Schadstoffbelastungen wurde daher von der ad hoc-AG als nicht umsetzbar abgelehnt. Insbesondere beim Transfer von Schwermetallen von Bodenbelastungen in Pflanzen ist die applizierte/vorliegende Spezies des Schadstoffs von hoher Relevanz. In gelöster Form applizierte Schwermetallsalze weisen eine andere Bioverfügbarkeit auf als natürliche Schwermetallvorkommen in Böden/gealterten Schwermetall-Schadensfällen. Durch Umkristallisation, Komplexierung oder Redox-Reaktionen im Boden, kann ihre Bioverfügbarkeit stark beeinflusst werden. Für PFAS sind solche Prozesse allerdings nicht bekannt. In einer sechsmonatigen Studie von Knight et al. 2021 konnte für PFOA keine Veränderung der Bioverfügbarkeit beobachtet werden (Knight et al., 2021). Aus diesen Gründen wurden bei der Zusammenstellung der Datensätze keine Applikationsvarianten per se ausgeschlossen. In der Auswertung der Daten wurde jedoch auf ein systematisch anderes Verhalten im Transfer bei Dotierungsversuchen geachtet und das Einfließen von Datensätzen aus Dotierungsversuchen falls vorhanden kenntlich gemacht.

Bei **Gefäßversuchen** liegt ein größeres Wurzel-zu-Boden-Verhältnis vor als in Freilandversuchen. Für verschiedene Schadstoffgruppen ist bekannt, dass dies bei Gefäßversuchen zu höheren Transferfaktoren führen kann als bei vergleichbarem Versuchsaufbau in Freilandversuchen (Herrchen et al., 2006; Rommel et al., 1998). Auch für PFAS wird dieses Phänomen in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben, wenn auch nicht konsistent und in unterschiedlicher Ausprägung (Pancras et al., 2024; Blaine et al., 2013). Auf Grund der geringen Datenlage konnte nicht auf die Verwendung von Datensätzen aus Gefäßversuchen verzichtet werden. Der Umfang ihres Einfließens wird zur Transparenz an entsprechender Stelle kenntlich gemacht. Für eine zukünftige Validierung der im Folgenden beschriebenen Transferregressionen empfiehlt die ad hoc-AG die Erhebung von Boden-Pflanze-Datenpaaren im Bereich von PFAS-Bodengehalten zwischen 0,1 µg/kg Boden und 10 µg/kg Boden im Freiland.

In die Zusammenstellung der Datenpaare gingen nur Datensätze ein, bei denen organische Extraktionsverfahren zur Bestimmung der PFAS-Bodengehalte verwendet wurden, die näherungsweise als **PFAS-Feststoffgehalt** angesehen werden können. Datensätze mit PFAS-

Konzentration im Boden-Eluat als Boden-Parameter wurden separat betrachtet und nach Auswertung ausgeschlossen, da keine plausiblen Korrelationen zwischen PFAS-Pflanzengehalt und PFAS-Konzentration im Eluat ermittelt werden konnte.

Datenpaare, bei denen mindestens ein Parameter kleiner der angegebenen Bestimmungsgrenze war, oder aus einem Nominalwert (umgerechnet aus applizierter PFAS-Menge) bestand, wurden aus den Datensätzen entfernt, sodass nur Daten eingegangen sind, die auf Messungen beruhen.

Als Datengrundlage dienten ein vorausgegangenes UBA-Forschungsprojekt (Scheurer et al., 2022), sowie wissenschaftliche Artikel, die bis Q2 2024 veröffentlicht waren und eine Datenabfrage bei Umweltämtern, sowie innerhalb der ad hoc-AG. Die verwendeten Quellen sind in **Tabelle 6** charakterisiert. Insgesamt konnten mit diesen Kriterien ca. 2000 Datenpaare zusammengetragen werden, die sich auf 13 Lebensmittelkategorien und 27 PFAS aufteilen. An diesen haben Datenpunkte aus Dotierungsversuche einen Anteil von 30% und Datenpunkte aus Gefäßversuchen einen Anteil von 33%. Entsprechend entstammen 67% der Datenpunkte aus Freiland-Untersuchungen. Bei den 70% Datenpunkte ohne Dotierung von PFAS reichen die PFAS-Quellen von Klärschlammbeaufschlagung, über Bewässerung mit PFAS-haltigen Wässern bis zu unbekanntem Ursprung bspw. durch Deposition.

Tabelle 6: Übersicht der Datenquellen für die Zusammenstellung von Boden-Pflanze-Datenpaaren.

Quelle	Titel	Pflanzenspezies	Setup	Applikation	PFAS-Spezies	Max. LOQ Boden [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]
Bao et al. 2020	Bioaccumulation of perfluoroalkyl substances in greenhouse vegetables with long-term groundwater irrigation near fluorochemical plants in Fuxin, China	Tomate; Gurke	Gefäßversuche	Bewässerung; Deposition	PFCA (C4-C8); PFSA (C4, C6, C8)	0,1
Bizkarguenaga et al. 2016a	Uptake of 8:2 perfluoroalkyl phosphate diester and its degradation products by carrot and lettuce from compost-amended soil	Gartensalat; Karotte	Gefäßversuche	Kompost	PFCA C4-9; 7:3 FTCA, 8:2 diPAP	1,9
Bizkarguenaga et al. 2016b	Uptake of perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonate and perfluorooctane sulfonamide by carrot and lettuce from compost amended soil	Gartensalat; Karotte	Gefäßversuche	Kompost	PFOA; PFOS; FOSA	3,7
Blaine et al. 2013	Uptake of Perfluoroalkyl Acids into Edible Crops via Land Applied Biosolids: Field and Greenhouse Studies	Gartensalat; Tomate	Gefäßversuche; Freilandversuche	Klärschlamm	PFCA (C4-C10); PFSA (C4, C6, C7, C8, C10)	0,5
Blaine et al. 2014	Perfluoroalkyl Acid Distribution in Various Plant Compartments of Edible Crops Grown in Biosolids-Amended soils	Radieschen; Sellerie; Tomate; Zuckererbsen	Gefäßversuche	Klärschlamm	PFCA (C4-C10); PFSA (C4, C6, C8)	0,71
Felizeter et al., 2021	Uptake of perfluorinated alkyl acids by crops: results from a field study	Radieschen; Gartensalat; Mais; Erbsen	Freiland	Dotierung	PFCA (C4-C14); PFSA (C4, C8)	0,105
Scheurer et al. 2022	UBA-Forschungsprojekt (FKZ: 3718 74 210 0)	Sommerweizen; Soja	Gefäßversuche	Dotierung	PFCA (C4-C10); PFSA (C4, C6, C8)	1
Gredelje et al. 2020	Uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAA) in red chicory (<i>Cichorium intybus</i> L.) under various treatments with pre-contaminated soil and irrigation water	Chicorée	Gefäßversuch	Bewässerung; Deposition	PFCA (C4-C10); PFSA (C4, C8)	10

Quelle	Titel	Pflanzenspezies	Setup	Applikation	PFAS-Spezies	Max. LOQ Boden [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]
Lasee et al. 2019	Plant Uptake of Per- and Polyfluoroalkyl Acids under a Maximum Bioavailability Scenario	Radieschen; Karotten	Gefäßversuche	Dotierung	PFCA (C7, C8, C9); PFSA (C4, C6, C8)	38,3
Lechner & Knapp, 2011	Carryover of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) from Soil to Plant and Distribution to the Different Plant Compartments Studied in Cultures of Carrots (<i>Daucus carota</i> ssp. sativus), Potatoes (<i>Solanum tuberosum</i>), and Cucumbers (<i>Cucumis sativus</i>)	Karotte; Kartoffel; Gurke	Gefäßversuche	Klärschlamm	PFOA; PFOS	0,8
Liu et al., 2017	Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China	Weizen; Mais	Freiland	Bewässerung; Deposition	PFCA (C4-C12); PFSA (C4; C6; C8)	0,04
Liu et al., 2019	Multiple crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl substances around a mega fluorochemical industrial park, China: Implication for planting optimization and food safety	Radieschen; Karotte; Chinakohl; Knoblauch-Schnittlauch; Salat; Winterzwiebel; Paprika; Blumenkohl; Weizen; Mais; Kürbis; Sellerie; Soja	Freiland	Bewässerung; Deposition	PFCA (C4-C12); PFSA (C4, C6, C8)	0,04
Navarro et al. 2017	Uptake of perfluoroalkyl substances and halogenated flame retardants by crop plants grown in biosolids-amended soils	Spinat; Tomate	Gefäßversuche	Klärschlamm	PFCA (C4-C12); PFSA (C4, C8)	3
Umweltbehörde	unveröffentlicht	Feldsalat; Kartoffel; Paprika; Eichblattsalat; Salat; Spargel; Tomate; Weizen; Gerste; Roggen; Triticale;	Freiland	Kompost	PFCA (C4-C12); PFSA (C4, C6, C8)	1

Quelle	Titel	Pflanzenspezies	Setup	Applikation	PFAS-Spezies	Max. LOQ Boden [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]
		Hafer; Dinkel; Grünroggen; Soja; Körnermais; Futtermais; Mais; Silomais; Topinambur				
Wen et al. 2014	Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) grown in biosolids-amended soils	Weizen	Freiland	Klärschlamm	PFCA (C4-C11, C14); PFSA (C4, C6, C8)	19,0
Wen et al. 2016	The roles of protein and lipid in the accumulation and distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in plants grown in biosolids-amended soils	Mais; Soja; Mungbohne; Radieschen; Kopfsalat; Luzerne; Weidelgras	Gefäßversuche	Klärschlamm	PFOA; PFOS	0,16

4.2 Auswertung der vorliegenden Boden-Pflanze-Datenpaare

Zur Auswertung wurden Datenpunkte differenziert nach PFAS-Substanz und nach Lebensmittelkategorie entsprechend der EFSA „*Comprehensive European Food Consumption Database*“ zusammengestellt. Die doppeltlogarithmierten (dekadischer Logarithmus sowohl für Pflanzengehalte als auch für Bodengehalt) Datenpaare wurden in Korrelation gesetzt und mittels linearer Regression entsprechend der Ableitungsmaßstäbe Transfergleichungen in Abhängigkeit von den Schadstoff-Bodengehalten bestimmt. Diese beschreiben in Näherung den Transfer der entsprechenden PFAS aus einer Bodenverunreinigung in die zum Verzehr geeigneten Pflanzenteile. Mögliche Einträge über andere Wirkungspfade als die systemische Aufnahme aus dem Boden wurden dabei vernachlässigt.

Da keine Qualitätskriterien für die Plausibilität der resultierenden Transferregressionen in den Ableitungsmaßstäben definiert waren, wurde ein Mindestwert für die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regressionen von der ad hoc-AG festgelegt:

- ▶ Bei zehn oder mehr Datenpunkten je PFAS und Lebensmittelkategorie musste R^2 größer 0,5 sein – also die Lage der Datenpunkte zu mehr als 50% durch die Regressionsgleichung beschrieben werden.
- ▶ Bei weniger als zehn Datenpunkten je PFAS und Lebensmittelkategorie aber mindestens fünf musste R^2 größer 0,8 betragen.

Durch diese Abstufung sollte anerkannt werden, dass bei starken Zusammenhängen der untersuchten Variablen (PFAS-Bodengehalt und PFAS-Pflanzengehalt), diese Zusammenhänge bereits bei kleinem Stichprobenumfang deutlich werden. Bei den Datensätzen wurde keine statistische Ausreißerbereinigung durchgeführt. Es kann durch natürliche Streuung/biologische Vielfalt, durch die unterschiedlichen Versuchsaufbauten der berücksichtigten Studien, sowie durch teilweise sehr inhomogene Verteilung der Schadstoffe in den Böden eine relativ hohe Streuung der Datenpunkte um den erwarteten systematischen Zusammenhang Bodengehalt–Pflanzengehalt erwartet werden. Dadurch können auch bei geringen R^2 (bspw. $< 0,8$) Transferbeziehungen dennoch als plausibel betrachtet werden. Für Regressionen, die o.g. Kriterien erfüllten, wurde die systemische Aufnahme der untersuchten PFAS aus dem Boden in die zum Verzehr geeigneten Pflanzenteile als hinreichend plausibel bewertet.

Nach Auswertung der verfügbaren Boden-Pflanze-Datenpaare konnten für Kombinationen aus neun PFAS und vier Lebensmittelkategorien systemische Transfers plausibel dargestellt werden. Die Kombinationen mit plausiblen systemischen Transferverhalten sind mit zugehörigem Datenbereich in **Tabelle 7** zusammengestellt. Die Liste stellt keine abschließende Aufzählung dar, sondern spiegelt den derzeitigen Wissensstand mit den (wenigen) verfügbaren Datenpaaren wider. Dass eine Lebensmittelkategorie oder ein PFAS-Vertreter nicht in der Tabelle vorkommen, ist nicht gleichzusetzen mit einem Ausschluss einer systemischen Aufnahme, auch fehlende Untersuchungen oder nicht hinreichende Bestimmungsgrenzen können hierfür Ursache sein.

Tabelle 7: Kombinationen von PFAS und Lebensmittelkategorien mit als plausibel bewerteten systemischem Transferverhalten. Ausgewertete Datenbereiche der Bodengehalte in eckigen Klammern angegeben.

