TEXTE
134/2026

Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

von:

Simone Schmidt, René Zahl, Annegret Biegel-Engler

Umweltbundesamt, Dessau

Christian Piechotta, Tanja Westphalen, Luisa Hantschke, Stephanie Kluge, Katja Kaminski, Juliane Scholl

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Karlheinz Weinfurtner

Fraunhofer IME, Schmallenberg

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 134/2026

Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

von

Simone Schmidt, René Zahl, Annegret Biegel-Engler
Umweltbundesamt, Dessau

Christian Piechotta, Tanja Westphalen, Luisa Hantschke, Stephanie Kluge, Katja Kaminski, Juliane Scholl
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Karlheinz Weinfurtner
Fraunhofer IME, Schmallenberg

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
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum:
Mai 2026

Redaktion:
Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Dr. Annegret Biegel-Engler, Simone Schmidt, René Zahl

DOI:
https://doi.org/10.60810/openumwelt-9043

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2026

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

Kurzbeschreibung: Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind eine große Gruppe anthropogener, hoch stabiler Fluorchemikalien, die aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften breit eingesetzt wurden. Ihre extreme Persistenz führt dazu, dass sie sich in der Umwelt anreichern, weltweit verbreitet sind und über lange Zeit in Böden verbleiben können. Gleichzeitig stehen PFAS aufgrund möglicher gesundheitlicher Wirkungen zunehmend im Fokus regulatorischer Maßnahmen auf EU- und internationaler Ebene.

PFAS gelangen sowohl aus punktuellen Quellen (z. B. Industrie, Feuerlöschschäume) als auch aus diffusen Einträgen (z. B. Klärschlämme, Düngemittel, Bewässerung und atmosphärische Deposition) in Böden und können von dort ins Grundwasser sowie in die Nahrungskette übergehen. In Deutschland wurden in den letzten Jahren wiederholt erhebliche Bodenbelastungen festgestellt, was den Bedarf an einheitlichen Bewertungsgrundlagen unterstreicht.

Während in der Bundesbodenschutzverordnung für den Wirkungspfad Boden–Grundwasser bereits einzelne Prüfwerte existieren, fehlen für Boden–Mensch und Boden–Pflanze bislang PFAS-spezifische Bewertungsmaßstäbe. Hintergrundwerte spielen hierfür eine zentrale Rolle, da sie die Ableitung von Vorsorge- und Prüfwerten sowie die rechtssichere Bewertung von Belastungen ermöglichen.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden daher bundesweit die Oberböden von 605 landwirtschaftlich genutzten Standorte beprobt und analysiert. Der Bericht liefert erstmals bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in Acker- und Grünlandböden des ländlichen Raums und schafft damit eine wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung des Bodenschutzrechts.

Abstract:

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are a large group of anthropogenic, highly stable fluorinated chemicals that are widely used due to their water-, grease- and dirt-repellent properties. Their extreme persistence means that they accumulate in the environment, are found worldwide and can remain in the soil for long periods of time. At the same time, PFAS are increasingly the focus of regulatory measures at EU and international level due to potential health impacts.

PFAS enter the soil from both point sources (e.g. industry, fire-fighting foams) and diffuse sources (e.g. sewage sludge, fertilisers, irrigation and atmospheric deposition), and can migrate from there into groundwater and the food chain. In Germany, significant soil contamination has been repeatedly identified in recent years, underscoring the need for uniform assessment criteria.

Whilst individual guideline values already exist in the Federal Soil Protection Ordinance for the soil–groundwater exposure pathway, PFAS-specific guideline values for soil–human and soil–plant pathways are currently lacking. Background values play a central role in this context, as they enable the derivation of precautionary and test values as well as the legally sound assessment of contamination.

On behalf of the Federal Environment Agency, topsoil samples were therefore taken and analysed from 605 agricultural sites across the country. The report provides, for the first time, nationwide background values for PFAS in arable and grassland soils in rural areas, thereby establishing a scientific basis for the further development of soil protection legislation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 11
Abkürzungsverzeichnis 13
1 Einleitung 18
2 Methodik 21
2.1 Fachliche Grundlagen 21
2.2 Auswahl der Untersuchungsstandorte 22
2.3 Probenahme, Probenvorbereitung und Bestimmung von Bodenkenngrößen 24
2.4 PFAS-Analytik 27
2.4.1 Untersuchungsspektrum 27
2.4.2 Bestimmung von PFAS-Gesamtgehalten in Böden 29
2.4.3 TOP Assay 33
2.5 Datenauswertung 34
3 Untersuchungsergebnisse 39
3.1 Untersuchungsstandorte und Differenzierungskriterien 39
3.1.1 Standorte für die Ermittlung von bundesweiten Hintergrundwerten für PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums 39
3.1.2 Kriterien für die Differenzierung von PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums 40
3.2 Ergebnisse der Untersuchung von PFAS-Gesamtgehalten in Acker- und Grünlandböden des ländlichen Raums 46
3.2.1 Allgemeiner Überblick über die Verteilung der Messwerte 46
3.2.2 Substanzspezifische Auswertung der PFAS-Gesamtgehalte 49
3.2.3 Summe der Gesamtgehalte von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS (EFSA4-PFAS) 65
3.2.4 Summe der Gesamtgehalte von 19 PFAS-Verbindungen (Summe PFAS19) 67
3.3 Ergebnisse der TOP-Assay Untersuchungen 69
4 Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS-Gesamtgehalte in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums 74
5 Zusammenfassung/Summary 78
5.1 Zusammenfassung 78
5.2 Summary 84
6 Quellenverzeichnis 89
A Anhang: Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in Acker- und Grünland-Oberböden 93

B Anhang: Karten der bundesweiten Verteilung von PFAS-Gesamtgehalten in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums 109

C Anhang: Karten der bundesweiten Detektion und Quantifizierung von PFAS-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums 117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Probenahmeschema der Satellitenmethode 25
Abbildung 2 Verdichtungsräume und Abgrenzung von Flussauen.....34
Abbildung 3 Naturräumliche Großlandschaften des BfN und zusammengefasste regionale Cluster für die Ableitung von Hintergrundwerten 36
Abbildung 4 schematische Darstellung und Erläuterung von Whisker-Box-Plots.....38
Abbildung 5 Lage der Untersuchungsstandorte 39
Abbildung 6 Prozentuale Anteile von PFAS-Messwerten oberhalb der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bei der Bestimmung von Gesamtgehalten 46
Abbildung 7 Verteilung der Perfluorcarbonsäuren, Perfluorsulfonsäuren und ADONA in Acker-Oberböden in den Regionen Nordostdeutsches Tiefland (NO-Deutschland), Nordwestdeutsches Tiefland (NW-Deutschland) und Mittel-/Süddeutschland 47
Abbildung 8 Verteilung der Perfluorcarbonsäuren, Perfluorsulfonsäuren und ADONA in Grünland-Oberböden in den Regionen Nordostdeutsches Tiefland (NO-Deutschland), Nordwestdeutsches Tiefland (NW-Deutschland) und Mittel- /Süddeutschland 48
Abbildung 9 Bundesweite Verteilung von PFOS und TFA in Acker- und Grünlandproben des ländlichen Raums 49
Abbildung 10 PFOA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 50
Abbildung 11 PFNA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 51
Abbildung 12 PFOS – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 52
Abbildung 13 PFHxS – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 53
Abbildung 14 PFBA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 54
Abbildung 15 PFPeA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung.....55
Abbildung 16 PFHxA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 56
Abbildung 17 PFHpA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung.....57
Abbildung 18 PFDA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 58

Abbildung 19 PFUnDA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 59
Abbildung 20 PFDoDA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 60
Abbildung 21 PFBS– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 61
Abbildung 22 ADONA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 62
Abbildung 23 Lage der Untersuchungsstandorte von TFA und Verteilung der Messergebnisse 64
Abbildung 24 Bundesweit Verteilung und mittlere prozentuale Anteil von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS an der Summe-EFAS4 65
Abbildung 25 Mittlere prozentuale Anteil von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS an der Summe-EFAS4 im Alpenvorland 66
Abbildung 26 Summe-EFSA4– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 66
Abbildung 27 Bundesweit mittlere prozentuale Anteile der einzelnen PFAS-Verbindungen an der Summe-PFAS19 68
Abbildung 28 Summe-PFAS19– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung 68
Abbildung 29 PFAS in Acker-Oberböden vor und nach TOP-Assay 70
Abbildung 30 PFAS in Grünland-Oberböden vor und nach TOP-Assay 71
Abbildung 31 Prozentuale PFAS-Gehalte nach TOP-Assay im Vergleich zum Ausgangswert in Ackerböden und Spannweiten der erweiterten Messunsicherheiten 72
Abbildung 32 Prozentuale PFAS-Gehalte nach TOP-Assay im Vergleich zum Ausgangswert in Grünlandböden und Spannweiten der erweiterten Messunsicherheiten 73
Abbildung 33: Zusammenfassende Darstellung der Häufigkeit der PFAS-Nachweise in den untersuchten Bodenproben 80
Figure 34: Summary of the frequency of PFAS detections in the soil samples analysed 86
Abbildung 35 Verteilung der PFOA- und PFNA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 110
Abbildung 36 Verteilung der PFOS- und Σ-EFSA4- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 111
Abbildung 37 Verteilung der PFBA- und PFPeA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 112

Abbildung 38 Verteilung der PFHxA- und PFHpA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 113
Abbildung 39 Verteilung der PFDA- und PFUnDA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 114
Abbildung 40 Verteilung der Σ-PFAS19- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert) 115
Abbildung 41 Detektion und Quantifizierung von PFHxS- und PFDoDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums 118
Abbildung 42 Detektion und Quantifizierung von PFBS- und PFTrDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums 119
Abbildung 43 Detektion und Quantifizierung von PFTeDA- und PFHxDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums 120
Abbildung 44 Detektion und Quantifizierung von PFHpS- und ADONA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums 121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Methoden zur Bestimmung der Bodenkenngrößen 27
Tabelle 2 Übersicht der untersuchten PFAS-Verbindungen 28
Tabelle 3 Gradientenprogramm für die LC-Trennung von 30 PFAS-Spezies (C4-C18).....30
Tabelle 4 Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für PFAS-Gesamtgehalte im Boden 31
Tabelle 5 Erweiterte Messunsicherheit der Bestimmung von PFAS-Gesamtgehalten in Böden.....32
Tabelle 6 Nach Bundesländern differenzierte Anzahl der im ländlichen Raum untersuchten Acker- und Grünlandstandorte.....40
Tabelle 7 Ergebnisse des Signifikanztests für die Clusterung der PFAS-Gehalte nach Regionen 41
Tabelle 8 Ergebnisse des Signifikanztests für die Korrelation von PFAS- und Humusgehalten.....42
Tabelle 9 Ergebnisse des Signifikanztests für die Korrelation von PFAS-Gehalten und der Trockenrohdichte.....43
Tabelle 10 Nach Regionen und Humusklassen differenzierten Anzahl der im ländlichen Raum untersuchten Acker- und Grünlandstandort.....44
Tabelle 11 Regionale und bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summen EFSA4-PFAS und PFAS19 in Acker- und Grünland- Oberböden des ländlichen Raums - humusklassenübergreifend.....75
Tabelle 12 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA und PFOA sowie der Perfluorsulfonsäure PFOS in Acker- und Grünland- Oberböden des ländlichen Raums – humusklassenübergreifend 76
Tabelle 13 Hintergrundwerte für Vorläuferverbindungen und HFPA-DA(GenX).....77
Tabelle 14 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA, PFPeA und PFHxA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 94
Tabelle 15 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA, PFPeA und PFHxA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 95
Tabelle 16 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFHpA, PFOA und PFNA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 96
Tabelle 17 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFHpA, PFOA und PFNA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 97