Lebensmittelkategorie [Datenbereich Boden]	PFBA	PFHxA	PFHpA	PFDA	PFBS	EFSA4-PFAS
Knollen- und Wurzelgemüse	x [0,2–20 µg/kg]		x [0,01–50 µg/kg]		x [0,01–40 µg/kg]	x [0,1–1500 µg/kg]
Fruchtgemüse	x [0,3–10 µg/kg]	x [0,1–10 µg/kg]	x [0,1–10 µg/kg]		x [10–50 µg/kg]	x [0,01–800 µg/kg]
Blattgemüse	x [0,3–260 µg/kg]	x [0,1–360 µg/kg]	x [0,1–300 µg/kg]	x [0,1–5000 µg/kg]	x [0,1–350 µg/kg]	x [0,1–7000 µg/kg]
Getreide	x [0,1–40 µg/kg]	x [0,1–100 µg/kg]	x [0,01–90 µg/kg]	x [0,1–250 µg/kg]		x [0,01–650 µg/kg]

Bei leeren Felder sind sowohl eine fehlende Datengrundlage, als auch keine plausible Korrelation mögliche Gründe für die Leerstelle.

Tabelle 8 stellt die ermittelten Transferregressionen (50. und 80. Perzentil entsprechend den Ansprüchen an die Ableitung von Maßnahmen- bzw. Prüfwerten) gemeinsam mit charakterisierenden Informationen zusammen, und zwar für diejenigen verfügbaren Kombinationen aus PFAS und Lebensmittelkategorie, die die Kriterien für einen hinreichend plausiblen systemischen Transfer erfüllen.

Tabelle 8: Zusammenstellung der Transferregressionen für verfügbare Kombinationen von PFAS und Lebensmittelkategorien (P50 repräsentiert das 50. Perzentil; P80 die obere Grenze des 60%-Vertrauensintervalls um P50 und entspricht dem 80. Perzentil) und charakterisierenden Angaben (Bestimmtheitsmaß R²; Anzahl Datenpaare n; Datenquellen).

PFAS	Lebensmittelkategorie	Regressionsgleichungen	R ²	n	Datenquellen
PFBA	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFBA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 15,60 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(1,93)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,76	10	Bizkarguenaga et al., 2016b; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021
		P80: $c(\text{PFBA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 77,49 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(1,90)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$			
	Fruchtgemüse	P50: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 12,26 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(1,26)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,68	18	Liu et al., 2019; Blaine et al., 2013; Bao et al., 2020; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
		P80: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 27,65 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(1,25)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$			

PFAS	Lebensmittel-kategorie	Regressionsgleichungen	R ²	n	Datenquellen
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 104,15 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(0,92)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 349,18 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(0,91)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,68	30	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021
	Getreide	P50: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 13,79 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(0,98)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFBA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 42,30 \cdot c(\text{PFBA})_{\text{Boden}}^{(0,98)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,53	95	Scheurer et al. 2022; Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
PFHxA	Fruchtgemüse	P50: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 3,13 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(1,31)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 6,45 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(1,32)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,89	12	Liu et al., 2019; Blaine et al., 2013; Bao et al., 2020
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 25,73 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(0,75)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 64,19 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(0,74)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,75	26	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021
	Getreide	P50: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,35 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(0,63)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHxA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 3,34 \cdot c(\text{PFHxA})_{\text{Boden}}^{(0,63)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,62	98	Scheurer et al. 2022; Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
PFHpA	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFHpA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 16,58 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(1,12)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHpA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 143,8 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(1,11)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,55	15	Bizkarguenaga et al., 2016b; Liu et al., 2019; Lasee et al. 2019; Blaine et al., 2014; Felizeter et al., 2021
	Fruchtgemüse	P50: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,11 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(1,04)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 2,97 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(1,05)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,70	11	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 12,42 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(0,75)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,76	18	Lee et al., 2014; Liu et al., 2019; Blaine et al.,

PFAS	Lebensmittel-kategorie	Regressionsgleichungen	R ²	n	Datenquellen
		P80: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 33,16 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(0,74)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$			2013; Bao et al., 2020
	Getreide	P50: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,65 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(0,36)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHpA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,17 \cdot c(\text{PFHpA})_{\text{Boden}}^{(0,36)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,66	49	Scheurer et al. 2022; Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
PFOA	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFOA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,24 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,77)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 3,70 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,75)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,56	24	Lechner & Knapp, 2011; Bizkarguenaga et al., 2016b; Bizkarguenaga et al., 2016a; Liu et al., 2019; Lasee et al. 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Fruchtgemüse	P50: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,39 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,9)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,61 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,9)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,94	16	Lechner & Knapp, 2011; Liu et al., 2019; Blaine et al., 2013; Bao et al., 2020
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,45 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(1,29)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,06 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(1,29)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,89	30	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Bizkarguenaga et al., 2016b; Bizkarguenaga et al., 2016a; Liu et al., 2019; Navarro et al., 2017; Felizeter et al., 2021; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Getreide	P50: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,32 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,61)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,60 \cdot c(\text{PFOA})_{\text{Boden}}^{(0,62)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,57	56	Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
PFNA	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFNA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 10,47 \cdot c(\text{PFNA})_{\text{Boden}}^{(1,45)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFNA})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 96,56 \cdot c(\text{PFNA})_{\text{Boden}}^{(1,43)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,84	9	Bizkarguenaga et al., 2016b; Liu et al., 2019; Lasee et al. 2019; Blaine et al., 2014;

PFAS	Lebensmittel-kategorie	Regressionsgleichungen	R ²	n	Datenquellen
					Felizeter et al., 2021
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFNA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,40 \cdot c(\text{PFNA})_{\text{Boden}}^{(1,3)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFNA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,05 \cdot c(\text{PFNA})_{\text{Boden}}^{(1,29)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,95	11	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFDA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,32 \cdot c(\text{PFDA})_{\text{Boden}}^{(1,21)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFDA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,85 \cdot c(\text{PFDA})_{\text{Boden}}^{(1,2)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,90	20	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
PFDA	Getreide	P50: $c(\text{PFDA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,38 \cdot c(\text{PFDA})_{\text{Boden}}^{(0,56)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFDA})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,60 \cdot c(\text{PFDA})_{\text{Boden}}^{(0,57)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,88	12	Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFBS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 27,62 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,04)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFBS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 128,9 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,02)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,80	8	Liu et al., 2019; Lasee et al. 2019; Blaine et al., 2014; Felizeter et al., 2021
	Fruchtgemüse	P80: $c(\text{PFBS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,29 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,03)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFBS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,32 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,02)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,97	11	Blaine et al., 2013; Bao et al., 2020
PFBS	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFBS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 10,42 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,04)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFBS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 22,71 \cdot c(\text{PFBS})_{\text{Boden}}^{(1,03)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,85	27	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Felizeter et al., 2021
PFHxS	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFHxS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 2,00 \cdot c(\text{PFHxS})_{\text{Boden}}^{(1,13)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHxS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 11,74 \cdot c(\text{PFHxS})_{\text{Boden}}^{(1,12)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,87	5	Liu et al., 2019; Lasee et al. 2019; Blaine et al., 2014

PFAS	Lebensmittel-kategorie	Regressionsgleichungen	R ²	n	Datenquellen
	Fruchtgemüse	P50: $c(\text{PFHxS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,23 \cdot c(\text{PFHxS})_{\text{Boden}}^{(1,08)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFHxS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,32 \cdot c(\text{PFHxS})_{\text{Boden}}^{(1,06)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,61	11	Blaine et al., 2013; Bao et al., 2020
PFOS	Knollen- und Wurzelgemüse	P50: $c(\text{PFOS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,53 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(0,81)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOS})_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 7,41 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(0,80)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,60	31	Lechner & Knapp, 2011; Bizkarguenaga et al., 2016a; Lasee et al. 2019; Blaine et al., 2014; Wen et al., 2018; Liu et al., 2019; Felizeter et al., 2021; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Blattgemüse	P50: $c(\text{PFOS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,26 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(1,27)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,18 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(1,27)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,78	31	Gredelje et al. 2020; Blaine et al., 2013; Wen et al., 2018; Bizkarguenaga et al., 2016a; Navarro et al., 2017; Felizeter et al., 2021; Umweltbehörde (unveröffentlicht)
	Getreide	P50: $c(\text{PFOS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 0,41 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(0,53)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$ P80: $c(\text{PFOS})_{\text{Pflanze}} [\mu\text{g}/\text{kg}] = 1,00 \cdot c(\text{PFOS})_{\text{Boden}}^{(0,54)} [\mu\text{g}/\text{kg}]$	0,63	31	Wen et al., 2014; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019; Umweltbehörde (unveröffentlicht)

4.3 Systematischer Ausschluss von Datensätzen

Systematische Auffälligkeiten in der Korrelation von Pflanzengehalten zu Bodengehalten wurden für drei Lebensmittelgruppen beobachtet. Folgend ist dargestellt, wie in den entsprechenden Fällen verfahren wurde.

Für **Knollen- und Wurzelgemüse** konnten signifikante Unterschiede im beobachteten Transferverhalten für geschälte und ungeschälte Kartoffeln identifiziert werden. Es ist plausibel anzunehmen, dass dieses Phänomen auch bei anderen Knollen- und Wurzelgemüsearten auftritt. Da auch ungeschälte Kartoffeln typischerweise in Deutschland verzehrt werden, sehen die Ableitungsmaßstäbe hier explizit vor, keine Unterscheidung zwischen geschälten und ungeschälten Kartoffeln vorzunehmen. Dem entsprechend wurden keine der Datensätze entfernt. Die Kriterien der ad hoc-AG zur Plausibilität der Regressionsgleichungen waren in jedem Fall mit diesem Phänomen erfüllt. Es ist anzumerken, dass die wenigen Datenpaare für ungeschälte Kartoffeln einen stärkeren Transfer von PFAS aus dem Boden in die essbaren

Pflanzenteile annehmen lassen. Eine erhöhte Exposition durch ungeschälte Kartoffeln im Vergleich zu geschälten Kartoffeln scheint plausibel.

Für **Blattgemüse** lag ein Datensatz mit nicht näher definierter Bezeichnung „Salat-Mix“ aus einer Untersuchung einer Umweltbehörde vor. Dieser zeigte ein relevant anderes Verhalten als die entsprechenden anderen Datensätze der Lebensmittelkategorie Blattgemüse. Handelsübliche Produkte mit Beschreibung „Salat-Mix“ können auch Lebensmittel aus anderen Lebensmittelkategorien (bspw. Knollen- und Wurzelgemüse) enthalten. Da diese Hypothese nicht überprüfbar war, wurde der entsprechende Datensatz aus der Zusammenstellung der Daten entfernt.

Für **Getreide** war bereits aus vorangegangenen Untersuchungen bekannt, dass verschiedene Getreidearten unterschiedliche Transferverhalten für PFAS vom Boden in die hier relevanten Pflanzensegmente „Körner“ aufweisen. Beispielsweise wird für Mais ein vergleichbar geringer Transfer in die Körner berichtet (vgl. „Leitfaden zur PFAS-Bewertung“, BMUV 2022 oder „Merkblatt für den Anbau landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen auf Flächen mit PFAS-Verunreinigungen in Mittel- und Nordbaden“, BW 2024). Es ist anzumerken, dass trotzdem ein Transfer in die restliche Mais-Pflanze in relevantem Ausmaß beobachtet werden kann. Die beschriebenen Unterschiede in der Verlagerung in das Korn durch verschiedene Getreidearten können durch die vorliegende Auswertung qualitativ bestätigt werden. Ein vergleichbares Verhalten zeigen Triticale und Weizen. Für diese beiden Getreidearten lagen für alle untersuchten PFAS ausreichend Datensätze für eine Auswertung vor. Für andere Getreidearten (außer Mais) lagen nur vereinzelte Datensätze vor. Mit den zur Verfügung stehenden Daten lässt sich vermuten, dass Weizen und Triticale gemeinsam ein *worst-case*-Szenario für den systemischen Transfer vom Boden in Getreidekörner abbilden. Die berechneten Transferregressionen für Getreide basieren ausschließlich auf Triticale- und Weizen-Datensätzen.

Sowohl für **Maiskörner** (Lebensmittel/Futtermittel) als auch für Mais-Gesamtpflanzen (Futtermittel) lagen umfangreiche Datensätze mit PFAS-Gehalten sowohl im Boden als auch in der Pflanze oberhalb der entsprechenden Bestimmungsgrenzen vor. Eine Regressionsgleichung, die die aufgestellten Kriterien erfüllte, konnte für Mais nicht ermittelt werden. Während der Transfer in die oberirdische Gesamtpflanze qualitativ als hoch bewertet wurde, scheint sich der geringe Transfer in die Maiskörner zu bestätigen.

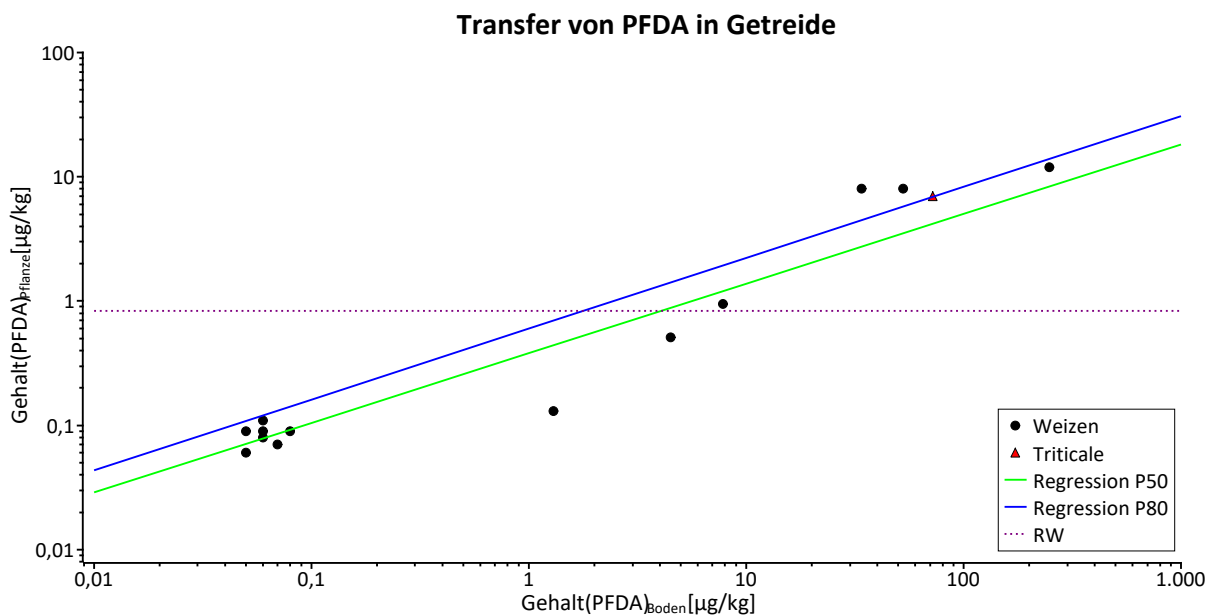
5 Berechnung zulässiger Bodengehalte als „rechnerische Prüfwertvorschläge“

Auf Grund der beschriebenen bestehenden Unsicherheiten sowohl in den höchstzulässigen Gehalten in Pflanzen als auch in den berechneten Regressionen, hat die ad hoc-AG beschlossen keine Maßnahmenwerte, sondern ausschließlich Prüfwerte vorzuschlagen. Die Plausibilität, dass ein systemischer Transfer von PFAS aus dem Boden in verzehrbare Pflanzensegmente stattfindet, bewertet die ad hoc-AG als mehr als hinreichend.

Durch Einsetzen der abgeleiteten höchstzulässigen Pflanzengehalte (im Trockengewicht) in die berechneten Regressionsgleichungen für das 80. Perzentil der entsprechenden Datensätze wurden Prüfwertvorschläge errechnet. Die Berechnung von Prüfwertvorschlägen wurde nur durchgeführt, wenn der Schnittpunkt von höchstzulässiger Pflanzenkonzentration mit der Regressionsgeraden innerhalb oder oberhalb der zugrundeliegenden Datensätze lag. Eine Extrapolation der Regressionen zu niedrigeren Gehalten wurde ausgeschlossen. Abbildung 1 stellt dies beispielhaft für PFDA und Getreide dar.

Abbildung 1 Zusammenstellung der Datenpaare für PFDA in Getreidekörnern mit eingezeichnetem abgeleitetem höchst zulässigem Gehalt (lila gepunktet) und berechneten Regressionsgraden (P50 grün; P80 blau).

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



5.1 EFSA4-PFAS

5.1.1 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze

Für Futtermittel lagen im relevanten Gehalte-Bereich um die „maximal möglichen Gehalte“ (BfR, 2024) nicht ausreichend Boden-Pflanze-Datenpaare vor, um einen Transfer der EFSA4-PFAS aussagekräftig zu bestimmen. Ein systemischer Transfer kann nicht ausgeschlossen werden. Im Sinne eines Mindesttransfers wurde zur weiteren Berechnung der Prüfwertvorschläge die

Standardannahme „unvermeidbare Verunreinigung“ aus den Ableitungsmaßstäben übernommen. Demnach wird der Pflanzengehalt um 3% des Bodengehalts korrigiert, was unvermeidbarem, äußerlich anhaftendem Bodenmaterial entspricht, welches bei Ernte und Verarbeitung in Futtermittel eingetragen wird. Dies wurde in die Transfergleichung entsprechend Formel 2 übersetzt. Damit ergaben sich zusammen mit den maximal möglichen Gehalten die rechnerisch abgeleiteten Prüfwertvorschläge entsprechend **Tabelle 9**.

$$\text{Gehalt}(PFAS; \text{Futtermittel}) \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} \text{ dw} \right] = 0,03 \cdot \text{Gehalt}(PFAS; \text{Boden}) \quad (2)$$

Tabelle 9: Maximal mögliche Gehalte (BfR, 2024) von EFSA4-PFAS in Futtermitteln (vgl. Tabelle 1) und rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittel.

Grünland- und Ackerfutter	Maximal mögliche Gehalte empfindlichstes Futtermittel nach BfR-Stellungnahme 033/2024 [$\mu\text{g}/\text{kg dw}$]	Rechnerische Prüfwertvorschläge nach Standardannahme [$\mu\text{g}/\text{kg Boden}$]
PFHxS	0,06	2,0
PFOA	0,05	1,7
PFOS	0,07	2,3
PFNA	0,29	9,7

5.1.2 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze

Mit den abgeleiteten höchstzulässigen Pflanzengehalten und der derzeitigen Datenlage konnten für drei Kombinationen von EFSA4-PFAS und Lebensmittelkategorien rechnerische Prüfwertvorschläge abgeleitet werden: Für PFHxS in Fruchtgemüse: 1,3 $\mu\text{g}/\text{kg Boden}$; für PFOS in Blattgemüse: 0,3 $\mu\text{g}/\text{kg Boden}$ und für PFNA in Blattgemüse: 0,3 $\mu\text{g}/\text{kg Boden}$. Auch für weitere Kombinationen aus EFSA4-PFAS und pflanzlichen Lebensmitteln konnten plausible Transferbeziehungen aufgestellt werden. Die zugehörigen Datensätze sind im Anhang dargestellt. Eine systemische Aufnahme von EFSA4-PFAS durch Lebensmittelpflanzen wurde als gesichert angesehen, wobei der Transfer u.a. vom betrachteten pflanzlichen Lebensmittel abhängt. Für die EFSA4-PFAS wurden ähnliche jedoch nicht identische Transferverhalten bestimmt. Um der durch die EFSA als additiv und äquipotent bewerteten toxischen Wirkung der EFSA4-PFAS gerecht zu werden (vgl. EFSA CONTAM Panel, 2020) und trotzdem einen praktikablen Prüfwert zu erhalten, wurde von der ad hoc-AG beschlossen, den Transfer der EFSA4-PFAS als näherungsweise gleich zu betrachten. Daher wurde der sensitivste Einzelwert (PFOS in Blattgemüse = 0,3 $\mu\text{g}/\text{kg Boden}$ \equiv EFSA4-PFAS in Blattgemüse) als rechnerischer Summen-Prüfwertvorschlag beschlossen.

Tabelle 10: Rechnerische Summen-Prüfwertvorschläge für EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze.

	EFSA4-PFAS [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]
Prüfwertvorschlag (sensitivstes pflanzliches Lebensmittel)	0,3 (Blattgemüse)

5.2 Weitere PFAS

5.2.1 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Futtermittelpflanze

Für weitere PFAS konnten derzeit keine höchstzulässigen Gehalte für Futtermittel abgeleitet werden.

5.2.2 Rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze

Für fünf weitere PFAS lagen ausreichend Datensätze für eine plausible Transferbestimmung, sowie toxikologisch plausible Bezugsgrößen vor, sodass für diese analog zur Ableitung der Prüfwertvorschläge für die EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze Prüfwertvorschläge berechnet wurden. Die ad hoc-AG hat für PFBA, PFHxA, PFHpA, PFDA und PFBS rechnerische Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze bestimmt. Diese sind in **Tabelle 11** zusammengestellt.

Tabelle 11: Rechnerische Einzelstoff-Prüfwertvorschläge für weitere PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze.

	PFBA [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	PFHxA [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	PFHpA [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	PFDA [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	PFBS [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]
Prüfwertvorschlag (sensitivstes pflanzliches Lebensmittel)	4,0 (Kartoffeln)	83 (Blattgemüse)	0,2 (Kartoffeln)	1,8 (Getreide)	4,4 (Kartoffeln)

Für PFBA wurde ein höchstzulässiger Gehalt von 220 $\mu\text{g}/\text{kg}$ im Frischgewicht abgeleitet. Hier konnten für Knollen- und Wurzelgemüse, Kartoffeln, Blattgemüse, Fruchtgemüse sowie für Getreide rechnerische Prüfwertvorschläge aufgestellt werden. Die Werte reichen dabei von 4,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Kartoffeln) bis 64 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Fruchtgemüse).

Für PFHxA wurde ein höchstzulässiger Gehalt von 135 $\mu\text{g}/\text{kg}$ im Frischgewicht abgeleitet. Hier konnten für Blattgemüse, für Fruchtgemüse, sowie für Getreide rechnerische Prüfwertvorschläge aufgestellt werden. Die Werte reichen dabei von 83 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Blattgemüse) bis 436 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Getreide).

Für PFHpA wurde ein höchstzulässiger Gehalt von 5,9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ im Frischgewicht abgeleitet. Hier konnten für Knollen- und Wurzelgemüse, Kartoffeln, Blattgemüse, Fruchtgemüse sowie für Getreide rechnerische Prüfwertvorschläge aufgestellt werden. Die Werte reichen dabei von 0,2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Kartoffeln) bis 127 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden (Getreide).

Für PFDA wurde ein höchstzulässiger Gehalt von 0,73 µg/kg im Frischgewicht abgeleitet. Hier konnten für Blattgemüse sowie für Getreide rechnerische Prüfwertvorschläge aufgestellt werden. Die Werte reichen dabei von 1,8 µg/kg Boden (Getreide) bis 7,2 µg/kg Boden (Blattgemüse).

Für PFBS wurde ein höchstzulässiger Gehalt von 120 µg/kg im Frischgewicht abgeleitet. Hier konnten für Knollen- und Wurzelgemüse, Kartoffeln, Blattgemüse sowie für Fruchtgemüse rechnerische Prüfwertvorschläge aufgestellt werden. Die Werte reichen dabei von 4,4 µg/kg Boden (Kartoffeln; Hinweis: berechnet aus der Regression für Knollen und Wurzeln, mit dem Wassergehalt der Kartoffel) bis 7160 µg/kg Boden (Fruchtgemüse).

6 Prüfung der rechnerischen Prüfwertvorschläge auf Plausibilität

Um die Vollziehbarkeit von Prüf- und Maßnahmenwerten sicherzustellen, muss die Überschreitung von einer schädlichen Veränderung des Bodens ausgelöst werden (vgl. BMU 1999). Zusätzlich muss die Überschreitung der Werte mit den verfügbaren chemischen Analysemethoden auch in Routineuntersuchungen sicher bestimmbar sein. Auch sollten bei eingehaltenen Prüfwerten keine phytotoxischen Effekte auftreten.

6.1 Hinreichender Abstand zur PFAS-Grundbelastung

Damit davon ausgegangen werden kann, dass eine schädliche Bodenveränderung vorliegt, muss ein hinreichend großer Abstand zur Grundbelastung, sprich zum ungestörten Boden, vorliegen. Die Ableitungsmaßstäbe sehen hierfür einen Abgleich mit relevanten Hintergrundwerten vor. Hintergrundwerte beschreiben dabei die typische Schadstoffbelastungen von ungestörten Böden, die aus diffus-ubiquitären Einträgen resultieren. Hintergrundwerte können für unterschiedliche Landnutzungen und unterschiedliche Regionen abgeleitet werden, sollen dabei jedoch flächenhaft-repräsentativ und statistisch evaluiert sein. Die Ableitung von Hintergrundwerten erfolgt gemäß Empfehlungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2017). Für den ländlichen Raum in Deutschland wurden im Forschungsvorhaben „Bundesweite Hintergrundwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) und weitere Schadstoffe in Böden“ (FKZ 3721 712 01 0) ca. 200 Grünland-Oberböden und ca. 400 Ackerland-Oberböden auf 30 PFAS untersucht und die Daten im Umweltbundesamt ausgewertet, um für Deutschland repräsentative Hintergrundwerte für den ländlichen Raum abzuleiten. Die Veröffentlichung der resultierenden Werte ist in Vorbereitung (Umweltbundesamt, Fachgebiet II 2.6, S. Schmidt persönliche Mitteilung). Für die Plausibilitätsprüfung wurden für die entsprechenden PFAS-Einzelstoff- bzw. die Summe der EFSA4-PFAS-Werte für das 90. Perzentil verwendet, die nicht nach Humusklassen differenziert sind. Zusätzlich wurden die im LANUV-Fachbericht 150 veröffentlichten Hintergrundwerte für den ländlichen Raum in NRW betrachtet. Weitere veröffentlichte Hintergrundwerte aus Deutschland lagen nicht vor.

Eine quantitative Definition oder einheitliche Konvention zum hinreichenden Abstand konnte nicht ermittelt werden. Die ad-hoc AG hat daher beschlossen einen Faktor von 2 als hinreichend zu betrachten. Dieser ist konsistent mit dem von der ad hoc-Arbeitsgemeinschaft „Prüfwerte-Ableitung PFAS / Direktpfad“ und dem Bund-Länder-Gesprächskreis Schadstoffbewertung bei der Prüfwert-Bewertung von PFAS im Wirkungspfad Boden-Mensch verwendeten Faktor für einen hinreichenden Abstand zur Grundbelastung.

Die berechneten Prüfwertvorschläge wurden mit den entsprechenden doppelten Hintergrundwerten abgeglichen. Für die vier Einzelstoff-Prüfwerte im Wirkungspfad Boden-Futtermittel (Tabelle 9), wurden dabei Einzelstoff-Hintergrundwerte für Grünland-Oberböden verwendet. Für die Einzelstoff-Prüfwerte für die weiteren PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze (Tabelle 11) wurden ebenfalls Einzelstoff-Hintergrundwerte zum Abgleich benutzt, wobei Ackerland-Oberböden als Referenzraum betrachtet wurden. Für den Summen-Prüfwert für die EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze (Tabelle 10) wurden entsprechend Summen-Hintergrundwerte für die EFSA4-PFAS in Ackerland-Oberböden verwendet.