Tabelle 18 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFDA, PFUnDA und PFDoDA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 98
Tabelle 19 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFDA, PFUnDA und PFDoDA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 99
Tabelle 20 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFTrDA, PFTeDA und PFHxDA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 100
Tabelle 21 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFTrDA, PFTeDA und PFHxDA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 101
Tabelle 22 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäure PFODA und Perfluorsulfonsäuren PFBS / PFHxS in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 102
Tabelle 23 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäure PFODA und Perfluorsulfonsäuren PFBS / PFHxS in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums.....103
Tabelle 24 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorsulfonsäuren PFHpS, PFOS und PFDS in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 104
Tabelle 25 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorsulfonsäuren PFHpS, PFOS und PFDS in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 105
Tabelle 26 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summen EFSA4-PFAS und PFAS19 in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 106
Tabelle 27 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summe EFSA4-PFAS und PFAS24 in Acker-Oberböden des ländlichen Raums 107
Tabelle 28 (Bundesweite) Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte des Ersatzstoffes ADONA in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raums 108

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ADONA	Ammoniumsalz der Perfluor-4,8-dioxa-3H-nonansäure
Ah	oberster Bodenhorizont unter Grünland- und Waldnutzung
Ap	oberster Bodenhorizont unter Ackernutzung
ASTM	American Society for Testing and Materials (internationale Normungsorganisation)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BB	Brandenburg
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BE	Berlin
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BG	Bestimmungsgrenze
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BZE	Bodenzustandserhebung
C	Kohlenstoff
$CaCl_2$	Calciumchlorid
Destatis	Statistisches Bundesamt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFSA	Europäische Nahrungsmittelbehörde
EtOAc	Ethylacetat
EU	Europäische Union
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
FKZ	Forschungskennzahl

Abkürzung	Erläuterung
Fraunhofer IME	Fraunhofer IME – Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
h	Humusklasse
H_2SO_4	Schwefelsäure
HB	Bremen
HE	Hessen
HFPO-DA (GenX)	Hexafluorpropylenoxiddimersäure bzw. seine prominenten Verbindungen
HGW	Hintergrundwerte
HH	Hamburg
HILIC	Hydrophile Interaktions-Flüssigkeitschromatographie
HK	Humusklasse
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IQR	Interquartilsabstand
ISO	International Organisation for Standardization
IUTA	Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V.
KA	Kartieranleitung
L/L	Flüssig-Flüssig (engl. Liquid/Liquid, bezogen auf Extraktionsverfahren)
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LANUK	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (jetzt LANUK)
LC	Flüssigkeitschromatographie (engl. Liquid Chromatography)
LC-MS/MS	Flüssigkeitschromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie
Ma-%	Masseprozent
Milli-Q-Wasser	Reinstwasser (Typ 1) mit einem spezifischen Widerstand von 18,2 MΩ·cm bei 25 °C

Abkürzung	Erläuterung
mM	Millimolar
mol/l	Mol pro Liter
MV	Mecklenburg-Vorpommern
Na_2CO_3	Natriumcarbonat
NaCl	Natriumchlorid
N-EtFOSA	N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamid
N-EtFOSAA	N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure
NI	Niedersachsen
N-MeFOSA	N-Methyl-Perfluoroctansulfonamid
N-MeFOSAA	N-Methyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure
NO	Nordost
ns	nicht signifikant
NW	Nordrhein-Westphalen
NW	Nordwest
NWG	Nachweisgrenze
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
p	berechneter Wahrscheinlichkeitswert (engl. probability value) zur Bestimmung der statistischen Signifikanz
P.	Perzentil
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCA	Principal Component Analysis
PE	Polyethylen
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanz(en)
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFCA	Perfluorcarbonsäuren
PFDA	Perfluordecansäure
PFDoDA	Perfluordodecansäure
PFDoDS	Perfluordodecansulfonsäure
PFDS	Perfluordecansulfonsäure

Abkürzung	Erläuterung
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFNA	Perfluornonansäure
PFOA	Perfluoroctansäure
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure
PFOSA	Perfluoroctansulfonamid
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure
PFPrA	Perfluorpropansäure
PFPrS	Perfluorpropansulfonsäure
PFSA	Perfluorsulfonsäuren
PFTeDA	Perfluortetradecansäure
PFTrDA	Perfluortridecansäure
PFTrDS	Perfluortridecansulfonsäure
PFUnDA	Perfluorundecansäure
PFUnDS	Perfluorundecansulfonsäure
Q-Q-Plots	Quantil-Quantil-Diagramm
QS	Qualitätssicherung
RC	regenerierte Cellulose
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RIVM	National Institute for Public Health and the Environment
RP	Rheinland-Pfalz
rpm	Umdrehungen pro Minute (engl. revolutions per minute)
RT	Retentionszeit
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland

Abkürzung	Erläuterung
SN	Sachsen
ST	Sachsen Anhalt
STS	Split tube sampler
TFA	Trifluoressigsäure
TH	Thüringen
TOC	gesamter organischer Kohlenstoffgehalt (total organic carbon)
TOP-Assay	Total Oxidizable Precursor-Assay
TQ-MS	Triple-Quadrupol-Massenspektrometer
TRD	Trockenrohdichte
TS	Trockensubstanz
TWI	Tolerable Weekly Intake
UBA	Umweltbundesamt
v/v	Volumenverhältnis
ZRM	zertifiziertes Referenzmaterial

1 Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind eine große Gruppe von chemischen Substanzen, die ausschließlich anthropogenen Ursprungs sind. Nach der erweiterten Definition der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) aus dem Jahr 2021 gehören PFAS zu einer sehr großen Stoffgruppe fluorierter Chemikalien. Demnach sind PFAS als Stoffe definiert, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- oder Methylen-Kohlenstoffatom enthalten. Basierend auf dieser Definition geht man von mehr als 10.000 PFAS-Verbindungen aus. PFAS werden anhand der Länge ihrer fluorierten Kohlenstoffkette in lang- und kurzkettige Verbindungen eingeteilt. Als langkettige PFAS gelten perfluorierte Carbonsäuren mit sieben oder mehr Kohlenstoffatomen (z. B. Perfluoroktansäure, PFOA) sowie perfluorierte Sulfonsäuren mit sechs oder mehr Kohlenstoffatomen (z. B. Perflluoroktansulfonsäure PFOS). Verbindungen mit kürzeren Ketten werden als kurzkettige PFAS bezeichnet. Zunehmend werden auch ultrakurzkettige PFAS betrachtet. Hierzu zählen PFAS mit sehr kurzen Kohlenstoffketten, typischerweise mit zwei bis drei Kohlenstoffatomen, wie beispielsweise Trifluoressigsäure (TFA). Aufgrund ihrer wasser-, schmutz- und fettabweisenden Eigenschaften werden und wurden sie in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen und Konsumgütern eingesetzt. PFAS sind außerdem hitzestabil und widerstandsfähig gegenüber Abbauprozessen. Die hohe Stabilität von PFAS hat eine Kehrseite: Einmal in die Umwelt gelangt, verbleiben die Stoffe dort über Jahrzehnte. PFAS werden deshalb auch Ewigkeitschemikalien genannt. Die Kettenlänge beeinflusst maßgeblich die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Stoffe. Langkettige PFAS weisen in der Regel eine höhere Hydrophobizität und Lipophilie auf, adsorbieren stärker an organische Materialien und Sedimente und besitzen ein höheres Bioakkumulationspotenzial. Kurzkettige PFAS sind dagegen besser wasserlöslich und mobiler in Böden, wodurch sie über das Boden-Sickerwasser leichter ins Grundwasser eingetragen werden können.

Aufgrund ihrer hohen chemischen Stabilität, ihrer weiten Verbreitung und ihrer teilweise gesundheitsschädlichen Eigenschaften, wie die Schwächung des Immunsystems, Leberschädigungen oder die Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit, stehen PFAS zunehmend im Fokus internationaler und europäischer Regulierungen. Die Herstellung und Verwendung von PFOA, PFOS, PFHxS, PFNA sowie weitere sogenannte langkettige PFAS ist seit 2010, 2020, 2022 bzw. 2025 mit dem Stockholmer Übereinkommen weltweit, mit Ausnahme weniger Einsatzbereiche, verboten. Über die Europäische Chemikalienverordnung (REACH) sind zusätzlich Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung von Perfluorhexansäure (PFHxA) sowie die Verwendung von PFAS in Feuerlöschschäumen beschränkt. Eine Beschränkung der gesamte Stoffgruppe unter dem Europäischen Chemikalienabkommen REACH ist derzeit in Bearbeitung.

Die Befassung mit der Belastung der Umwelt durch PFAS hat in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Hintergrund dafür sind die Herabsetzung der wöchentlich duldbaren Aufnahmerate von PFAS mit der Nahrung durch die Europäische Nahrungsmittelbehörde (EFSA) und die damit in Verbindung stehenden Höchstgehalte in bestimmten Lebensmitteln wie Fisch und Fleisch sowie die Aufnahme von PFAS in die EU-Trinkwasserverordnung. Ergänzend zu diesen produkt- und verbraucherschutzbezogenen Regelungen verfolgt die EU-Bodenstrategie für 2030 (Europäische Kommission, 2021) das Ziel, alle Böden in der Europäischen Union bis spätestens 2050 in einen gesunden Zustand zu versetzen. Zur Umsetzung dieser Strategie trat 2025 das EU Soil Monitoring Law (DIRECTIVE (EU) 2025/2360) in Kraft. Diese Richtlinie zielt

auf eine europaweit einheitliche Überwachung des Bodenzustands ab – einschließlich der Erfassung von Schadstoffen wie PFAS. Diese Entwicklung betont die Notwendigkeit verlässlicher Bewertungsmaßstäbe für bodenbezogene Risiken.

PFAS gelangen sowohl aus punktuellen als auch aus diffusen Quellen in den Boden. Zu den punktuellen Einträgen zählen insbesondere industrielle Emissionen sowie der Einsatz fluorhaltiger Feuerlöschschäume, etwa auf Flughäfen oder Übungsplätzen. Diffuse Einträge erfolgen hingegen vor allem über landwirtschaftliche Anwendungen wie Klärschlämme, Komposte und Düngemittel, über die Bewässerung mit belastetem Wasser sowie über atmosphärische Deposition, bei der PFAS aus der Luft über Regen oder Staub großflächig abgelagert werden. Aufgrund ihrer hohen Stabilität verbleiben PFAS anschließend langfristig im Boden und können sich dort anreichern. Von dort können sie ins Grundwasser gelangen oder über Nahrungs- und Futtermittel in die Nahrungskette übergehen und damit ein erhebliches Risiko für die menschliche Gesundheit darstellen.

Die in Deutschland in jüngster Zeit festgestellten PFAS-Schadensfälle verdeutlichen den Bedarf an geeigneten Bewertungsgrundlagen. Erhebliche Bodenverunreinigungen sind unter anderem auf PFAS-Verunreinigungen in Klärschlämmen und Komposten oder durch industrielle Emissionen etwa in Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zurückzuführen

In Deutschland bildet das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) zusammen mit der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) den rechtlichen Rahmen für die Bewertung und Sanierung von Bodenverunreinigungen. Für den Wirkungspfad Boden–Grundwasser existieren in der BBodSchV bereits Prüfwerte für bestimmte PFAS, wie z. B. PFOA und PFOS. Für die Wirkungspfade Boden–Mensch (z. B. über direkten Kontakt oder Inhalation von aufgewirbeltem Bodenstaub) und Boden–Nutzpflanze (PFAS-Transfer in Nahrungs- und Futtermittelpflanzen) liegen bislang jedoch keine PFAS-spezifischen Prüf- oder Vorsorgewerte vor.

Ein zentrales Element für die Bewertung des Vorkommens von PFAS und die Festlegung von Bodenwerten stellen Hintergrundwerte für Böden dar. Hintergrundwerte spiegeln die allgemein verbreiteten oder regional typischen Gehalte eines Stoffes oder einer Stoffgruppe in Böden wider. Mit ihrer Hilfe können wissenschaftlich fundierte Vorsorge- und Prüfwerte abgeleitet werden, die einerseits den vorsorgenden Bodenschutz stärken und andererseits die Ableitung von Maßnahmen rechtssicher in der Praxis unterstützen. Bei Erarbeitung von Maßstäben für die Bewertung von PFAS in Böden (Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte des Bodenrechts) dienen sie der Plausibilitätsprüfung von rechnerisch ermittelten Belastungsgrenzen.

Für die Ermittlung von Hintergrundwerten für PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums wurden im Rahmen der Ressortforschung des Bundesumweltministeriums zwei Projekte im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführt. Bundesweit wurden 605 Standorte beprobt und auf PFAS analysiert. Das Analytenspektum umfasste vierzehn Perfluorcarbonsäuren, fünf Perfluorsulfonsäuren und zwei PFOA-Ersatzstoffe. Zusätzlich wurden die Bodenproben auf 12 sogenannte Vorläufersubstanzen (auch Precursor oder polyfluorierte Stoffe genannt) untersucht. Diese können zu Perfluorcarbon und -sulfonsäuren abgebaut werden. Um weitere unbekannte Vorläuferverbindungen zu erfassen, wurde an Teilproben der TOP-Assay (Total Oxidizable Precursor Assay) durchgeführt.

Die ist ein analytisches Verfahren zur Erfassung von PFAS-Vorläuferverbindungen, die mit klassischen Zielanalysen nicht direkt messbar sind.

Ziel dieses Berichts ist es, zum aktuellen Kenntnisstand hinsichtlich der Hintergrundbelastung von PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums beizutragen, entsprechende bundesweite Hintergrundwerte darzustellen sowie methodische Ansätze zu ihrer Erhebung zu beschreiben.

Mit diesem Bericht werden erstmalig bundesweite Hintergrundwerte für Gesamtgehalte von PFAS in Acker- und Grünlandoberböden des ländlichen Raums vorgelegt. Damit wird eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Fortschreibung des Bodenschutzrechts geschaffen.

2 Methodik

2.1 Fachliche Grundlagen

Für die Ableitung von Hintergrundwerten für Böden in Deutschland stellt der LABO-Bericht „Hintergrundwerte für anorganische und organische Schadstoffe“ (LABO, 2017) eine wesentliche fachliche Grundlage dar. Der Bericht definiert die zentralen Begriffe „Hintergrundgehalt“ und „Hintergrundwert“ und beschreibt, welche Anforderungen an die Planung und Durchführung von Untersuchungsprogrammen zu beachteten sind, um Daten für die Ableitung von Hintergrundwerten zu erheben. Zudem werden methodische Anforderungen an die chemische Analyse und statistische Auswertung gestellt, um bundesweit vergleichbare Hintergrundwerte zu gewährleisten.

Begriffsbestimmungen und Erläuterungen (LABO, 2017)

Hintergrundgehalte
Schadstoffgehalt eines Bodens, der sich aus dem geogenen (natürlichen) Grundgehalt eines Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammensetzt (BBodSchV, 1999).

- Schadstoffe sind Stoffe und Zubereitungen, die auf Grund ihrer Gesundheitsschädlichkeit, ihrer Langlebigkeit oder Bioverfügbarkeit im Boden oder auf Grund anderer Eigenschaften und ihrer Konzentrationen (Gehalte) geeignet sind, den Boden in seinen Funktionen zu schädigen oder sonstige Gefahren hervorzurufen (BBodSchV, 1999)
- Die Formulierung „ubiquitär/diffus" grenzt den Hintergrundgehalt von solchen Gehalten ab, die durch lokal erhöhte Stoffeinträge (Emittenteneinfluss, Altlasten) gegenüber den Hintergrundgehalten erhöht sind. Sie unterstellt damit, dass der bezeichnete Hintergrundgehalt typisch bzw. repräsentativ für bestimmte Böden, Gebiete oder auch Nutzungen ist und nicht durch lokal erhöhte (geogene, chalkogene und/oder anthropogene, z.B. bewirtschaftungsbedingte) Werte beeinflusst wird.
- Für die meisten organischen Schadstoffe können lithogene oder chalkogene Komponenten ausgeschlossen werden, da diese Stoffe im Wesentlichen nicht als Ausgangsmaterialien der Bodenbildung vorkommen. Natürliche Ursachen (z.B. PAK-Entstehung bei Waldbränden, Dioxine in tertiären Lagerstätten) sind in der Regel vernachlässigbar. Der Hintergrundgehalt organischer Schadstoffe ist daher weitgehend identisch mit den ubiquitären Einträgen, die durch pedogenetische Prozesse und Nutzungseinflüsse im Boden umverteilt werden.

Hintergrundwert
Hintergrundwerte sind repräsentative, statistisch abgeleitete Werte für allgemein verbreitete Hintergrundgehalte eines Stoffes oder einer Stoffgruppe in Böden.

- Hintergrundwerte für Böden beruhen auf den ermittelten Hintergrundgehalten und bezeichnen unter Angabe der statistischen Kenngrößen sowie der Bezugsgrößen wie Ausgangsgestein der Bodenbildung, Bodeneigenschaften, Bodenhorizont, Nutzung und Gebietsdifferenzierung die repräsentativen Stoffgehalte in Böden.

PFAS-spezifische Anforderungen an die Erhebung von Hintergrundgehalten und Ableitung von Hintergrundwerten sind bislang noch kein Bestandteil des LABO-Berichts. Daher wird hier ergänzend auf den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand und vorliegende Normen zurückgegriffen.

2.2 Auswahl der Untersuchungsstandorte

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten zur Bestimmung von bundesweiten Hintergrundwerten für PFAS in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums wurden bundesweit die Oberböden von 605 Standorten untersucht, aufgeteilt auf 401 Acker- und 204 Grünlandstandorte. Ziel der Standortauswahl war eine weitestgehend repräsentative Erfassung von PFAS-Hintergrundgehalten für potentiell relevante Bezugsgrößen (Gebietstyp, Bodennutzungen, Humusgehalt, regionale Einflüsse). Bei der Auswahl der Untersuchungsstandorte galt es sicherzustellen, dass für die einzelnen Raumeinheiten jeweils ein ausreichender Probenumfang zur Verfügung stand, um statistisch belastbare Auswertungen zu ermöglichen. Probenahmeplanung und Probenahme erfolgte durch das *Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME* im Rahmen des UBA-Forschungsprojekts „Hintergrundwerte für PFAS und (Mikro)Kunststoffe - bundesweit repräsentative Beprobung von landwirtschaftlich genutzten Böden“ (FKZ 3720 72 288 0).

Gebietstyp: Vorwiegend ländlicher Raum

Gebietsspezifische Immissionssituationen – z.B. in Regionen mit hoher Industriedichte oder Ballungsräume versus ländliche Räume – können unmittelbaren auf die Hintergrundgehalte in Oberböden wirken. Es wird empfohlen eine Differenzierung der Hintergrundwerte für vorwiegend ländliche geprägte Räume und Verdichtungsräume vorzunehmen (LABO, 2017). Die Abgrenzung erfolgt entsprechend der vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung ausgewiesenen Verdichtungsräume (BBSR, 2023).

Nutzungsarten: Acker, Grünland

Nutzungsspezifische Stoffeinträge und Bearbeitungstiefen beeinflussen maßgeblich die Verteilung von Schadstoffen in Oberböden. So werden in Ackerböden eingetragenen Schadstoffe durch eine regelmäßige Bodenbearbeitung bis in eine Pflugtiefe von ca. 30 cm eingemischt und verdünnt. Dem gegenüber reichern sich in Grünlandböden ohne zwischenzeitlichem Umbruch (Dauergrünland) die Schadstoffe insbesondere in den oberen 10 cm an. Waldböden weisen meist höhere Schadstoffgehalte auf, was sich u.a. auf den höheren Auskämmeffekt der Vegetation von luftgetragenen Stoffeinträgen (Interzeption) und eine in der Regel geringere Lagerungsdichte der Oberböden zurückführen lässt.

Die Aufteilung der Beprobung auf 401 Acker- und 204 Grünlandstandorte (Dauergrünland) entspricht in etwa dem flächenhaften Verhältnis der Acker- und Grünlandnutzung in Deutschland.

Humusgehalte

Persistente organische Schadstoffe binden generell stark an die organische Bodensubstanz. Für die Ableitung von PFAS-Hintergrundwerten war daher zu prüfen, ob diese Eigenschaft auch für diese Stoffgruppe maßgeblich ist. Vor diesem Hintergrund zielte die Probenahmeplanung darauf ab, möglichst für jede gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2009) definierte Humusklasse (HK) hinreichende Stichprobenumfänge ($n > 20$) zur Verfügung zu stellen.

Auf eine Beprobung von Ackerstandorten mit Humusgehalten > 15 % (Humusklassen 6 und 7) wurde auf Grund ihrer geringen Flächenanteile und mit Blick auf die begrenzte Gesamtprobenzahl verzichtet.

Räumliche Verteilung der Untersuchungsstandorte

Zur Gewährleistung einer flächenhaft repräsentativen Verteilung der Probenahme-Standorte wurden zunächst für die Verteilung der zu beprobenden Acker- und Grünlandstandorte bundeslandspezifische „Faustzahlen“ ermittelt. Grundlagen hierfür waren

- die prozentualen Anteile von Acker- und Grünlandflächen der einzelnen Bundesländer an der jeweiligen Gesamtfläche dieser Nutzungsarten in Deutschland (Destatis, 2019) und
- die prozentualen Anteile des Vorkommens der Humusklassen in Acker- und Grünlandböden in Deutschland und die jeweiligen Anteile der Bundesländer (BGR, 2007).

Eine alleinige Betrachtung der prozentualen Verteilung der Humusklassen hätte bei flächenarmen Klassen zu einem zu geringen Stichprobenumfang (weniger als 20 Proben) geführt. Daher wurde in diesen Fällen im Rahmen der Probenahme-Planung eine Aufstockung von zu untersuchenden Standorten zu Lasten der flächenreicheren Klassen vorgenommen.

Die für die Bundesländer ermittelten „Faustzahlen“ dienten den für die Probenahme zuständigen Forschungsnehmer, den Länderbehörden, die sich an der Standortauswahl beteiligt haben und anderen Institutionen als Grundlage für eine möglichst gezielte und räumlich gut verteilte Auswahl von Probenahme-Standorten.

Ausschlusskriterien

Entsprechend der Zielstellung der Untersuchungen waren folgende Standorte von den Untersuchungen auszuschließen:

- Verdichtungsräume, Stadtstaaten (Hamburg, Bremen, Berlin)
- Böden in rezenten Auen,
- Sonderkulturen (z.B. Obst-, Wein- oder Hopfenanbau),
- Nähe zu Punktquellen,
- Altlasten, Altablagerungen, (potentiell) schädliche Bodenveränderungen, hierzu zählen auch PFAS-Schadensfälle infolge Klärschlamm-Aufbringung,
- Standorte im unmittelbaren Einflussbereich von Straßen (Mindestabstand > 20 Meter),
- Standorte in Gebieten mit bekannten, lokal erhöhten PFAS-Gehalten in Böden oder Grundwasser.