Der rechnerische Summen-Prüfwert für die EFSA4-PFAS war mit 0,3 µg/kg Boden niedriger als der doppelte Hintergrundwert für EFSA4-PFAS in Ackerland-Oberböden (90. Perzentil der

bundesweiten EFSA4-PFAS-Hintergrundgehalte: 0,7 µg/kg Boden; 90. Perzentil der EFSA4-PFAS-Hintergrundgehalte in NRW: 1,32 µg/kg Boden). Die ad hoc-AG hat sich mehrheitlich dafür ausgesprochen den Prüfwertvorschlag auf den doppelten Hintergrundwert für die bundesweiten EFSA4-PFAS (1,4 µg/kg Boden) anzuheben. Einzelstimmen schlugen eine Anhebung des Prüfwertvorschlags auf den doppelten Hintergrundwert für EFSA4-PFAS in NRW (2,6 µg/kg Boden) vor.

Der ad hoc-AG ist aus den Hintergrundwerte-Projekten bekannt, dass Flächen, auf die Klärschlämme oder PFAS-belastete Bioabfälle aufgebracht wurden, erhöhte Werte im Vergleich zu den Hintergrundwerten aufweisen und ggf. oberhalb der plausibilisierten Prüfwertvorschläge liegen können.

Der rechnerische Prüfwertvorschlag zeigt eine potentielle humantoxikologische Gefährdung durch den Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln an, die auf entsprechenden Flächen angebaut werden. Bei Überschreiten des Wertes ist unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Annahmen davon auszugehen, dass bei 20% der angebauten Lebensmittelpflanzen in essbaren Pflanzenteilen ein EFSA4-PFAS-Gehalt erreicht wird, der mindestens dem doppelten Gehalt entspricht, den das entsprechende Lebensmittel gemäß statistischer Erhebungen und Standardallokations-Annahmen vom *TDI* ausschöpfen sollte. Der vor den Hintergrundgehalten plausibilisierte Prüfwertvorschlag macht eine entsprechend höhere Anzahl von Überschreitungen wahrscheinlich und die zu erwartenden Gehalte steigen. Beispielsweise ist für PFOS in Blattgemüse beim angehobenen Prüfwertvorschlag nach der Transferregression P80 bei 20% der angebauten pflanzlichen Produkte eine Überschreitung von mehr als dem 10-fachen des gesundheitsbasierten Referenzwertes zu erwarten.

Für die anderen rechnerischen Prüfwertvorschläge ist ein hinreichender Abstand zur Grundbelastung gegeben. Die entsprechenden Werte sind für den jeweils sensitivsten Prüfwertvorschlag in **Tabelle 12** für die EFSA4-PFAS und **Tabelle 13** für die weiteren PFAS gegenübergestellt.

Tabelle 12: Gegenüberstellung rechnerische Prüfwertvorschläge EFSA4-PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze und EFSA4-Hintergrundwerte für den ländlichen Raum.

	PFHxS Boden-Futtermittel	PFOA Boden-Futtermittel	PFOS Boden-Futtermittel	PFNA Boden-Futtermittel	Summe EFSA4 Boden-pflanzl. Lebensmittel
Rechnerischer Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	2,0	1,7	2,3	9,7	0,3
Hintergrundwert Bund [µg/kg Boden] (UBA II 2.6, S. Schmidt persönliche Mitteilung)	<0,018 (Grünland)	0,41 (Grünland)	0,65 (Grünland)	0,18 (Grünland)	0,7 (Acker)
Hintergrundwert NRW [µg/kg Boden] (LANUV-Fachbericht 150)	<0,1 (Grünland)	0,62 (Grünland)	0,91 (Grünland)	<0,1 (Grünland)	1,32 (Acker)
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [µg/kg Boden]	2,0	1,7	2,3	9,7	1,4

Tabelle 13: Gegenüberstellung rechnerische Prüfwertvorschläge weiterer PFAS im Wirkungspfad Boden-Pflanze und PFAS-Hintergrundwerte für den ländlichen Raum.

	PFBA Boden-pflanzliches Lebensmittel	PFHxA Boden-pflanzliches Lebensmittel	PFHpA Boden-pflanzliches Lebensmittel	PFDA Boden-pflanzliches Lebensmittel	PFBS Boden-pflanzliches Lebensmittel
Rechnerischer Prüfwertvorschlag [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	4,0	83	0,2	1,8	4,4
Hintergrundwert Acker Bund [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden] ((UBA II 2.6, S. Schmidt persönliche Mitteilung)	0,16	0,09	0,07	0,04	<0,01
Hintergrundwert Acker NRW [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden] (LANUV-Fachbericht 150)	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Plausibilisierter Prüfwertvorschlag [$\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden]	4,0	83	0,3*	1,8	4,4

*Der Prüfwertvorschlag für PFHpA wurde auf Grund der sicheren Bestimmbarkeit angehoben (vgl. b).

6.2 Sichere Bestimmbarkeit der Prüfwertvorschläge

Als sicher bestimmbar wird ein Prüfwert angesehen, für den eine entsprechende chemische Analyseverfahren für den Routineeinsatz verfügbar ist, und der bei dieser die dreifache Bestimmungsgrenze nicht unterschreitet. Idealerweise ist das entsprechende Verfahren genormt.

Die analytische Bestimmung der EFSA4-PFAS, sowie der hier betrachteten weiteren PFAS ist nach Extraktion der Böden als Feststoffgehalt mittels LC-MS/MS möglich. Vorschriften hierzu finden sich bspw. in der DIN 38414-14. In abgewandelter Form mit verbesserter Bestimmungsgrenze und erweitertem Parameterumfang existiert derzeit ein niederländischer Normenentwurf, welcher kurzfristig auf EU-Ebene (CEN) erscheinen soll und voraussichtlich künftig die DIN 38414-14 ablösen wird. Mit diesem genormten Verfahren sind Bestimmungsgrenzen von $0,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ je PFAS-Einzelsubstanz im Boden möglich. Somit wurde die sichere Bestimmbarkeit für Einzelsubstanz-Prüfwertvorschlag ab einem Wert größer-gleich $0,3 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden und bei Summen-Prüfwertvorschlägen ab einem Wert größer-gleich $n \cdot 0,3 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden, wobei n der Anzahl der Summanden entspricht, von der ad hoc-AG als gegeben bewertet.

Für den Prüfwertvorschlag für PFHpA im Wirkungspfad Boden-Lebensmittelpflanze hat die ad hoc-AG beschlossen den Prüfwertvorschlag auf $0,3 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden anzuheben, um eine sichere Bestimmbarkeit zu gewährleisten. Wie unter a ausgeführt, steigt bei einem angehobenen Prüfwertvorschlag die Wahrscheinlichkeit, dass der zu Grunde liegende höchstzulässige Gehalt in den Pflanzen überschritten wird. Für das Beispiel des Transfers von PFHpA in Kartoffeln ist bei Einsetzen des angehobenen Prüfwertvorschlags in die Regressionsgleichung, statt mit einer 5-fachen Überschreitung der gesundheitsbasierten Referenzwerte in 20% der Kartoffeln mit einer ca. 6-fachen Überschreitung zu rechnen.

Für alle anderen rechnerischen Prüfwertvorschläge sah die ad hoc-AG eine sichere Bestimmbarkeit gegeben. Die plausibilisierten Prüfwerte sind in **Tabelle 12** für die EFSA4-PFAS und **Tabelle 13** für die weiteren PFAS aufgeführt. Die Anhebung des PFHpA-Wertes ist dabei bereits berücksichtigt.

6.3 Beurteilung phytotoxischer Wirkungen

Phytotoxische Wirkungen von PFAS werden seit einigen Jahren diskutiert. Verbreitet sind Untersuchungen zu Effektkonzentrationen an PFAS in hydroponischen Kulturen (Adu, Ma und Sharma, 2023). Auf Grund der stärker retardierenden Eigenschaften von Böden gegenüber Nährlösungen in hydroponischen Kulturen, schien es plausibel anzunehmen, dass Effektgehalte in Böden erst bei höheren Beträgen erreicht werden als entsprechende Effektkonzentrationen in hydroponischen Kulturen. In einem Übersichtsartikel von Adu, Ma und Sharma von 2023 ist für die hier betrachteten PFAS als niedrigste, phytotoxische Effektkonzentration (bei Acker-Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*) in der Keimung) für PFOA eine IC_{50} (50%-inhibitorische Konzentration) von 21 $\mu\text{mol/L}$ angegeben, was einer Massenkonzentration von 8,7 mg/L PFOA entspricht. Auch wenn keine direkte Umrechnung auf Bodengehalte möglich ist, kann angenommen werden, dass die abgeleiteten Prüfwerte basierend auf den gesundheitsorientierten Referenzwerten sensitiver sind und eine phytotoxische Wirkung bei Einhaltung der Prüfwertvorschläge unwahrscheinlich ist.

7 Forschungsbedarf

Bei der Ableitung der hier dokumentierten Prüfwertvorschläge stieß die ad hoc-AG insbesondere auf zwei Herausforderungen.

► Die geringe Anzahl behördlich oder öffentlich verfügbarer Boden-Pflanze-Datenpaare insbesondere im Freiland

Für eine belastbare Auswertung des Transferverhaltens und die Korrelation von Pflanzengehalten zu Bodengehalten eines Schadstoffes sind diese Daten ein zentraler Baustein. Idealerweise stammen die berücksichtigten Daten aus vergleichbaren Versuchsanordnungen mit Bedingungen, die die Praxis in deutscher Landwirtschaft und deutschem Gartenbau repräsentieren. Zusätzlich sollten die wichtigsten in Deutschland produzierten und verbrauchten Lebensmittel und Futtermittel, sowie die typischerweise vorkommenden Böden in den Datensätzen repräsentiert sein. Die ad hoc-AG empfiehlt für eine zukünftige Validierung der abgeleiteten Prüfwertvorschläge relevante Boden-Pflanze-Datenpaare zu erheben und den Datenbestand für PFAS zu erweitern, die auf Grund fehlender Datensätze nicht berücksichtigt werden konnten. Letzteres betrifft insbesondere neuartige PFAS, die beispielsweise als Nachfolger von verbotenen Stoffen auf dem Markt sind (z.B. ADONA oder GenX).

► Fehlende Bewertung von bekannten Schadstoffen in Lebens- und Futtermitteln

Bei der Zusammenstellung der Datenpaare wurde ersichtlich, dass eine Aufnahme von PFAS in pflanzliche Lebens- und Futtermittel nachgewiesen werden kann. Dennoch liegen aktuell keine lebensmittel- oder futtermittelrechtlich verbindlichen Höchstgehalte für PFAS vor und es musste orientierend auf provisorisch-vorläufige Ableitungen von höchstzulässigen Pflanzengehalten zurückgegriffen werden. Für eine bundeseinheitliche Bewertung wird die Ableitung entsprechender rechtsverbindlicher Richtwerte empfohlen.

Darüber hinaus sehen die Ableitungsmaßstäbe für den Wirkungspfad Boden-Pflanze keinen Umgang mit Stoffen vor, die als krebserregend eingestuft sind. Für den Wirkungspfad Boden-Mensch liegen hier Bewertungsmaßstäbe vor. Es ist zu diskutieren, ob diese auch auf den Pflanzenpfad übertragbar sind. Nach derzeitigem Stand konnte die ad hoc-AG die Einstufung von PFOA und PFOS als (möglicherweise) karzinogen für Menschen (Gruppe 1 bzw. 2B) durch die Internationale Agentur für Krebsforschung der Weltgesundheitsorganisation (IARC) nicht berücksichtigen.

Während die chemische Analytik von PFAS in Böden und in Lebensmitteln in den vergangenen Jahren noch nicht ausgereift genug war, um eine PFAS-Grundbelastung von pflanzlichen Lebensmitteln oder Bodenfeststoffgehalten sicher zu bestimmen, sind mittlerweile überwiegend hinreichende Bestimmungsgrenzen erreichbar (also Bestimmungsgrenzen deutlich unterhalb von 0,1 µg/kg Boden bzw. Pflanze). Die analytischen Methoden sollten für eine einheitliche Bewertung weiter standardisiert werden. Zusätzlich ist das Nachbildungspotential der hier bewerteten PFAS durch Vorläuferverbindungen (Präkursoren), sowie eine mögliche mischtotoxische Wirkung nicht berücksichtigt. Methoden zur Erfassung von Nachbildungspotentialen im Boden-Feststoff, wie dTOP-Verfahren oder Summenparameter-Ansätze, können zukünftig als komplementäre Ansätze hilfreich bei der Bewertung von PFAS-Schadensfällen sein. Beim dTOP-Verfahren (gesamte, oxidierbare Präkursoren bei direkter Anwendung, engl. *direct total oxidizable precursor*) werden Vorläuferverbindungen der perfluorierten Alkylsäuren durch harsche Reaktionsbedingungen oxidiert, wodurch abgeschätzt werden kann, wie hoch das Nachbildungspotential ist (Göckener et al., 2021). Dieses ist durch das übliche Messverfahren nicht ersichtlich. Zusätzlich sind weitere Summenparameter (wie

adsorbierbares, organisch gebundenes Fluor (AOF) und extrahierbares, organisch gebundenes Fluor (EOF)) in der Entwicklung, die u.a. PFAS-Etherverbindungen und andere Ersatzstoffe erfassen sollen. Für beides wird weitere Entwicklung und Standardisierung empfohlen.