Mit Klärschlamm und/oder Kompost beaufschlagte Standorte (mit Ausnahme o.g. Schadensfälle) wurden nicht explizit von der Beprobung ausgeschlossen. Zum einen war die Klärschlammnutzung in der Vergangenheit eine flächenhaft weitverbreitete Bewirtschaftungsform. Aufgrund ihres deutlichen Rückgangs ist davon auszugehen, dass untypisch hoch belastete Proben über Ausreißer- und Extremwerttests erkannt werden und eine entsprechende Bereinigung des Datensatzes möglich ist. Ein systematischer Ausschluss von Standorten mit Klärschlamm- oder Kompostaufbringungen war zudem faktisch nicht möglich, da entsprechende Informationen nur in seltenen Fällen für das Umweltbundesamt oder vom Umweltbundesamt beauftragte Institutionen verfügbar sind.

2.3 Probenahme, Probenvorbereitung und Bestimmung von Bodenkenngrößen

PFAS-spezifische Anforderungen an Probenahme und Probenvorbereitung

PFAS sind häufige Bestandteile alltäglicher Gebrauchsgegenstände. Um eine Kontamination der Proben zu vermeiden, war daher von der Probenahme bis zur Probenvorbereitung der Einsatz PFAS-haltiger Materialien so weit wie möglich auszuschließen. Da gleichzeitig Bodenproben für Kunststoffuntersuchungen entnommen wurden, war die Verwendung von Kunststoffen bei den Arbeitsmaterialien ebenfalls so weit wie möglich zu vermeiden.

Als mögliche Kontaminationsquellen während Probenahme, Probentransport und Probenaufbereitung wurden folgende Gebrauchsgüter identifiziert:

- Gefäße zur Aufbewahrung und Trocknung von Bodenproben,
- Kunststoffprodukte und PFAS in Kleidung,
- Kunststoffprodukte im Schlagkopf des Schonhammers.

Folgende einschlägige Anpassungen wurden für die Probenahme vorgenommen:

- Für Transport und Lagerung ausschließlich Verwendung von verschließbaren Metallbehältern.
- Die Trocknung von Proben erfolgte in Schalen aus Edelstahl.
- Verwendung von Kleidung aus Baumwollfasern. Problematisch ist dies bei Regen, da dann kein ausreichender Regenschutz gewährleistet werden kann. Daher wurden bei der Probenahmeplanung die Witterungsverhältnisse berücksichtigt und versucht, Perioden mit Niederschlag so weit möglich zu vermeiden. Regenschutz war deshalb nur vereinzelt nötig und es kamen dabei nur reine Kunststoffmaterialien und keine Funktionskleidung mit PFAS zum Einsatz. Die Kontaminationsgefahr durch den Einsatz von Kunststoffjacken wird als eher gering eingeschätzt, da es zu keiner Faserbildung bei diesen Materialien kommt.
- Verwendung von Baumwollhandschuhen, unter die zum Schutz gegen Nässe normale Laborhandschuhe aus Kautschuk angezogen wurden. Alle verwendeten Baumwollhandschuhe wurden vor dem ersten Einsatz mehrfach gewaschen.
- Zum Eintreiben der Split-Tube-Probenahmegeräte wurden Schonhämmer mit Schlagköpfen aus Nylon verwendet. Um eine Kontamination der Proben durch vom Schlagkopf abplatzende Partikel zu vermeiden, wurde die Fläche um den Probenahmepunkt mit einem Baumwolltuch abgedeckt. Dies ist allerdings nur praktikabel, wenn kein oder nur ein niedriger Pflanzenbestand auf der Fläche vorliegt. Auf Acker-Standorten wurde daher die Probenahmen bevorzugt nach der Ernte oder im zeitigen Frühjahr vor starkem Längenwachstum durchgeführt. Auf Grünlandflächen wurde bei hohem Wuchs teilweise heruntergeschnitten oder der Grünlandbestand flachgetreten.
- Der Forschungsnehmer untersuchte Möglichkeiten zum Ersatz der üblichen Nylonschlagköpfe der Schonhämmer und versah diese versuchsweise mit einer Aluminium-Ummantelung. Aufgrund der im Vergleich zu Nylon geringeren Dämpfung der Schlagenergie führt diese Modifikation jedoch zu einer starken Belastung des Ellenbogens. Aus gesundheitlichen Gründen erwies sich der so angepasste

Schonhammer für intensive Probenahme-Kampagnen als ungeeignet und wurde lediglich vereinzelt auf Ackerstandorten genutzt, wenn die oben beschriebene Abdeckung des Pflanzenbestandes nicht möglich war.

Probenahme

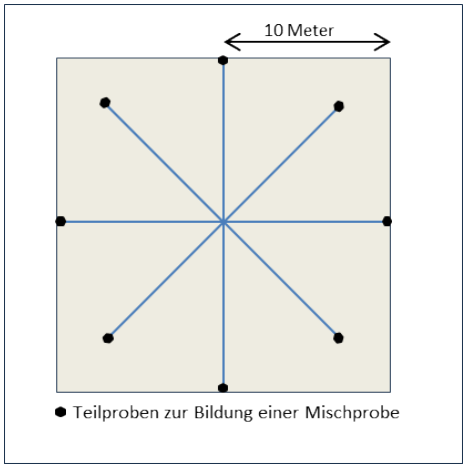
Zu beproben waren bei Ackerböden der Ap-Horizont (0-max. 30 cm) und bei Grünland die Tiefenstufe 0-10 cm (i.d.R. ausschließlich Ah-Horizont). Die Beprobungstiefen reichen daher nutzungsabhängig i.d.R. bei Ackerböden bis max. 30 cm und bei Grünlandböden bis max. 10 cm.

Die Entnahme der Bodenproben wurde zwischen Oktober 2021 und September 2024 durchgeführt. Um die bundesweite Beprobung logistisch zu bewältigen, wurde die Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) durch das Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) unterstützt. Während die FhG rund 60 Prozent der Proben entnahm, übernahm IUTA die verbleibenden Standorte. Zur Qualitätssicherung und Standardisierung erstellte die FhG eine Arbeitsanweisung und führte drei Schulungen für das IUTA-Personal durch.

Die Probennahme erfolgte mittels Split-Tube-Sampler (STS) mit einem definierten Durchmesser von 4,8 cm. Aus dem Durchmesser des STS, der jeweiligen Probenahmetiefe und den im Labor bestimmten Trockensubstanzgehalten konnten die Trockenrohdichte des Bodens bestimmt werden. Diese ist u.a. zur Interpretation von Schadstoffgehalten in Böden hilfreich. Weiterhin können so die Vorräte von Schadstoffen in Böden berechnet werden und die Beachtung der Lagerungsdichte ermöglicht auch einen besseren Vergleich von Schadstoffgehalten in Böden unterschiedlicher Nutzungsarten und Ausprägung (mineralische/organische Böden).

Die Beprobung erfolgte nach der Satellitenmethode und entspricht der Vorgehensweise bei der Bodenzustandserhebung im Wald (Wellbrock, 2022). Dabei wird, von einem zentralen Punkt ausgehend, die zu beprobende Fläche kreisförmig mit einem Radius von 10m in mindestens acht Segmenten unterteilt und an den jeweiligen Endpunkten Teilproben entnommen (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1 Probenahmeschema der Satellitenmethode



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Für die Untersuchung auf die Gehalte an PFAS, weitere organische Schadstoffe und Mikroplastik sowie die Einlagerung von Rückstellproben sollten pro Flächen ca. 10 kg Probenmaterial entnommen werden. In der Regel waren hierfür auf Ackerflächen 10 bis 15 und auf Grünlandflächen, bedingt durch die geringere Beprobungstiefe, 30 bis 40 Einstiche/Teilproben nötig.

Die Teilproben wurden zu einer Mischprobe vereint, grobe Bestandteile entfernt, vorgesiebt (10 mm) und homogenisiert. Bei hoher Feuchte der Bodenproben und lehmig-tonigen Böden erfolgte eine Vorsiebung und Homogenisierung im Labor. Anschließend wurde die Mischprobe in verschließbaren Metallbehälter gekühlt bei 6- 9°C ins Aufbereitungslabor (Fraunhofer IME) überführt. War keine sofortige Probenaufbereitung im Labor möglich, wurden die Proben bei > -18°C eingefroren.

Auf Standorten, bei denen keine detaillierten Standortbeschreibungen vorlagen, wurde eine vereinfachte Bodenuntersuchung durchgeführt. Dabei erfolgte am zentralen Probenahmepunkt mittels Bohrstockansprache die Ermittlung von Angaben zu Bodenhorizonten, deren Mächtigkeit, Bodenart, Bodenfarbe und dem Gehalt an Carbonaten.

Probenvorbereitung

Im Labor erfolgte eine Bestimmung der Trockensubstanzgehalte der feldfrischen Bodenproben nach DIN EN 15934: 2012-11 und die Siebung der Proben auf die Fraktion < 2mm. Die unmittelbar für die Untersuchung von PFAS vorgesehene Probenmenge (2 kg) wurde bei 40 °C luftgetrocknet und es erfolgte eine erneute Bestimmung der Trockensubstanzgehalte.

Für die Untersuchungen der PFAS-Gehalte im Feststoff wurden die Bodenproben entsprechend DIN 38414-14:2011 behandelt. Auf eine Mahlung und eine Siebung < 200µm wurde verzichtet, da im Rahmen der Normentwicklung die Vergleichbarkeit der gesiebten Proben (<2 mm) und der gemahlenen und anschließend kontrollgesiebten Proben (< 250µm) gezeigt werden konnte.

Für zukünftige Fragestellungen wurden weitere ca. 2 kg Probenmaterial bei < -18 °C als Rückstellprobe feucht eingefroren und am Fraunhofer IME eingelagert.

Bestimmung von Bodenkenngrößen

Zur Charakterisierung der Probenahmestandorte und Interpretation der Schadstoffgehalte wurden der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff, der Humusgehalt, der pH-Wert, die Bodenart, die Korngrößenverteilung und die Trockenrohdichte nach den in Tabelle 1 genannten Verfahren bestimmt.

Tabelle 1 Methoden zur Bestimmung der Bodenkenngrößen

Kenngröße	Methode	Verfahrenshinweis
gesamter organischer Kohlenstoffgehalt (TOC)	DIN EN 15936: 2022-09	Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) durch trockene Verbrennung
Humusgehalt	Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2009)	Berechnet aus dem TOC-Gehalt*1,72 bei Mineralböden bzw. TOC-Gehalt*2 bei organischen Böden.
pH-Wert	DIN EN ISO 10390:2022-08	Suspension der feldfrischen oder luftgetrockneten Bodenprobe in $CaCl_2$-Lösung; Konzentration ($CaCl_2$): 0,01 mol/l
Bodenart	Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2009)	Fingerprobe im Gelände
Korngrößen-verteilung	Guideline ASTM D422-63 (2007), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Diese Norm stellt die aktuelle Entsprechung zu DIN EN ISO 17892-4: 2017-04 dar.	Die Verteilung von Partikelgrößen größer als 75 Mikrometer wird durch Sieben bestimmt, die Verteilung von Partikelgrößen kleiner als 75 Mikrometer wird durch einen Sedimentationsprozess mit einem Aräometer bestimmt wird.
Trockenrohdichte		Bestimmung anhand des Durchmessers des Split-Tube-Samplers, der Probenahmetiefe und des im Labor bestimmten Trockensubstanzgehalts der Bodenproben

2.4 PFAS-Analytik

Die Untersuchungen der Bodenproben zur Bestimmung von PFAS-Gehalten und des TOP Assay in den Bodenproben wurden von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Rahmen eines Ressortforschungsprojekts des Bundesumweltministeriums durchgeführt. Detaillierte Informationen zu den Untersuchungsmethoden werden im Abschlussbericht „Bundesweite Hintergrundwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) und weitere Schadstoffe in Böden“ (Piechotta, C. et al., 2027) dargestellt.

2.4.1 Untersuchungsspektrum

Tabelle 2 enthält eine Übersicht der in den Bodenproben analysierten PFAS-Verbindungen.

Tabelle 2 Übersicht der untersuchten PFAS-Verbindungen

Substanz	Abkürzung	Summenformel	CAS-Nummer
Perfluorcarbonsäuren			
Trifluoressigsäure	TFA (C2)	C2HF3O2	76-05-01
Perfluorbutansäure	PFBA (C4)	C4HF7O2	375-22-4
Perfluorpentansäure	PFPeA (C5)	C5HF9O2	2706-90-3
Perfluorhexansäure	PFHxA (C6)	C6HF11O2	307-24-4
Perfluorheptansäure	PFHpA (C7)	C7HF13O2	375-85-9
Perfluoroctansäure	PFOA (C8)	C8HF15O2	335-67-1
Perfluornonansäure	PFNA (C9)	C9HF17O2	375-95-1
Perfluordecansäure	PFDA (C10)	C10HF19O2	335-76-2
Perfluorundecansäure	PFUnDA (C11)	C11HF21O2	2058-94-8
Perflurododecansäure	PFDoDA (C12)	C12HF23O2	307-55-1
Perfluortridecansäure	PFTrDA (C13)	C13HF25O2	72629-94-8
Perfluortetradecansäure	PFTeDA (C14)	C14HF27O2	376-06-7
Perfluorhexadecansäure	PFHxDA (C16)	C16HF31O2	67905-19-5
Perfluoroctadecansäure	PFODA (C18)	C18HF35O2	16517-11-6
Perfluorsulfonsäuren			
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS (C4)	C4HF9O3S	375-73-5
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS (C6)	C6HF13O3S	355-46-4
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS (C7)	C7HF15O3S	375-92-8
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS (C8)	C8HF17O3S	1763-23-1
Perfluorundecansulfonsäure	PFDS (C10	C10HF21O3S	335-77-3
weitere PFAS-Verbindungen (Vorläufer, Ersatzstoffe)			
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	C8H2F17NO2S	754-91-6
N-Methyl-Perfluoroctansulfonamid	N-MeFOSA	C9H4F17NO2S	31506-32-8
N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamid	N-EtFOSA	C10H6F17NO2S	4151-50-2
N-Methyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure	N-Me-FOSAA	C11H6F17NO4S	2355-31-9
N-Ethyl-Perfluoroctansulfonamidoessigsäure	N-EtFOSAA	C12H8F17NO4S	2991-50-6
6:2 Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTS (H4PFOS)	C8H5F13O3S	27619-97-2
8:2 Fluortelomersulfonsäure	8:2 FTS	C10H5F17O3S	39108-34-4
9-Chlorohexade-cafluoro-3-oxanonane-1-sulfonic acid	9Cl-PF3ONS	C8HClF16O4S	756426-58-1
8:2 Ungesättigte Fluortelomersäure	8:2 FTUCA	C10H2F16O2	70887-84-2
8:2 Polyfluoralkylphosphorsäurediester	8:2 diPAP	C20H9F34O4P	678-41-1
Hexafluorpropylenoxiddimersäure	HFPO-DA/ FRD-903/ GenX	C6HF11O3	13252-13-6
Perfluor-4,8-dioxa-3H-nonansäure	ADONA (DONA)	C7H2F12O4	919005-14-4

Neben den Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren wurden auch 10 Vorläufersubstanzen (PFOSA, N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA, 6-2-FTS, 8-2-FTS, 9Cl-PF3ONS, 8:2 FTUCA, 8:2 diPAP)[1] sowie zwei PFOA-Ersatzstoffe (GenX und ADONA)[2] untersucht. Die Auswahl entspricht der in ISO 21675:2019-10 gelisteten Verbindungen zzgl. TFA. Bei der Bestimmung der PFAS-Gesamtgehalte und des TOP-Assays wird die Summe aller verzweigten und unverzweigten Isomere der jeweiligen PFAS-Spezies (z.B. PFOS) erfasst.

Bis auf TFA wurden alle genannten Analyten in den 605 Bodenproben untersucht; TFA wurde an 93 Proben des ländlichen Raums analysiert. Der TOP-Assay wurde an 48 Proben (Teilmenge der TFA-Proben) durchgeführt, um darzustellen, ob zusätzlich zu den in Tabelle 2 genannte Vorläufersubstanzen weitere Vorläufer in den Böden vorhanden sind. Kriterien für die Auswahl von Proben für diese orientierenden Untersuchungen waren insbesondere: Berücksichtigung verschiedener Regionen, flächenhaft dominierende Humusklassen, Vorkommen von Vorläuferverbindungen und überwiegend mittleres-höheres Belastungsniveau von PFAS-Gesamtgehalten (C4-C10), um die Wahrscheinlichkeit der Quantifizierung der untersuchten Substanzen zu erhöhen.

2.4.2 Bestimmung von PFAS-Gesamtgehalten in Böden

Für die Untersuchungen der kurz- und langkettigen **PFAS-Gesamtgehalte (C4-C18)** im Feststoff wurden Bodenextrakte aus den bei 40 C luftgetrockneten Proben nach DIN 38414-14: 2011 hergestellt (siehe auch Kapitel 2.3). Die PFAS-Verbindungen wurden nach DIN 38414-14: 2011 mittels LC-MS/MS (Agilent 6495C TQ-MS mit 1290 Infinity II HPLC) identifiziert und mittels der jeweiligen isotopenmarkierten internen Standards quantifiziert.

Die Substanzen wurden aus der trockenen und homogenisierten Probe mit Methanol durch Ultraschall unterstütze Extraktion herausgelöst. Anschließend wurden die Analyten über eine Gradientenelution mittels Flüssigchromatographie (HPLC) separiert und die einzelnen Spezies mittels eines massenselektiven Detektors (Triple-Quadrupol-Massenspektrometer) identifiziert und quantifiziert. Hierzu wurden mindestens 0,5 g bis maximal 5 g einer Probe in einem 15 ml Zentrifugengefäß mit konischer Spitze (PE) mit einem Mix an isotopenmarkierten PFAS dotiert und mit Methanol überschichtet (Menge variiert je nach Bodeneinwaage). Die Proben wurden mit in einem Gestell in das Ultraschallbad bei einer Badtemperatur von 40°C gesetzt und für 30 min mit Hilfe der Ultrascheinwirkung extrahiert. Danach erfolgt wieder die Durchmischung mittels eines Reagenzglasschüttlers und die nochmalige Extraktion mittels Ultraschallbad für weitere 30 min. Abschließend wurden die Proben kräftig durchmischt und zum Sedimentieren des Probenmaterials für ca. 1 h bei Raumtemperatur stehen gelassen. Ein Aliquot des Proben-extraktes von ca. 1 ml wurde über einen Spritzenmembranfilter mit einer Porengröße von 0,45 µm aus regenerierter Cellulose (RC) in ein Vial filtriert. War eine zusätzliche Reinigung von Probenextrakten notwendig, wurden 200 µl Probenextrakt auf 40 ml MilliQ-Wasser verdünnt und analog zur Norm DIN 38407-42: 2011 mittels eines schwachen Anionenaustauschers aufgearbeitet. Die Messlösungen müssen in einem Lösemittelgemisch von Wasser/Methanol 50%/50% (v/v) vorliegen. Dafür wurden 500 µl des gewonnenen Extrakts in ein Messvial, in welches vorher 500 µl Milli-Q Wasser vorgelegt worden sind, gegeben. Die Lösung wurde mittels Reagenzglasschüttler homogenisiert und damit nun für die Analyse mittels LC-MS/MS vorbereitet. Zur Überprüfung der Genauigkeit wurde eine von der Kalibrierung unabhängige Standardlösung hergestellt. Zur weiteren Überprüfung wurde eine Kontrollkarte geführt, in

[1] Vorläufersubstanzen sind unvollständig fluorierte Verbindungen (Polyfluoralkylsubstanzen), die durch biologischen oder chemischen Abbau zu langlebigen Perfluoralkylsäuren (PFAAs) wie Perfluorcarbonsäuren und Perfluorsulfonsäuren transformieren.
[2] ADONA und GenX wurden ab den späten 2000er-Jahren (ca. 2008/2009) als strukturell modifizierte Ersatzstoffe für die regulierte PFOA in der Fluorpolymer-Herstellung eingeführt.

welcher fünf ausgewählte PFAS-Spezies messtäglich kontrolliert wurden. Die Auftrennung der Analyten in der HPLC erfolgte mit Wasser mit 10 mM Ammoniumacetat (A) und Methanol (B) als Laufmittel. Als Chromatografie-Säule wurde eine Zorbax Eclipse Plus C18 100 mm x 3 mm, 1,8 µm (Agilent) mit optionaler Vorsäule Zorbax Eclipse Plus C18 100 mm x 3 mm, 1,8 µm (Agilent) verwendet. Das Gradientenprogramm ist in Tabelle 3 dargestellt. Das Injektionsvolumen beträgt 50 µl bei einer Flussrate von 0,4 ml/min und einer Säulentemperatur von 40°C.

Tabelle 3 Gradientenprogramm für die LC-Trennung von 30 PFAS-Spezies (C4-C18)

Zeit (min)	A (%)	B (%)
0,00 – 1,00	85	15
1,00 – 1,50	45	55
1,50 – 5,50	30	70
5,50 – 7,00	20	80
7,00 – 12,00	0	100
12,00 – 14,40	0	100
14,40 – 14,50	85	15
14,50 – 17,00	85	15

Zur Qualitätssicherung (QS) der Analysendaten und zur Absicherung der Messverfahren wurde ein zertifiziertes Referenzmaterial in regelmäßigen Intervallen gemessen. Verwendet wurde das zertifizierte Referenzmaterial “ISO 21675 - Native Stock Solution, Wellington Laboratories” (Wellington Laboratories, 2020), welches alle 30 Zielanalyten (C4-C18) in der Konzentration 100 ng/ml enthält. Nach sukzessiver Verdünnung kann dieses ZRM als QS- bzw. Kontrollstandard eingesetzt werden. Darüber hinaus werden sämtliche Reagenzien und Lösemittel regelmäßig auf mögliche Blindwerte getestet.

Für die Bestimmung der **TFA-Gesamtgehalte** wurde die folgende Methode angewandt:

- Die Extraktion von TFA erfolgte unter Verwendung einer wässrigen Natriumcarbonat (Na_2CO_3) –Lösung mit einem Extraktionsmittel-/Feststoff-Verhältnis von 4:1. Dazu wurden zunächst 2 g der zu untersuchenden Probe mit einer 13C2-TFA internen Standardlösung sowie einer 2%igen wässrigen Natriumcarbonat-Lösung (8 mL) versetzt, mittels Reagenzglasschüttler homogenisiert sowie mittels Ultraschallextraktion (30 min, RT) und nachfolgender Schüttelextraktion (Horizontalschüttler, 30 min, 300 min-1) extrahiert. Der wässrige Extrakt wurde anschließend mit Ethylacetat (EtOAc) überschichtet und mit festem Natriumchlorid (NaCl) ausgesalzt. Für den Übergang von TFA in die organische Phase ist die protonierte TFA-Form erforderlich. Die Protonierung wird durch Ansäuern der Lösung mit konzentrierter Schwefelsäure (H_2SO_4) auf einen pH-Wert < 1 erreicht. Die Flüssig-Flüssig (L/L) -Extraktion erfolgt durch erneute Schüttelextraktion (Horizontalschüttler, 10 min, 300 min-1). Zur Verbesserung der Phasentrennung wurde abschließend zentrifugiert (4000 rpm (g-Zahl: 3828); 22 °C; 5 min). Die obere EtOAc-Phase wurde nun für die nachfolgende Messung verwendet.
- Die instrumentelle TFA-Messung erfolgt mittels Flüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS; Agilent 6495C TQ-MS mit Agilent 1290 Infinity II HPLC). Zur chromatographischen Trennung wurde eine HILIC-Säule (Restek Raptor Polar X (2,1 mm × 30 mm, Partikelgröße 2,7 µm)) verwendet. Die Quantifizierung erfolgt auf Basis einer 7-Punkt Kalibrierung unter Verwendung eines zertifizierten nativen TFA-Standards

und eines zertifizierten 13C2-TFA isotopenmarkierten internen Standards. Die TFA-Identifizierung in den Messlösungen der Bodenproben erfolgt durch Vergleich der Retentionszeit mit dem authentischen TFA-Standard sowie durch Vergleich der Quantifier/Qualifier-Verhältnisse von Probe und Standard. Die zur Identifikation von TFA/13C2-TFA sowie zur Evaluierung der Selektivität und Spezifität des Verfahrens eingesetzten Referenzstandards wurden gemäß den Richtlinien der ISO/IEC 17025 (AT-1339) und ISO 17034 (AR-1463) zertifiziert. Nähere Informationen zur Bestimmung der TFA-Gesamtgehalte in den Bodenproben können Scholl, J. et al. (2025) entnommen werden.