Quellenverzeichnis

- Adu, O., Ma, X., Sharma, V.K. (2023). Bioavailability, phytotoxicity and plant uptake of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *Journal of Hazardous Materials* 447, 130805. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130805
- Bao, J., Li, C-L., Wang, X., Yu, W-L., Liu, Z., Shao, L-X., Jin, Y-H. (2020): Bioaccumulation of perfluoroalkyl substances in greenhouse vegetables with long-term groundwater irrigation near fluorochemical plants in Fuxin, China. *Environmental Research* 188, 109751. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109751
- 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 Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hrsg.)
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf
- Bizkarguenaga, E., Zabaleta, I., Mijangos, L., Iparraguirre, A., Fernández, L.A., Prieto, A., Zuloaga, O. (2016a). Uptake of perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonate and perfluorooctane sulfonamide by carrot and lettuce from compost amended soil. *Science of the Total Environment*, 571, 444–451. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.010
- Bizkarguenaga, E., Zabaleta, I., Prieto, A., Fernández, L.A., Zuloaga, O. (2016b). Uptake of 8:2 perfluoroalkyl phosphate diester and its degradation products by carrot and lettuce from compost-amended soil. *Chemosphere*, 152, 309–317. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.130
- Blaine, A.C., Rich, C.D., Hundal, L.S., Lau, C., Mills, M.A., Harris K.M., Higgins, C.P. (2013). Uptake of perfluoroalkyl acids into edible crops via land applied biosolids: Field and greenhouse studies. In: *Environmental Science & Technology*, 47, 24, S. 14062 – 14069. DOI: 10.1021/es403094q
- Blaine, A.C., Rich, C.D., Sedlacko, E.M., Hundal, L.S., Kumar, K., Lau, C., Mills, M.A., Harris, K.M., Higgins, C.P. (2014). Perfluoroalkyl acid distribution in various plant compartments of edible crops grown in biosolids-amended soils. In: *Environmental Science & Technology*, 48, 14, S. 7858 – 7865. DOI: 10.1021/es500016s
- Bundeslebensmittelschlüssel (BLS) (2024). <https://blsdb.de/bls>
- Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (1997). Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad des Bodenverunreinigungen/Altlasten – Pflanze. Aus *Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*; 3. Band; 9009.
- Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2017). Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2016). Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung.
https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf
- Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2021). PFAS-Höchstgehalte in Futtermitteln BfR empfiehlt verbesserte Analysemethoden – Stellungnahme Nr. 037/2021 des BfR vom 24. November 2021; DOI: 10.17590/20211124-122122
- Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2024). Futtermittel sind ein Schlüssel zur Einhaltung von PFAS-Höchstgehalten in tierischen Lebensmitteln – Stellungnahme Nr. 033/2024 des BfR vom 10 Juli 2024; DOI: 10.17590/20240710-152906-0

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.

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>

European Chemicals Agency (ECHA) (2025). PBT assessment list. <https://echa.europa.eu/pbt> (abgerufen: 07.04.2025)

European Food Safety Authority (EFSA) (2024). Food Consumption Database. <https://www.efsa.europa.eu/en/data-report/food-consumption-data> (31.03.2025)

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>

Europäische Kommission (2022a). Empfehlung (EU) 2022/1431 der Kommission vom 24. August 2022 zur Überwachung von Perfluoralkylsubstanzen in Lebensmitteln. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H1431>

Europäische Kommission (2022b). Verordnung (EU) 2022/2388 der Kommission vom 7. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 hinsichtlich der Höchstgehalte an Perfluoralkylsubstanzen in bestimmten Lebensmitteln. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R2388>

Europäische Kommission (2022c). Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, der Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung und der Richtlinie 2008/105/EG über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik. (COD 2022/0344) https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2022_344

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

Europäisches Parlament (2020). Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32020L2184>

Felizeter, S., Jürling, H., Kotthoff, M., de Voogt, P., McLachlan, M.S. (2021). Uptake of perfluorinated alkyl acids by crops: results from a field study. Environmental Science: Processes Impacts 23, 1158–1170. DOI: 10.1039/D1EM00166C

Ghisi, R., Vamerali, T., Manzetti, S. (2019). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. Environmental Research 169; 326-341. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>

Göckener, B., Fliedner, A., Rüdell, H., Fettig, I., Koschorreck, J. (2021). Exploring unknown per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment—the total oxidizable precursor assay as helpful tool in research and regulation. Science of the Total Environment 782:146825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146825>

- Gredelj, A., Nicoletto, C., Polesello, S., Ferrario, C., Valsecchi, S., Lava, R., Barausse, A., Zanon, F., Palmeri, L., Guidolin, L., Bonato, M. (2020). Uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in hydroponically grown red chicory (*Cichorium intybus* L.): Growth and developmental toxicity, comparison with growth in soil and bioavailability implications. *Science of the total Environment* 720, 137333. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137333
- Herrchen, M., Klein, M., Kördel, W. Müller, J., Weinfurtner, K. (2006). Evaluierung und Erweiterung der Grundlagendaten für die Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Pflanze. Abschlussbericht zu FKZ 203 73 273.
- Knight, E.R., Bräunig, J., Janik, L.J., Navarro, D.A., Kookana, R.S., Mueller, J.F., McLaughlin, M.J. (2021). An investigation into the long-term binding and uptake of PFOS, PFOA and PFHxS in soil - plant systems. *Journal of Hazardous Materials* 404 (B) DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124065
- König, W. Utermann, J. (1998). Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. „Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad Bodenverunreinigung/Altlast – Pflanze – ad-hoc AG „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ des AK „Bodenbelastung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)“9009 Erich Schmidt Verlag.
- 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
- Lasee, S., Subbiah, S., Thompson, W.A., Karnjanapiboonwong, A., Jordan, J., Payton, P., Anderson, T.A. (2019). Plant uptake of per- and polyfluoroalkyl acids under a maximum bioavailability scenario. In: *Environmental Toxicology and Chemistry*. DOI: 10.1002/etc.4571
- Lechner, M., Knapp, H. (2011). Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plant and distribution to the different plant compartments studied in cultures of carrots (*Daucus carota* ssp. *Sativus*), potatoes (*Solanum tuberosum*), and cucumbers (*Cucumis Sativus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 20, 11011–11018. <https://doi.org/10.1021/jf201355y>
- Liu, Z.; Lu, Y.; Shi, Y.; Wang, P.; Jones, K.; Sweetman, A.J.; Johnson, A.C.; Zhang, M.; Zhou, Y.; Lu, X.; Su, C.; Sarvajayakesavaluc, S.; Khan, K. (2017). Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China. *Environment International*, 106, 37–47. DOI: 10.1016/j.envint.2017.05.014
- LIU, Z.; LU, Y.; SONG, X.; JONES, K.; SWEETMAN, A.J.; JOHNSON, A.C.; ZHANG, M.; LU, X.; SU, C. **2019**: Multiple crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl substances around a mega fluorochemical industrial park, China: Implication for planting optimization and food safety. *Environment International*, 127, 671–684. DOI: 10.1016/j.envint.2019.04.008
- Mikkonen, A.T., Martin, J., Upton, R.N., Barker, A.O., Brumley, C.M., Taylor, M.P., Mackenzie, L., Roberts, M.S. (2023). Spatio-temporal trends in livestock exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) inform risk assessment and management measures. *Environmental Research* 225, 115518. DOI:10.1016/j.envres.2023.115518
- Navarro, I., de la Torre, A., Sanz, P., Porcel, M.Á., Pro, J., Carbonell, G., Martínez, M.L. (2017). Uptake of perfluoroalkyl substances and halogenated flame retardants by crop plants grown in biosolids-amended soils. *Environmental Research*, 152, 199–206. DOI: 10.1016/j.envres.2016.10.018
- Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) (2021). Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance. Series on Risk Management No. 61. https://www.oecd.org/en/publications/reconciling-terminology-of-the-universe-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances_e458e796-en.html (Stand: 31.03.2025)

Pancras, T., Bentum, E.V., Pagter, L., Hoef, M.V., Hoogenboom, R., Berendsen, B., van Leeuwen, S.P.J. (2024). Large scale study on PFASs levels in fruits, vegetables and soil from allotments and gardens contaminated by atmospheric deposition from a Dutch fluorochemical production plant. *Chemosphere* 368, 143651. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143651

Rommel, P., Rommel, J. Schneider, J. (1998). Literaturstudie zum Transfer von organischen Schadstoffen im System Boden/Pflanze und Boden/Sickerwasser.

Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) (2022). Scientific Opinion on "Draft Environmental Quality Standards for Priority Substances under the Water Framework Directive" – PFAS – Final Opinion 18.08.2022

Scheurer, M., Lesmeister, L., Breuer, J., Boeddinghaus, R.S., Schultheiß, M., Mechler, M., Dobsław, D., Engesser, K.-H., Kuch, B. (2022). Erarbeitung von fachlichen Grundlagen für die Ableitung von Bewertungsmaßstäben für weitere bodenrelevante, bisher nicht in der BBodSchV enthaltenen Schadstoffe und Schadstoffgruppen in Böden (Schwerpunkt PFAS) im Wirkungspfad Boden-Pflanze (FLUORTRANSFER). UBA-Text 77/2022 (Abschlussbericht zu FKZ 3718 74 210 0).

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_77-2022_fluortransfer.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2024). Bewertung der PFAS-20 aus der Trinkwasserverordnung vom 14. Juni 2024. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/13195/dokumente/empfehlung_des_umweltbundesamtes_-_bewertung_der_pfas-20_aus_der_trinkwasserverordnung.pdf

Wen, B., Li, L., Zhang, H., Ma, Y., Shan, X.Q., Zhang, S. (2014). Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in biosolids-amended soils. *Environmental pollution*, 184, 547–554. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.09.040

Wen, B., Wu, Y., Zhang, H., Liu, Y., Hu, X., Huang, H., Zhang, S. (2016). The roles of protein and lipid in the accumulation and distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in plants grown in biosolids-amended soils. *Environmental pollution*, 216, 682–688. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.06.0

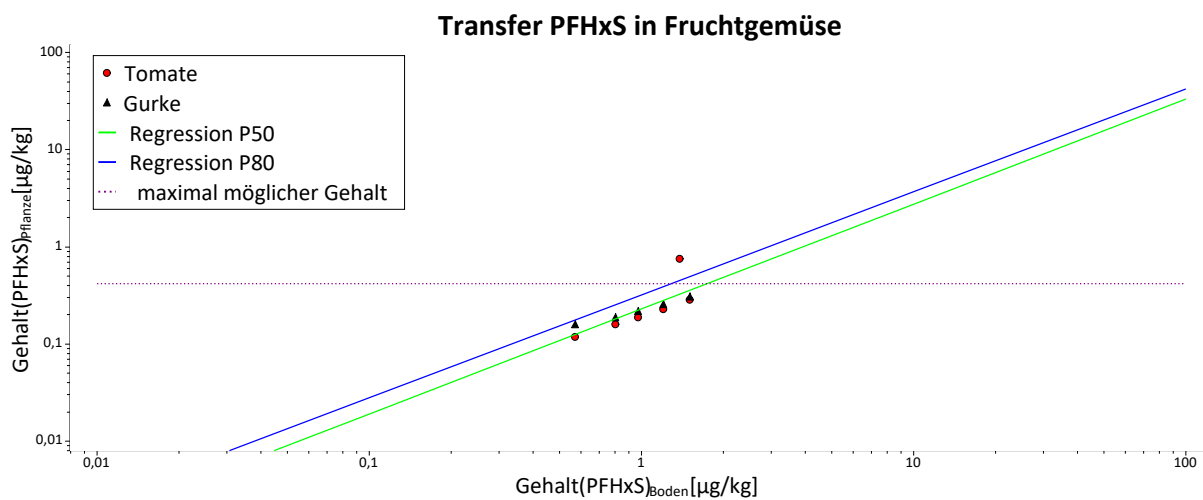
Anhang Datensätze (erarbeitet von Lennart Gehrenkemper)

Dargestellt sind jeweils die doppelt logarithmisch gegeneinander aufgetragenen Gehalte der angegebenen PFAS in den essbaren Pflanzenteilen der angegebenen Lebensmittelkategorien und den korrespondierenden Bodengehalten.

A.1 Datensätze zur Transferbestimmung für EFSA4-PFAS

Abbildung A.1-1 Transfer PFHxS in Fruchtgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 0,02 [µg/kg ww] => 0,42 [µg/kg dw]

Datensatz: 2 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 0 Freiland, 11 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,61$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHxS)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,23 \cdot \text{Gehalt(PFHxS)}_{\text{Boden}}^{1,08} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHxS)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,32 \cdot \text{Gehalt(PFHxS)}_{\text{Boden}}^{1,06} [\mu\text{g/kg}]$$

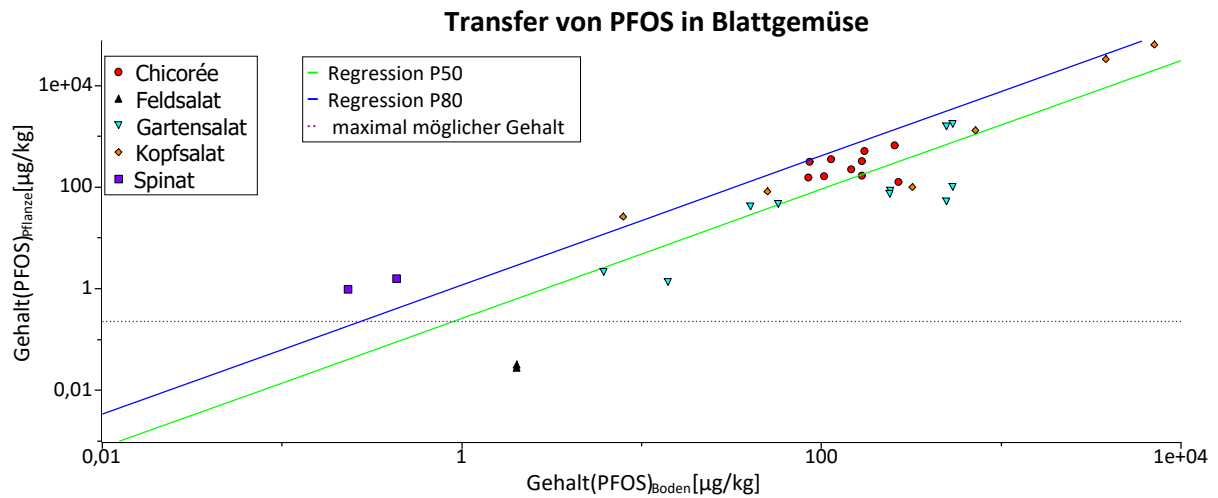
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 1,29 [µg/kg]

Bund-Hintergrundgehalt EFSA4: 0,7 [µg/kg] / NRW-Hintergrundwert PFHxS: --

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 1,4 [µg/kg]

Abbildung A.1-2 Transfer PFOS in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 0,02 [µg/kg ww] => 0,23 [µg/kg dw]

Datensatz: 7 Publikationen, 5 Gemüsesorten, 8 Freiland, 23 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,78$$

$$P50: \text{Gehalt(PFOS)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,26 \cdot \text{Gehalt(PFOS)}_{\text{Boden}}^{1,27} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFOS)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 1,18 \cdot \text{Gehalt(PFOS)}_{\text{Boden}}^{1,27} [\mu\text{g/kg}]$$

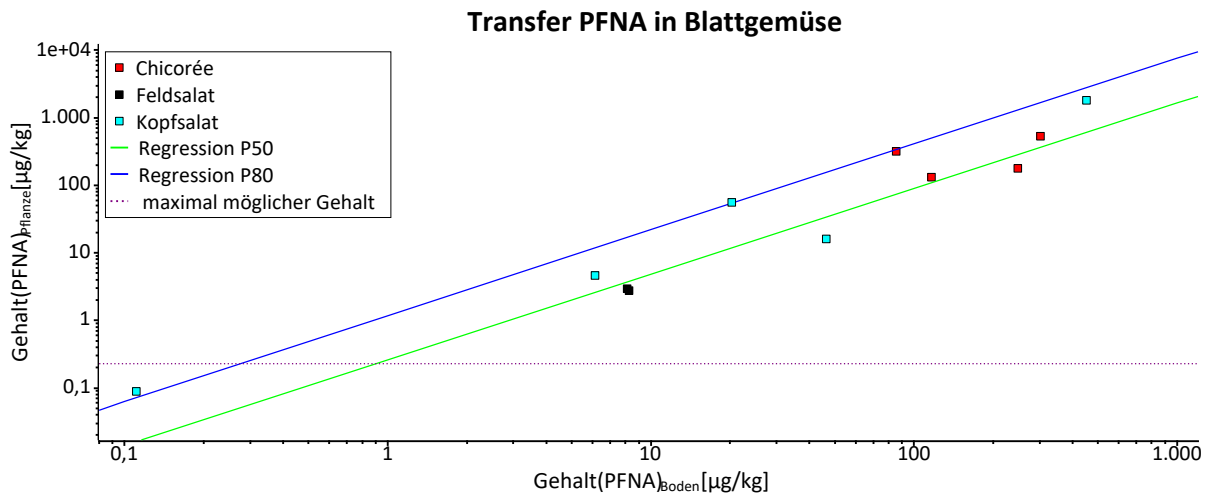
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 0,28 [µg/kg]

Bund-Hintergrundgehalt EFSA4: 0,7 [µg/kg] / NRW-Hintergrundwert PFOS: 0,72 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 1,4 [µg/kg]

Abbildung A.1-3 Transfer PFNA in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 0,02 [µg/kg ww] => 0,23 [µg/kg dw]

Datensatz: 5 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 7 Freiland, 6 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,95$$

$$P50: \text{Gehalt(PFNA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,4 \cdot \text{Gehalt(PFNA)}_{\text{Boden}}^{1,3} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFNA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 1,05 \cdot \text{Gehalt(PFNA)}_{\text{Boden}}^{1,29} [\mu\text{g/kg}]$$

Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 0,31 [µg/kg]

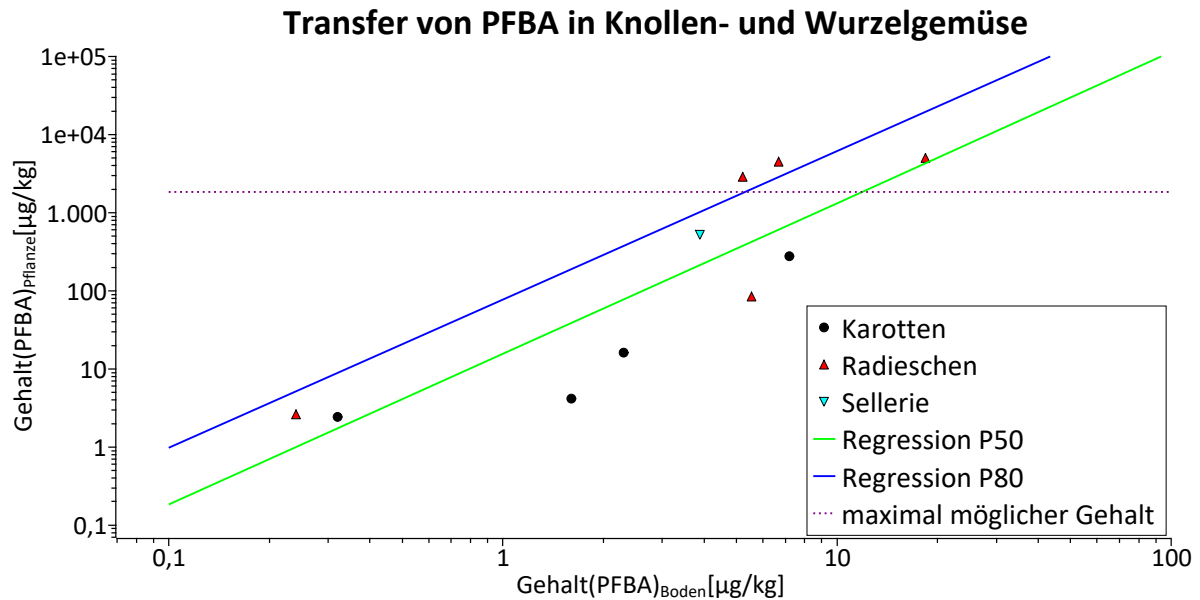
Bund-Hintergrundgehalt EFSA4: 0,7 [µg/kg] / NRW-Hintergrundwert PFNA: --

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 1,4 [µg/kg]

A.2 Datensätze zur Transferbestimmung für weitere PFAS

Abbildung A.2-1 Transfer PFBA in Knollen- und Wurzelgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 220,3 [µg/kg ww] => 1840 [µg/kg dw]

Datensatz: 3 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 8 Freiland, 2 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,76$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 15,6 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{1,93} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 77,49 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{1,9} [\mu\text{g/kg}]$$

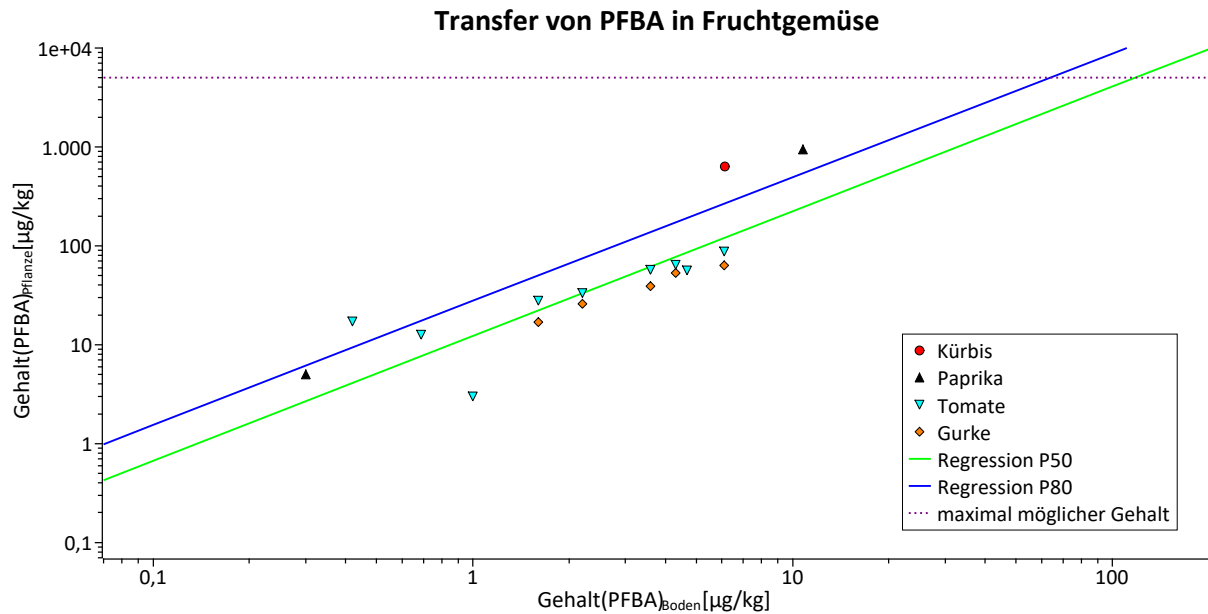
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 5,3 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,16 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 5,3 [µg/kg]

Abbildung A.2-2 Transfer PFBA in Fruchtgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 220,3 [µg/kg ww] => 5010 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 4 Gemüsesorten, 6 Freiland, 11 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,68$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 12,26 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{1,26} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 27,65 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{1,25} [\mu\text{g/kg}]$$

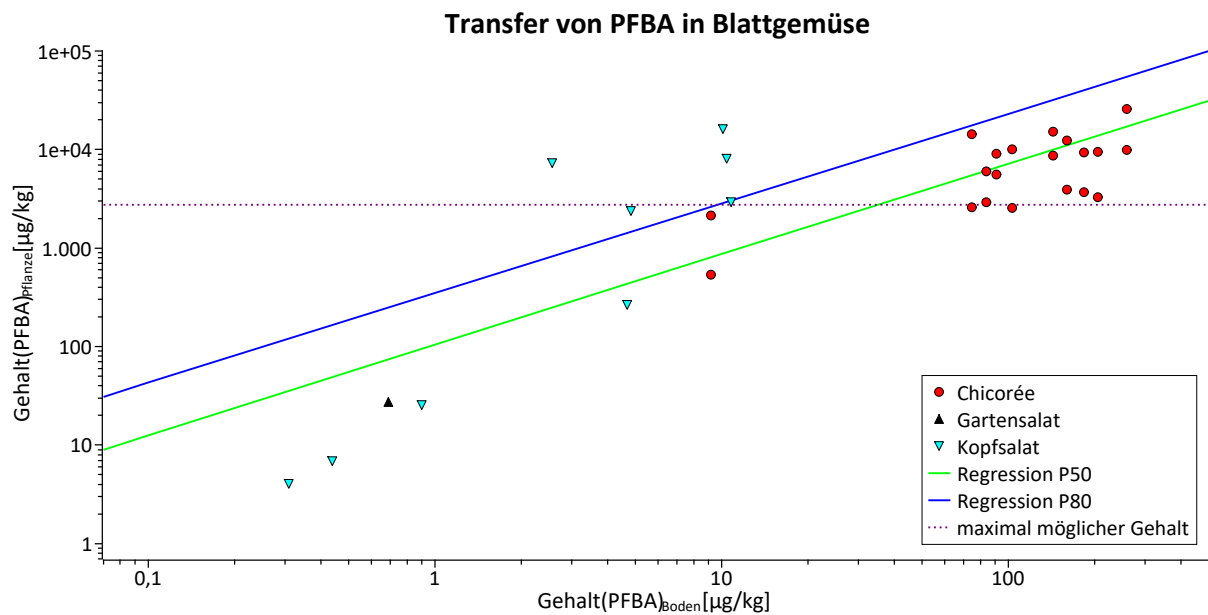
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 64,0 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,16 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 64,0 [µg/kg]

Abbildung A.2-3 Transfer PFBA in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 220,3 [µg/kg ww] => 2750 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 7 Freiland, 23 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,68$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 104,15 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{0,92} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 349,18 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{0,91} [\mu\text{g/kg}]$$

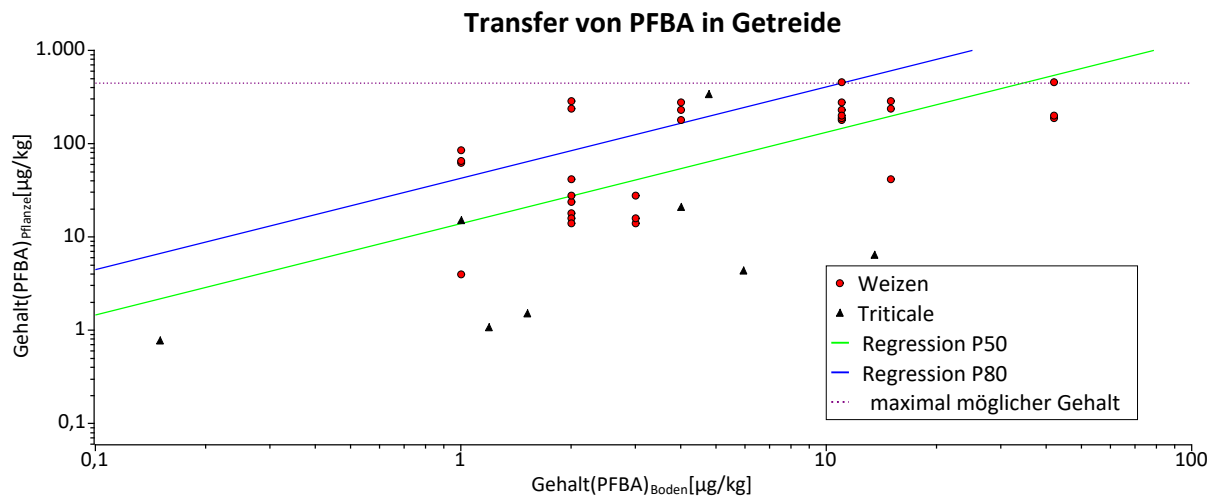
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 9,67 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,16 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 9,67 [µg/kg]