Die Ermittlung der **Nachweis- und Bestimmungsgrenzen** für alle PFAS-Verbindungen erfolgte gemäß der in der DIN 32645:2008 beschriebenen Kalibriergeradenmethode. Die Nachweisgrenze (NWG) definiert den untersten Wert eines Messverfahrens, bis zu dem ein Analyt mit einer hinlänglichen Genauigkeit nachgewiesen werden kann. Die Bestimmungsgrenze (BG) definiert den Mindestgehalt eines Analyten, der unter Berücksichtigung einer festgelegten Präzision quantifiziert werden kann. Zur Quantifizierung von Proben mit geringer Belastung wurden die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen gegenüber DIN 38414-14:2011 sehr deutlich abgesenkt. Im Normverfahren liegt der untere Anwendungsbereich für PFAS (ohne TFA) bei 10 µg/kg Trockenmasse. Die erreichten Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für die Ermittlung von PFAS-Gesamtgehalten in dem angewendeten Verfahren können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4 Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für PFAS-Gesamtgehalte im Boden

	Nachweisgrenze [µg/kg TS]	Bestimmungsgrenze [µg/kg TS]		Nachweisgrenze [µg/kg TS]	Bestimmungsgrenze [µg/kg TS]
TFA	0,048	0,162	**PFHpS**	0,0057	0,018
PFBA	0,0053	0,016	**PFOS**	0,0042	0,013
PFPeA	0,0043	0,014	**PFDS**	0,0078	0,024
PFHxA	0,0020	0,007	**PFOSA**	0,0062	0,020
PFHpA	0,0024	0,008	**N-MeFOSA**	0,0096	0,030
PFOA	0,0022	0,007	**N-EtFOSA**	0,0047	0,015
PFNA	0,0052	0,016	**N-MeFOSAA**	0,005	0,016
PFDA	0,0026	0,008	**N-EtFOSAA**	0,0079	0,024
PFUnDA	0,0042	0,013	**6-2 FTS**	0,0037	0,012
PFDoDA	0,0047	0,015	**8-2 FTS**	0,0039	0,013
PFTrDA	0,0065	0,020	**9Cl-PF3ONS**	0,0053	0,017
PFTeDA	0,0048	0,015	**8-2 FTUCA**	0,0037	0,012
PFHxDA	0,0055	0,018	**8-2 diPAP**	0,0108	0,032
PFODA	0,0112	0,032	**HFPO-DA**	0,0077	0,023
PFBS	0,0033	0,011	**ADONA**	0,0018	0,006
PFHxS	0,0058	0,018			

Eine zentrale Verfahrensgröße zur Beurteilung der Präzision und Zuverlässigkeit von Messergebnissen ist die **erweiterte Messunsicherheit**. Sie gibt an, wie stark einzelne Messwerte um den wahren Wert streuen und sollte bei der Beurteilung von Messergebnissen berücksichtigt werden. Die Abschätzung der erweiterten Messunsicherheit (siehe Tabelle 5) erfolgte seitens BAM mittels nachfolgend beschriebener Hausmethode: Die Standard-Messunsicherheit u setzt sich aus einer zufälligen Komponente u_r und einer systematischen Komponente u_{bias} zusammen. Die zufällige Komponente wird aus der Laborpräzision abgeschätzt und die Berechnung für u_{bias} erfolgte aus den Daten für die Richtigkeit des Analyseverfahrens durch Vergleich der dotierten und gemessenen Konzentrationen. Die kombinierte Standard-Messunsicherheit u ergibt sich gemäß folgender Formel als Wurzel der Summe der quadrierten Einzelunsicherheiten:

$u = \sqrt{(u_r^2 + u_{bias}^2)}$. Durch Multiplikation der kombinierten Standardunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor k=2 ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U, welche einem Konfidenzniveau von etwa 95% entspricht.

Tabelle 5 Erweiterte Messunsicherheit der Bestimmung von PFAS-Gesamtgehalten in Böden

	erweiterte Messunsicherheit [%]		erweiterte Messunsicherheit [%]
TFA	17	**PFHpS**	15
PFBA	52	**PFOS**	33
PFPeA	18	**PFDS**	23
PFHxA	20	**PFOSA**	14
PFHpA	14	**N-MeFOSA**	36
PFOA	20	**N-EtFOSA**	29
PFNA	18	**N-MeFOSAA**	21
PFDA	34	**N-EtFOSAA**	18
PFUnDA	14	**6-2 FTS**	18
PFDoDA	28	**8-2 FTS**	24
PFTrDA	24	**9Cl-PF3ONS**	15
PFTeDA	8	**8-2 FTUCA**	12
PFHxDA	20	**8-2 diPAP**	25
PFODA	24	**HFPO-DA**	21
PFBS	14	**ADONA**	9
PFHxS	19		

2.4.3 TOP Assay

Neben den in Tabelle 2 aufgeführten Vorläuferverbindung existieren unzählig weitere Vorläufer, die mit der Standardanalytik nicht erfassbar sind. Um das Ausmaß der Belastung mit unbekannten Vorläufern abzuschätzen, kann der TOP-Assay (Total Oxidizable Precursor Assay) von Houtz & Sedlak (2012) angewendet werden. Durch eine alkalische Oxidation mit Peroxodisulfat werden bei Temperaturen von 85 °C (+/- 3 °C) Vorläufer in bestimmbare Perfluorcarbonsäuren (PFCA) umgewandelt. Durch eine Gehaltsbestimmung der PFCA vor und nach Oxidation kann der Gehalt an Vorläuferverbindungen (semi-)quantifiziert werden.

Durchführung des Top-Assays:

Die Bodenextraktion erfolgte gemäß DIN 38141-14:2011. Dabei wurde eine definierte Probenmenge eingewogen und mit 10 ml Methanol komplett überschichtet, 30 Sekunden lang manuell geschüttelt, 30 Minuten bei 40 °C in ein Ultraschallwasserbad gestellt, anschließend homogenisiert und erneut in das Ultraschallbad gestellt. Nach Zentrifugation der so gewonnenen Boden-Methanol-Suspension wurde der Überstand dekantiert und bis zur weiteren Verwendung oder Messung bei 4 °C gelagert.

Zur Durchführung des TOP-Assays wurde ein Aliquot des Extrakts zunächst unter einem Stickstoffstrom bis zur Trocknung eingeengt und anschließend in einer Kaliumperoxodisulfat-Lösung rekonstituiert. Durch die Zugabe von Natriumhydroxid wurde ein pH-Wert von mindestens 13 eingestellt. Die Proben wurden dann für 24 Stunden bei 80 °C gelagert und nach Abschluss der Oxidationsreaktion zum Abkühlen bei +4°C gelagert.

Nach der Oxidation erfolgte die Neutralisation der Proben durch Zugabe von Ameisensäure. Um die hohe Salzfracht abzutrennen, schloss sich eine Festphasenextraktion an. Der daraus resultierende organische Extrakt wurde unter einem Stickstoffstrom bei 40 °C eingeengt und der Rückstand in jeweils 500 µl Methanol sowie MilliQ-Wasser rekonstituiert. Die finale Analyse der Lösung erfolgte mittels LC-MS/MS.

Zur Qualitätssicherung des TOP-Assays wurde die Probe mit der isotopenmarkierten Vorläuferverbindung $^{13}C_8$-PFOSA dotiert, welche während des Oxidationsprozesses zu $^{13}C_8$-PFOA reagiert. Eine quantitative Umsetzung dieses Standards gilt dabei als Indikator für die erfolgreiche Durchführung des Assays.

2.5 Datenauswertung

Bereinigung des Datensatzes

In einem ersten Schritt war zu prüfen, ob beprobte Standorte auf Grund ihrer Lage in Verdichtungsräumen oder rezenten Auen von der Datenauswertung auszuschließen sind (siehe Kapitel 2.2). Grundlage für diese Prüfung waren (a) die Karte der Verdichtungsräume des *Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung* (BBSR, 2023) und (b) die interaktive Karte „Flussauen in Deutschland“ des *Bundesamtes für Naturschutz* (BfN, 2021):

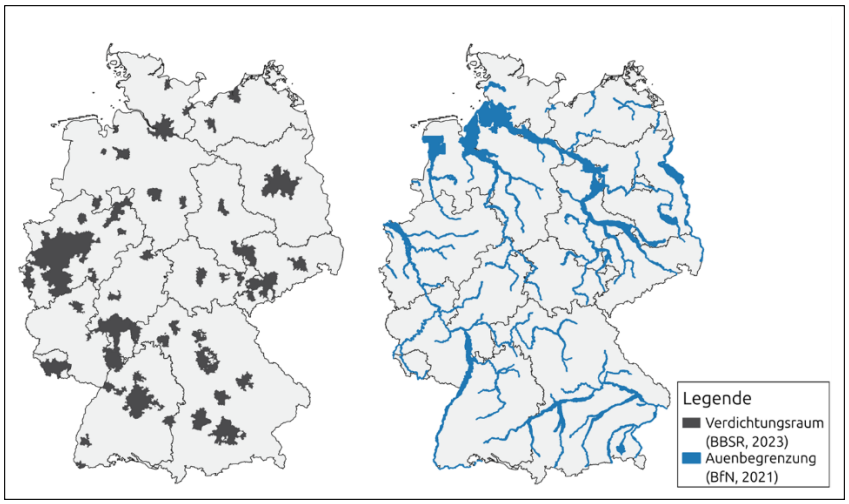
a) Die Karte der Verdichtungsräume des BBSR basiert auf einem Beschluss des Hauptausschusses der Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) vom 07.09.1993. Bei der aktuellen Ausweisung wurden die ursprünglichen Festlegungen an die nachfolgenden Gebietsänderungen angepasst (Stand 2023).

b) Die Abgrenzung von Flussauen nach BfN erfolgt über die Definition von Überflutungsflächen, die durch den Einfluss des Gewässers (Grundwasserstand, Hochwasserereignisse) geprägt sind, wie im "Auenzustandsbericht 2021" (Koenzen, U. et al., 2021) dargelegt. Die Abgrenzung wird für die großen Flüsse Deutschlands (Rhein, Elbe, Donau, Weser, Ems, Oder) sowie deren direkte Zuflüsse durchgeführt. Erfasst werden die Auen von 79 Flüssen auf einer Länge von rund 10.000 Flusskilometern – unterschieden nach rezenter Aue und Altaue.

Abbildung 2 enthält eine räumliche Darstellung der Lage von Verdichtungsräumen und rezenten Auen. Lag ein Standort innerhalb eines Verdichtungsraumes, aber die Grenze zum ländlichen Raum war weniger als 1 km entfernt, so wurden diese Standorte bei der Auswertung berücksichtigt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um der Problematik der Ungenauigkeiten bei der Koordinatenaufnahme mittels GPS-Gerät zu begegnen. Außerdem dient es dazu, Acker- und Grünlandstandorte, die aufgrund ihrer Ausdehnung sowohl im als auch außerhalb des definierten Verdichtungsraumes liegen können, in die weitere Analyse aufzunehmen.