Abbildung A.2-4 Transfer PFBA in Getreide

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 220,3 [µg/kg ww] => 251 [µg/kg dw]

Datensatz: 5 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 47 Freiland, 43 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,53$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 13,79 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{0,98} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 42,3 \cdot \text{Gehalt(PFBA)}_{\text{Boden}}^{0,98} [\mu\text{g/kg}]$$

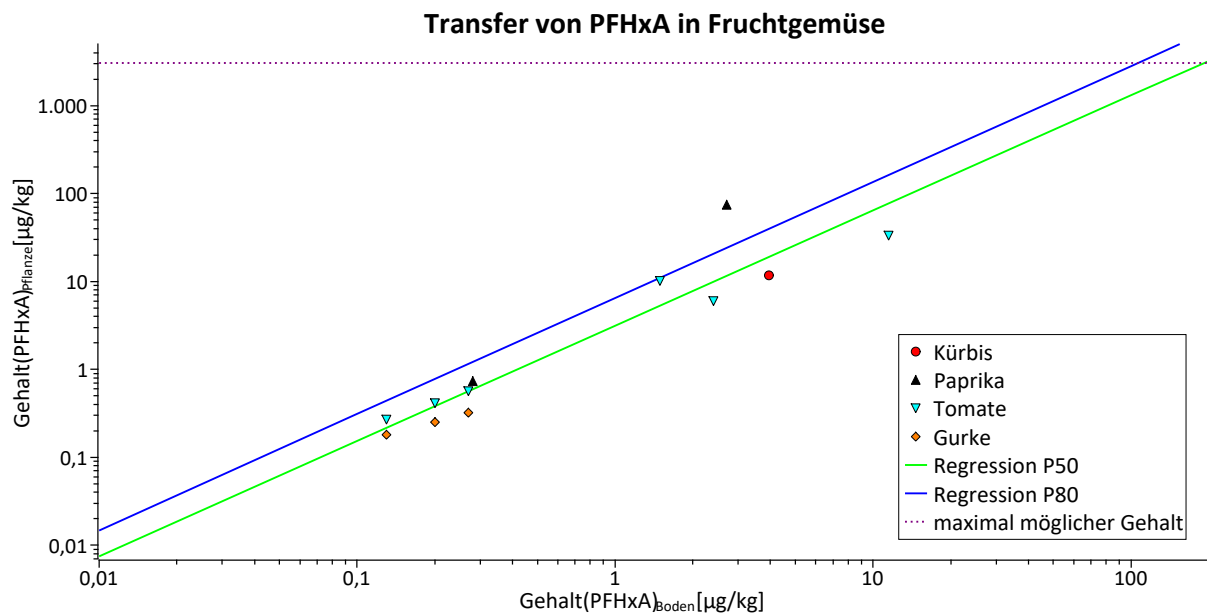
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 11,1 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,16 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 11,1 [µg/kg]

Abbildung A.2-5 Transfer PFHxA in Fruchtgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 135,1 [µg/kg ww] => 3070 [µg/kg dw]

Datensatz: 3 Publikationen, 4 Gemüsesorten, 4 Freiland, 8 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,89$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 3,13 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{1,31} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 6,45 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{1,32} [\mu\text{g/kg}]$$

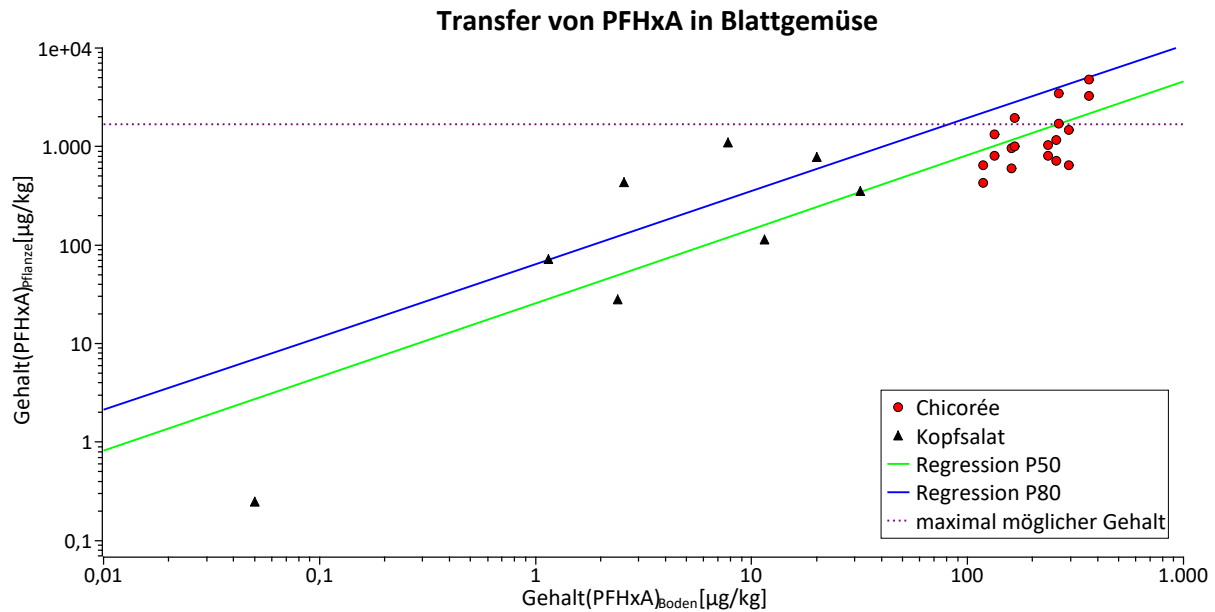
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 107 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,09 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 107 [µg/kg]

Abbildung A.2-6 Transfer PFHxA in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 135,1 [µg/kg ww] => 1690 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 6 Freiland, 20 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,75$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 25,73 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{0,75} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 64,19 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{0,74} [\mu\text{g/kg}]$$

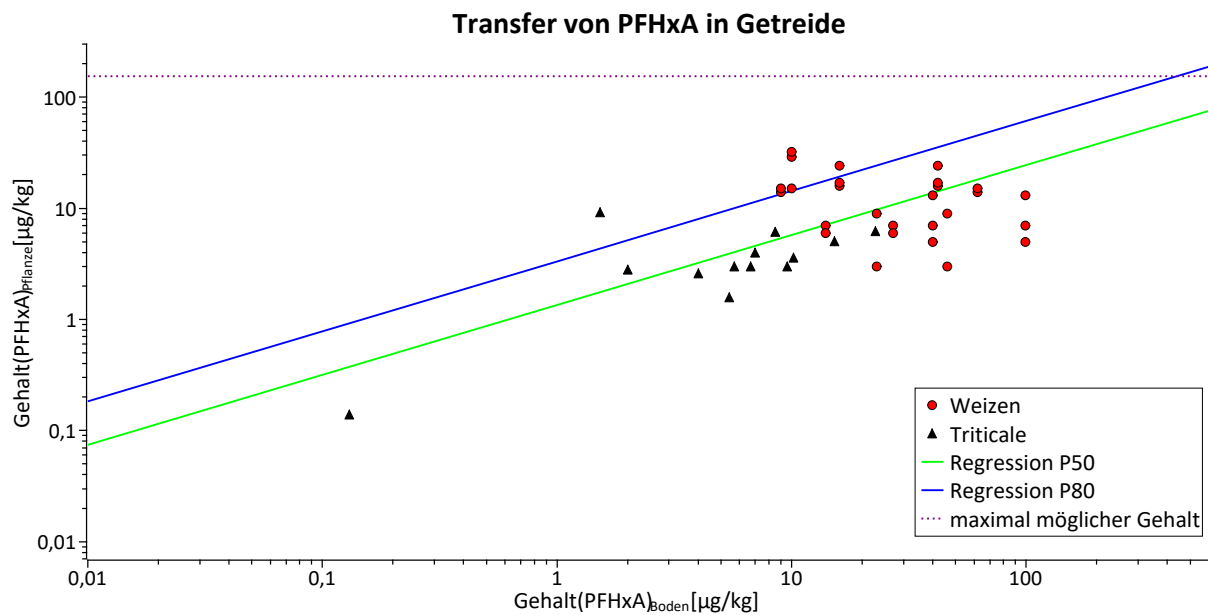
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 83,0 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,09 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 83,0 [µg/kg]

Abbildung A.2-7 Transfer PFHxA in Getreide

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 135,1 [µg/kg ww] => 153,7 [µg/kg dw]

Datensatz: 5 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 55 Freiland, 43 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,53$$

$$\text{P50: Gehalt(PFHxA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 1,35 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{0,63} [\mu\text{g/kg}]$$

$$\text{P80: Gehalt(PFHxA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 3,34 \cdot \text{Gehalt(PFHxA)}_{\text{Boden}}^{0,63} [\mu\text{g/kg}]$$

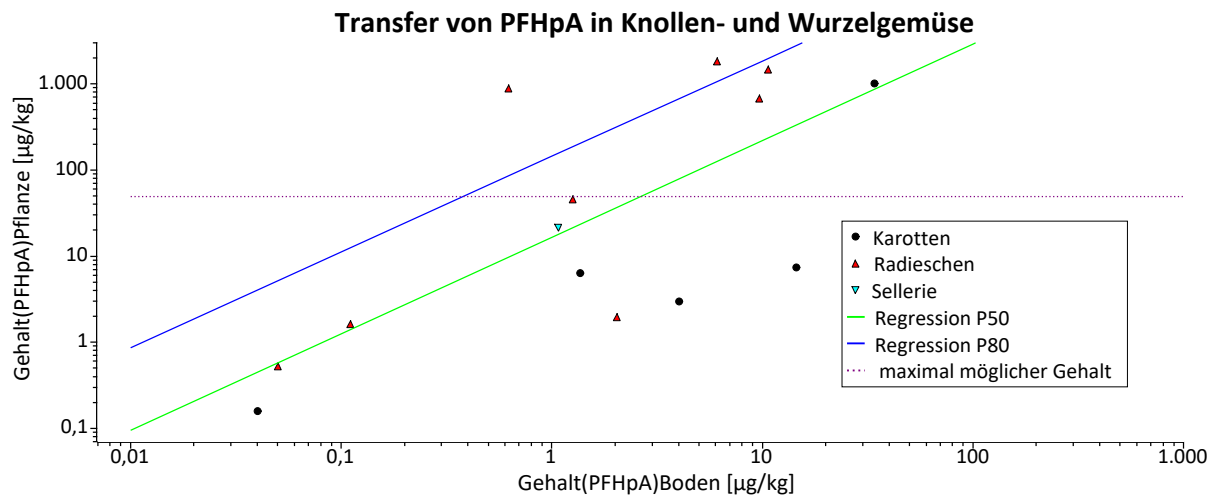
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 436 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,09 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 436 [µg/kg]

Abbildung A.2-8 Transfer PFHpA in Knollen- und Wurzelgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 5,87 [µg/kg ww] => 49,0 [µg/kg dw]

Datensatz: 5 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 9 Freiland, 6 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,55$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 16,58 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{1,12} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 143,8 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{1,11} [\mu\text{g/kg}]$$

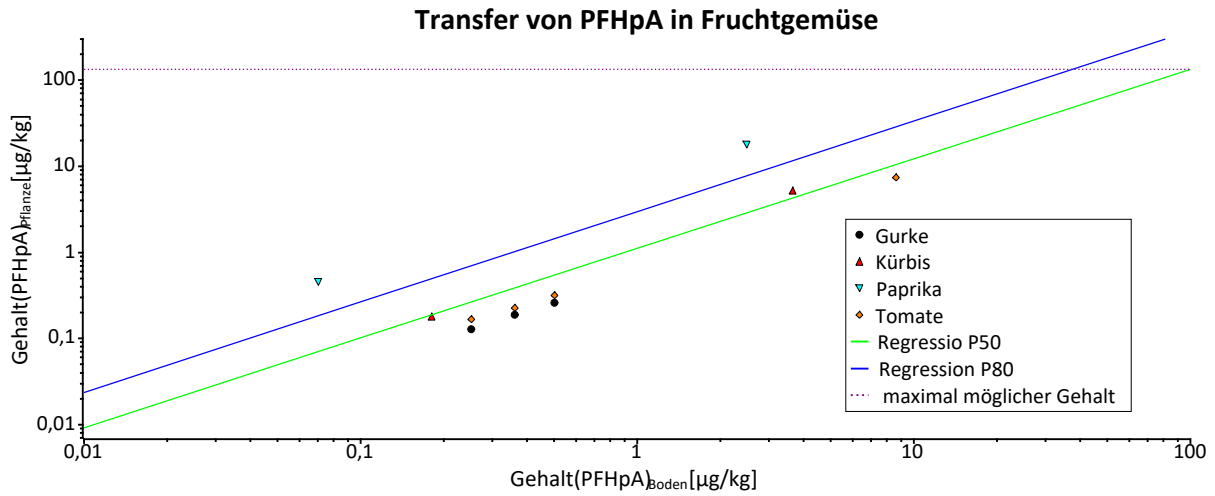
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 0,38 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,07 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 0,38 [µg/kg]

Abbildung A.2-9 Transfer PFHpA in Fruchtgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 5,87 [µg/kg ww] => 133,5 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 4 Gemüsesorten, 4 Freiland, 7 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,7$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 1,11 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{1,04} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 2,97 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{1,05} [\mu\text{g/kg}]$$

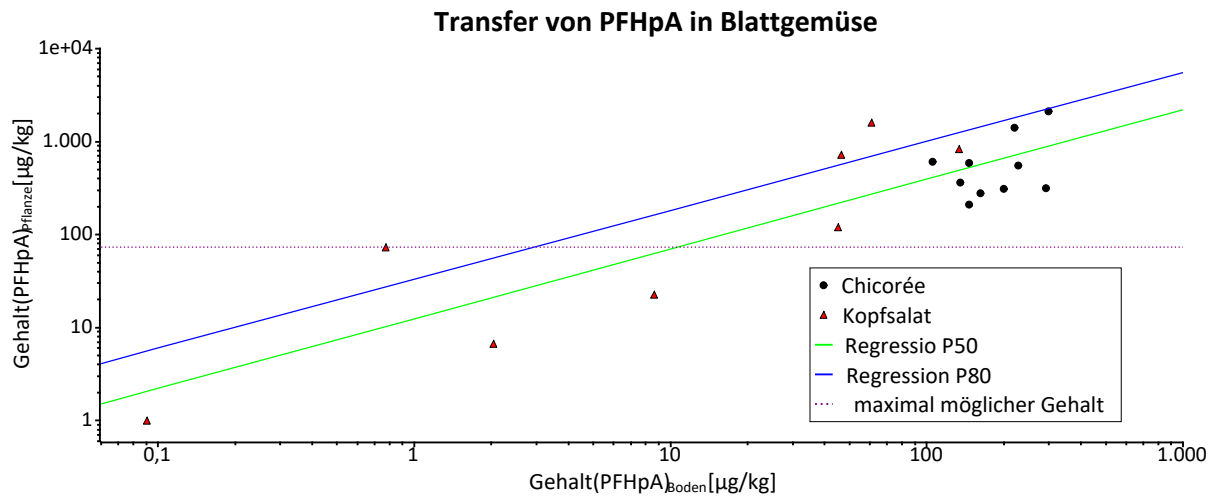
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 37,5 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,07 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 37,5 [µg/kg]

Abbildung A.2-10 Transfer PFHpA in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 5,87 [µg/kg ww] => 73,43 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 6 Freiland, 12 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,76$$

$$P50: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 12,42 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{0,75} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 33,16 \cdot \text{Gehalt(PFHpA)}_{\text{Boden}}^{0,74} [\mu\text{g/kg}]$$

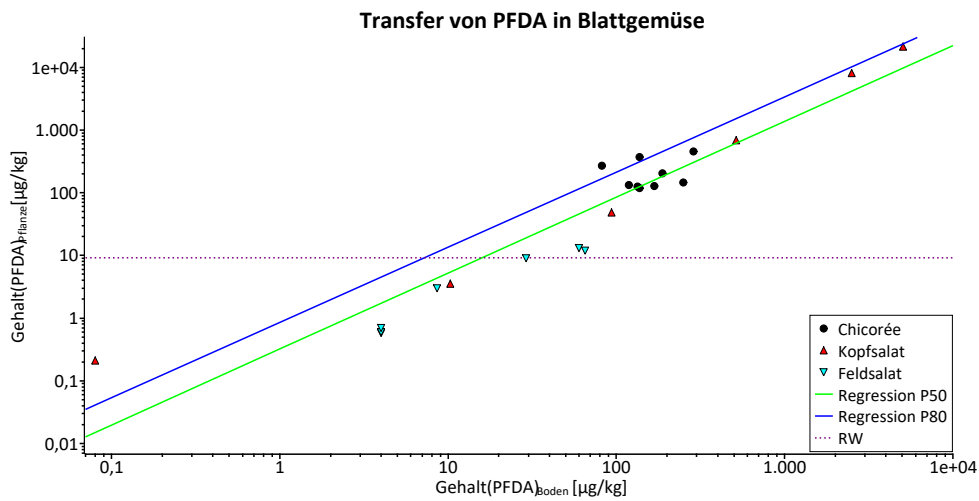
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 2,93 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,07 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 2,93 [µg/kg]

Abbildung A.2-12 Transfer PFDA in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 0,734 [µg/kg ww] => 9,18 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 6 Freiland, 12 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,9$$

$$P50: \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,32 \cdot \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Boden}}^{1,21} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,85 \cdot \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Boden}}^{1,20} [\mu\text{g/kg}]$$

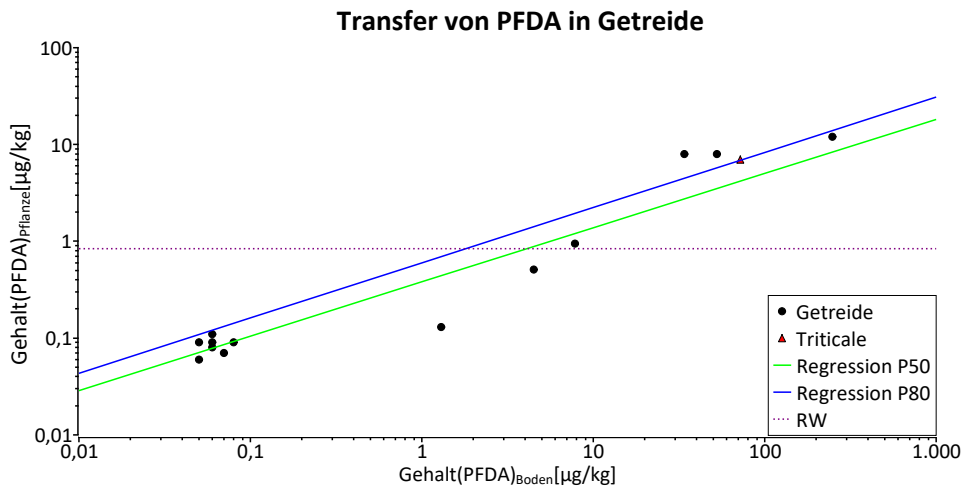
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 7,26 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,04 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 7,26 [µg/kg]

Abbildung A.2-13 Transfer PFDA in Getreide

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 0,734 [µg/kg ww] => 0,835 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 17 Freiland, 0 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,88$$

$$P50: \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 0,38 \cdot \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Boden}}^{0,56} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Getreide}} [\mu\text{g/kg}] = 0,60 \cdot \text{Gehalt(PFDA)}_{\text{Boden}}^{0,57} [\mu\text{g/kg}]$$

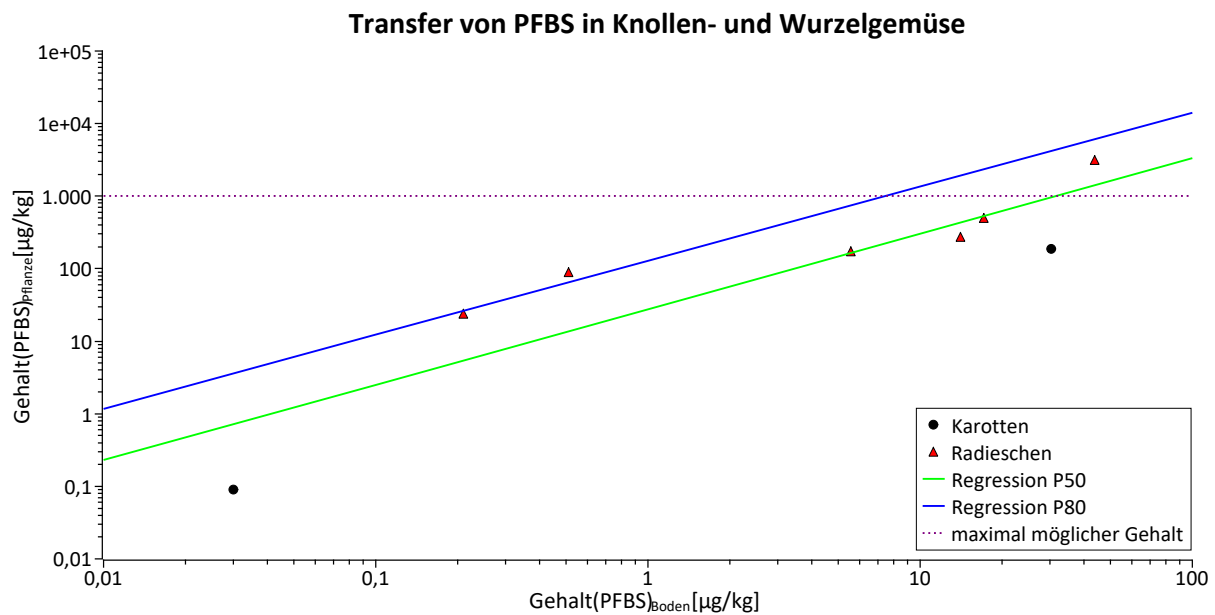
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 1,8 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: 0,04 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 1,8 [µg/kg]

Abbildung A.2-14 Transfer PFBS in Knollen- und Wurzelgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 120,4 [µg/kg ww] => 1003 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 2 Gemüsesorten, 5 Freiland, 3 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,85$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 27,62 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,04} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Wurzel}} [\mu\text{g/kg}] = 128,9 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,02} [\mu\text{g/kg}]$$

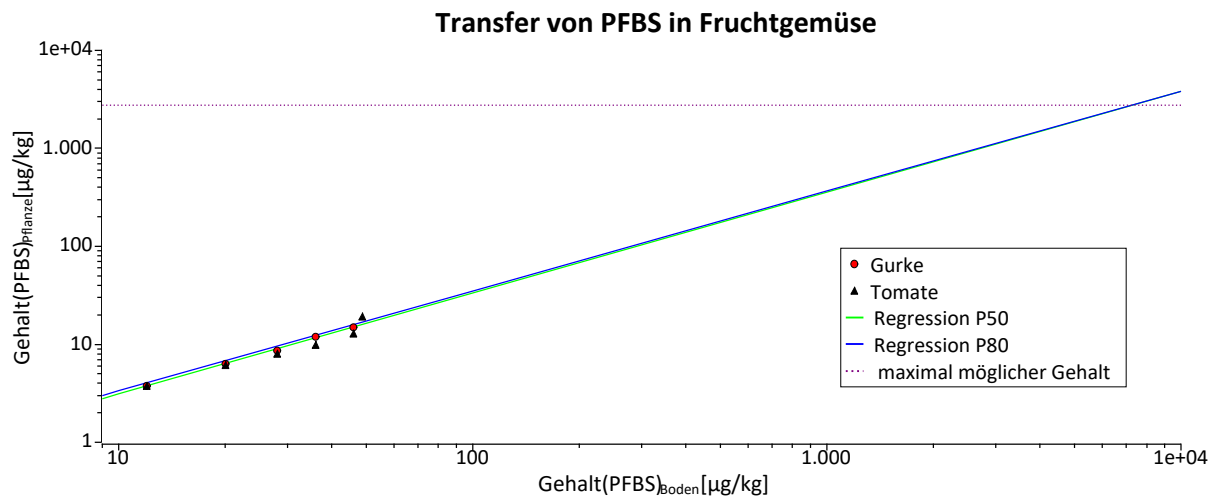
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 7,5 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: <0,01 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 7,5 [µg/kg]

Abbildung A.2-15 Transfer PFBS in Fruchtgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 120,4 [µg/kg ww] => 2740 [µg/kg dw]

Datensatz: 4 Publikationen, 4 Gemüsesorten, 6 Freiland, 11 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,97$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,29 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,03} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Fruchtgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 0,32 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,02} [\mu\text{g/kg}]$$

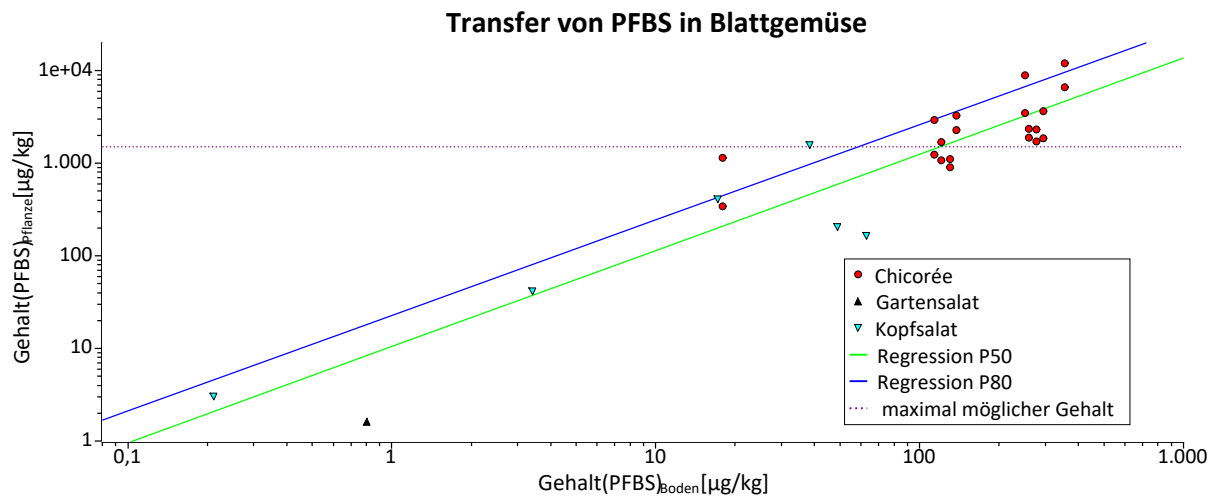
Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 7160 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: <0,01 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 7160 [µg/kg]

Abbildung A.2-16 Transfer PFBS in Blattgemüse

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



Berechneter Referenzwert Pflanze: 120,4 [µg/kg ww] => 1510 [µg/kg dw]

Datensatz: 3 Publikationen, 3 Gemüsesorten, 5 Freiland, 22 Gefäß

Regressionen

$$R^2 = 0,85$$

$$P50: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 10,42 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,04} [\mu\text{g/kg}]$$

$$P80: \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Blattgemüse}} [\mu\text{g/kg}] = 22,71 \cdot \text{Gehalt(PFBS)}_{\text{Boden}}^{1,03} [\mu\text{g/kg}]$$

Rechnerischer Prüfwertvorschlag: 58,7 [µg/kg]

Hintergrundgehalt: <0,01 [µg/kg]

Plausibilisierter Prüfwertvorschlag: 58,7 [µg/kg]