Als Ergebnis der hier durchgeführten Prüfung wurden 31 Standorte aus Verdichtungsräumen und zwei Standorte in rezenten Auen von den Datenauswertungen ausgeschlossen.

Abbildung 2 Verdichtungsräume und Abgrenzung von Flussauen



Datenbasis Verdichtungsräume: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), *Laufende Raumbeobachtung des BBSR*, Stand 2023
Geometrische Grundlagen: Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG), *Verwaltungsgebiete VG250*, Stand 2024
Datenbasis Auenbegrenzungen: Bundesamt für Naturschutz (BfN), *Auenzustand – rezente Flussauen*, Stand 2021
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Umgang mit Messwerten unterhalb von Bestimmungs- und Nachweisgrenzen

Für die statistische Datenanalyse und Berechnung von Hintergrundwerten wurden Analyseergebnissen, die (a) unterhalb der substanzspezifischen Bestimmungsgrenze aber oberhalb der Nachweisgrenzen liegen durch die halbe Bestimmungsgrenze ersetzt oder (b) nicht nachweisbar waren auf „null“ gesetzt. Analog wurde bei der Bildung von PFAS-Summenwerten vorgegangen.

Ermittlung von Differenzierungskriterien

Die räumliche Verteilung der Hintergrundgehalte für organische Schadstoffe in Böden spiegelt häufig regionale Immissionssituationen wider, welche die Höhe der Stoffgehalte maßgeblich bestimmen. Da diese regionstypischen Einflüsse dazu führen können, dass ein bundesweit gewonnener Datensatz unter Umständen keine homogene Grundgesamtheit darstellt, müssen die Messergebnisse für die Auswertung gegebenenfalls geclustert werden. Des Weiteren können standortspezifische Parameter – zum Beispiel Lagerungsdichten oder Humusgehalte – einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung der Gehalte von Schadstoffen in Böden haben.

Anhand der ermittelten PFAS-Gesamtgehalte (C4-C18) und separat für TFA wurde mit Hilfe statistischer Methoden untersucht, ob (a) eine räumliche Clusterung der PFAS-Gehalte vorzunehmen ist und (b) mit welchen Bodenkenngrößen und sonstigen Standortparametern die Analyseergebnisse korrelieren.

(a) Prüfung regionaler Abhängigkeiten der Messergebnisse

Durch optische Analyse der Verteilung der Analyseergebnisse mittels GIS und der Verwendung von Tukey-Tests, Withney-Mann-Tests und einer Principal Component Analysis (PCA) wurde geprüft, ob eine räumliche Clusterung der PFAS-Gehalte vorliegt. Tukey-Test und Whitney-Mann-Test setzen nicht das Vorliegen normalverteilter Zufallsvariablen voraus. Die PCA ist mit nicht normalverteilten Variablen möglich, wird für diese aber nicht als optimales Verfahren angesehen. Um eine regionale Clusterung statistisch zu prüfen, wurde die Abhängigkeit der Lage der Untersuchungsstandorte in den folgenden naturräumlichen Großlandschaften (BfN, 2022) untersucht (siehe ergänzend Abbildung 3):

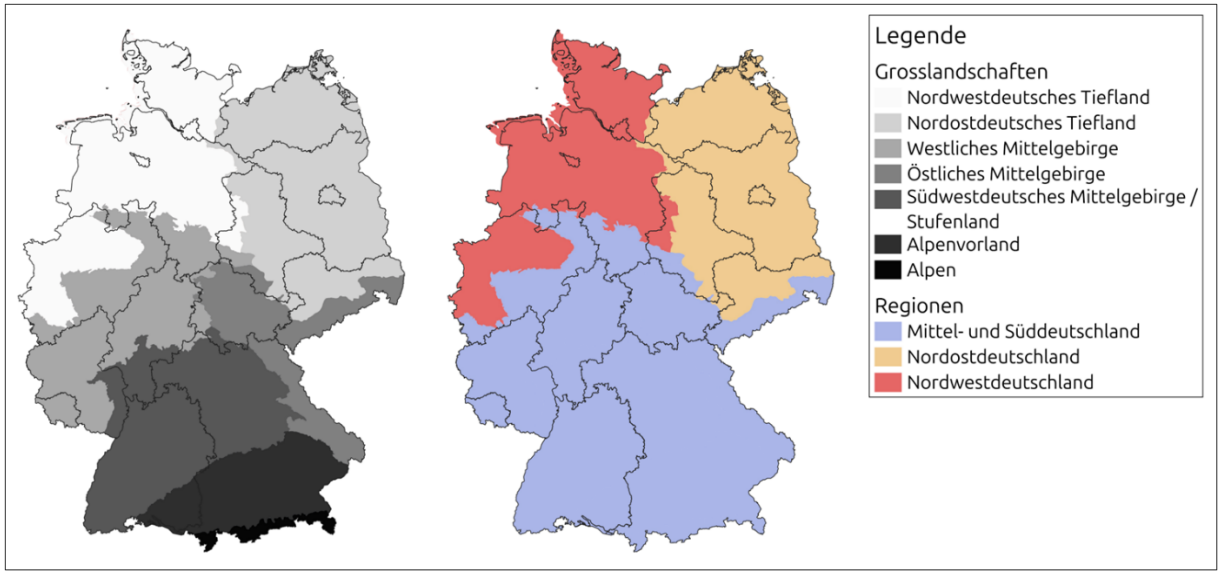
- Nordostdeutsches Tiefland
- Nordwestdeutsches Tiefland
- Westliche Mittelgebirge
- Östliche Mittelgebirge
- Südwestdeutsches Mittelgebirge / Stufenland
- Alpenvorland
- Alpen

Die räumliche Zuordnung der Probenpunkte erfolge mittels Geografischen Informationssystem (GIS) über die Lage der Großlandschaften aus dem WMS-Kartendienst der “Naturräumlichen Gliederung Deutschlands” des BfN (BfN, 2022).

In der Ausgangsvariante wurde geprüft, inwiefern die Ergebnisse innerhalb der Großlandschaften geclustert werden können. Die Ergebnisse sprachen dafür, die fünf Großlandschaften Westliche Mittelgebirge, Östliche Mittelgebirge, Südwestdeutsches Mittelgebirge/Stufenland, Alpenvorland und Alpen zu einer Einheit „Mittel-/Süddeutschland“ zusammenzufassen. Die Analyse der regionalen Clusterung wurde anschließend für die drei

Regionen Nordostdeutsches Tiefland, Nordwestdeutsches Tiefland und die zusammengefasste Region Mittel-/Süddeutschland wiederholt (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3 Naturräumliche Großlandschaften des BfN und zusammengefasste regionale Cluster für die Ableitung von Hintergrundwerten



Datenbasis Großlandschaften: BfN, *Biogeografische Regionen und naturräumliche Haupteinheiten Deutschlands, Stand 2011*
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Nach der regionalen Clusterung wurden anhand von Histogrammen der Rohdaten aller Einzelsubstanzen sowie zugehörigen Quantil-Quantil-Diagramme (Q-Q-Plots) eingeschätzt, ob die Gültigkeit für die Annahme einer Normalverteilung gegeben ist. Dieses Vorgehen wurde für logarithmisch-transformierte Daten für alle Substanzen wiederholt. Im Ergebnis wurden fortan alle Analysen an den logarithmierten Daten vorgenommen, da die Abweichung von einer Normalverteilung für die unlogarithmierten Daten zu gravierend ausfiel.

(b) Abhängigkeiten der Messergebnisse von Standortparametern / Bodenkenngrößen

Mit Hilfe eines Kendall-Tau-Tests wurde der Datensatz auf Korrelationen zwischen den Analyseergebnissen und Standortparametern / Bodenkenngrößen untersucht. Zu letzteren gehören die mittleren Niederschläge auf Basis der 1-km-Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2025) am Ort der Probennahme, die Geländehöhe, Bodenart, Humusgehalt, pH-Wert, Trockenrohdichte, Trockensubstanz (frisch/trocken). Die Erkenntnisse dieser Untersuchung wurden genutzt, um anschließend mit Hilfe von multiplen linearen Modellen die erklärenden Variablen für die Verteilung von PFAS-Gehalten in Böden zu bestimmen.

Identifizierung und Eliminierung von untypisch belasteten Bodenproben

Die Identifizierung und Eliminierung von untypisch belasteten Bodenproben erfolgte anhand von logarithmierten PFAS-Gehalten nach der Bildung von Stichproben entsprechend den Ergebnissen der o.g. Untersuchung von Differenzierungskriterien. Die Bestimmung der Ausreißer und Extremwerte wurde entsprechend den Vorgaben der LABO durchgeführt (LABO, 2017). Extremwerte sind demnach Werte, die außerhalb des 3fachen Interquartilabstandes (IQR) unterhalb oder oberhalb des 25. bzw. 75. Perzentils liegen. Ausreißer sind als Werte definiert, die lediglich den 1,5fachen IQR von diesen Grenzen entfernt liegen. Ausreißer und Extremwerte in Richtung unteren Rand der Verteilung wurden nicht ausgeschlossen, weil es

durch den Umgang mit Messwerten kleiner der Nachweis- und Bestimmungsgrenze zu Diskontinitäten in den Datenreihen kommt (Sprünge auf „Null“ oder die halbe Bestimmungsgrenze).

Die technische Definition von Ausreißern und Extremwerten deckt sich sehr gut mit der zusätzlich durchgeführten optischen Analyse auffälliger Einzelpunkte und der Lage von Beprobungspunkten in der Nähe bekannter Quellen. Den IQR, der die Streuung des jeweiligen Datensatzes berücksichtigt, als Lagemaß zu verwenden, hat sich als robustes Werkzeug erwiesen, um auffällige Belastungen zu identifizieren. Die Bereinigung erfolgte für die jeweiligen Stichproben separat. Bei der Zusammenlegung von Stichproben für die Auswertung in Hinblick auf stichprobenübergreifende Hintergrundwerte wurde die Bereinigung separiert für die Humusklassen mit mindestens 10 Analysenergebnissen und humusklassenübergreifend durchgeführt.

Die Identifizierung von Ausreißern und Extremwerten für die Summe der Gehalte ausgewählter PFAS-Verbindungen erfolgte nach denselben statistischen Kriterien. Zunächst wurden die Ausreißer und Extremwerte der Einzelverbindungen unter Berücksichtigung der Humusklassen eliminiert. Aus den verbliebenen Messergebnissen wurden die Summenparameter berechnet. Anschließend erfolgte erneut eine Ausreißer- und Extremwertbereinigung des Summenparameters nach denselben Vorgaben. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass auffällige Einzelproben bei der Summierung nicht überdeckt werden und damit die folgende Perzentilberechnung nicht fälschlich erhöhen.

Berechnung von Hintergrundwerten

Aus dem bereinigten Datensatz wurden das 50., 75. und 90. Perzentil für die jeweiligen Stichproben errechnet. Für die Ermittlung von Hintergrundwerten ist entsprechend LABO (2017) eine Mindestprobenzahl von n=20 erforderlich. Bei kleineren Datensätzen (15-19 Messwerten) kann zur Orientierung über die Höhe der Belastung der Median (50. Perzentil) angegeben werden.

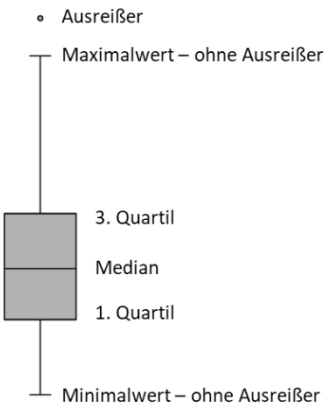
Die Perzentilberechnungen für die Nutzungsarten Acker und Grünland erfolgten einerseits für Gesamtdeutschland (bundesweit), andererseits für die drei Regionen Nordost-Deutschland, Nordwest-Deutschland und Mittel- /Süddeutschland. Dabei wurden sowohl Perzentile für die einzelnen Humusklassen h1 bis h5 und humusklassenübergreifend berechnet (auch hier ohne Berücksichtigung der Humusklassen h6 und h7). Lagen mehr als 20 Probenpunkte vor, wurden alle Perzentile angegeben. Lagen 15 bis 19 Probenpunkte vor, wurde lediglich das 50. Perzentil berechnet. Bei weniger als 15 Probenpunkten wurde keine Perzentilberechnung durchgeführt.

Visualisierung der bundesweiten Verteilung der PFAS-Gehalte

(a) Box-Whisker-Plot

Zur Visualisierung der Verteilung und Streuung der Messergebnisse wurden Box-Whisker-Plots erstellt.

Abbildung 4 schematische Darstellung und Erläuterung von Whisker-Box-Plots



Whisker-Box-Plot

- Die Box umschließt die mittleren 50 % der Daten (das erste bis dritte Quartil).
- Die Höhe der Box entspricht dem Interquartilsabstand (IQR), welcher die Differenz zwischen dem dritten und ersten Quartil beschreibt.
- Die horizontale Linie innerhalb der Box markiert den Median der Daten.
- Die Whisker (Antennen) zeigen die Spannweite der restlichen Daten außerhalb der Box an und erstrecken sich bis zum kleinsten bzw. größten Wert, sofern diese innerhalb des 1,5-fachen IQR liegen.
- Ausreißer (1,5-facher IQR) und Extremwerte (3-facher IQR) werden separat als einzelne Punkte ober- und unterhalb der Whisker visualisiert.

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

(b) Kartendarstellungen

Bundesweiten Karten zur Verteilung der PFAS-Gehalte in Böden sind in Anhang B dargestellt. Zur Erstellung der Karten wurden die Messergebnisse für jede Verbindung anhand der zuvor abgeleiteten bundesweiten Perzentile in eine der folgenden Klassen zugeordnet:

- Messergebnis kleiner oder gleich dem 25. Perzentil,
- Messergebnis größer als das 25. Perzentil aber kleiner oder gleich dem 50. Perzentil,
- Messergebnis größer als das 50. Perzentil aber kleiner oder gleich dem 75. Perzentil und
- Messergebnis größer als das 75. Perzentil.

Dieses Vorgehen bietet sich an, um (a) Acker- und Grünlanddaten mittels Perzentilklassen zu normieren und gemeinsam darstellen zu können sowie (b) regionale Effekte direkt sichtbar zu machen. Regionen mit höheren Hintergrundgehalten heben sich direkt von Regionen mit niedrigen Hintergrundgehalten ab.

- Für perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren, deren Messwerte überwiegend unterhalb der Bestimmungs- oder Nachweisgrenzen liegen, wurde eine Kartendarstellung (siehe Anhang C) gewählt, in der die Messergebnisse wie folgt differenziert werden:
- Substanz nicht nachweisbar,
- Messergebnis kleiner Bestimmungsgrenze und
- Messergebnis größer Bestimmungsgrenze.

Bei PFAS-Verbindungen, die nur in seltenen Fällen detektiert oder quantifiziert werden konnten, wurde auf eine Kartendarstellung verzichtet.

3 Untersuchungsergebnisse

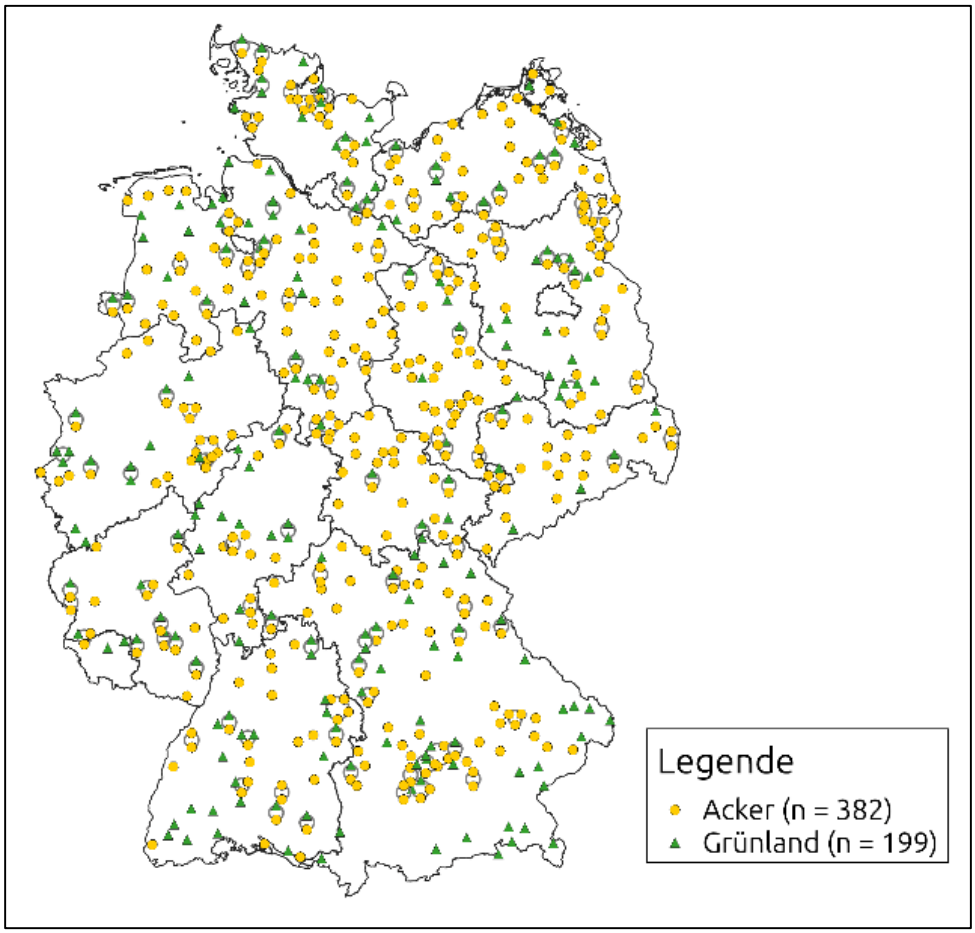
3.1 Untersuchungsstandorte und Differenzierungskriterien

3.1.1 Standorte für die Ermittlung von bundesweiten Hintergrundwerten für PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums

Nach Ausschluss der Analyseergebnisse der Proben von Standorten in Verdichtungsräumen und rezenten Auen bilden die Untersuchungsergebnisse von 382 Acker- und 199 Grünlandstandorten die Datenbasis für die Ermittlung bundesweit typischer PFAS-Gesamtgehalte für Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raums.

In Abbildung 5 ist die räumliche Verteilung der Standorte dargestellt. Der Tabelle 6 kann die nach Bundesländern differenzierte Probenanzahl für Acker und Grünland entnommen werden.

Abbildung 5 Lage der Untersuchungsstandorte



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Tabelle 6 **Nach Bundesländern differenzierte Anzahl der im ländlichen Raum untersuchten Acker- und Grünlandstandorte**

Land	Probenanzahl			Land	Probenanzahl		
	Acker	Grünland	Summe		Acker	Grünland	Summe
BB	35	16	**51**	**RP**	14	10	**24**
BW	28	22	**50**	**SL**	1	2	**3**
BY	65	45	**110**	**SH**	23	16	**39**
HE	14	13	**27**	**SN**	22	5	**27**
MV	36	12	**48**	**ST**	34	7	**41**
NI	62	30	**92**	**TH**	24	7	**31**
NW	24	14	**38**	**BE, HB, HH**	---	---	**---**

3.1.2 Kriterien für die Differenzierung von PFAS in landwirtschaftlich genutzten Oberböden des ländlichen Raums

PFAS – Gesamtgehalte (C4-C18)

Im Rahmen der Cluster- und Korrelationsanalysen konnten für die Gesamtgehalte der kurz- und langkettigen PFAS (C4-C18) in Oberböden substanzübergreifend drei Kriterien identifiziert werden, nach denen die Messergebnisse differenziert auszuwerten wären: Nutzungsart, regionale Zuordnung und Humusklassen. Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den jeweiligen so gebildeten Stichproben ist für die einzelnen PFAS unterschiedlich stark ausgeprägt. Um jedoch eine konsistente Darstellung und Vergleichbarkeit über das gesamte Substanzspektrum zu gewährleisten, wurde die Differenzierung nach diesen drei Kriterien methodisch einheitlich für alle Einzelsubstanzen vorgenommen. Zusätzlich wurden humusklassenübergreifende Hintergrundwerte für (a) die drei Regionen und (b) regionsübergreifend ermittelt.

Die Gehalte von PFAS in Oberböden sind getrennt nach **Nutzungsarten** zu betrachten, da die Art der Bewirtschaftung einen erheblichen Einfluss auf die Stoffverteilung in Böden und der Höhe von Stoffeinträgen hat (siehe Kapitel 2.2).

Die statistische Auswertung mittels GIS, Tukey- und Whitney-Mann-Tests sowie der Principal Component Analysis (PCA) bestätigt eine **räumliche Differenzierung** der PFAS-Gesamtgehalte in Deutschland. Die Ergebnisse belegen, dass eine Zusammenfassung der ursprünglichen sieben Naturräume zu den drei Regionen Nordostdeutsches Tiefland, Nordwestdeutsches Tiefland und Mittel-/Süddeutschland statistisch valide ist. Dabei zeigen sich in Abhängigkeit der betrachteten Einzelsubstanzen jedoch unterschiedliche Signifikanzniveaus (siehe Tabelle 7):

- Für eine Vielzahl der untersuchten PFAS wurde im Vergleich zwischen Mittel- /Süddeutschland und Nordost-Deutschland für Acker- und Grünlandstandorte ein höchst signifikantes Differenzierungsniveau von $p < 0{,}001$ erreicht.
- Im Vergleich zwischen Mittel-/Süddeutschland und Nordwest-Deutschland sowie zwischen den beiden Tieflandregionen NO- / NW-Deutschland variiert die Aussagekraft stark. Während einige PFAS-Verbindungen ebenfalls höchst signifikante Unterschiede (p

< 0,001) aufweisen, konnten für andere Substanzen keine statistisch relevanten Abweichungen zwischen diesen Regionen nachgewiesen werden.

Trotz dieser substanzspezifischen Varianz in der statistischen Trennschärfe wurde aus Gründen der methodischen Konsistenz und einer pragmatischen Handhabbarkeit entschieden, die Auswertungen für alle Einzelsubstanzen einheitlich zu gestalten und durchgehend nach den drei identifizierten Regionen zu differenzieren.

Tabelle 7 Ergebnisse des Signifikanztests für die Clusterung der PFAS-Gehalte nach Regionen

Signifikanztest		PFBA	PFHxA	PFOA	PFNA	PFBS	PFHxS	PFOS
		Signifikanzniveau p						
Acker								
Mittel-& Süddeutschland	NO-Deutschland	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Mittel-& Süddeutschland	NW-Deutschland	< 0,001	< 0,001	ns	< 0,001	< 0,001	ns	ns
NO-Deutschland	NW-Deutschland	ns	ns	< 0,001	< 0,001	ns	< 0,001	< 0,001
Grünland								
Mittel-& Süddeutschland	NO-Deutschland	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Mittel-& Süddeutschland	NW-Deutschland	< 0,05	< 0,001	ns	< 0,001	< 0,001	ns	ns
NO-Deutschland	NW-Deutschland	ns	ns	< 0,001	< 0,01	ns	< 0,01	< 0,001

p < 0,001 – höchst signifikant; p < 0,01 – sehr signifikant; p < 0,05 – signifikant; ns = nicht signifikant (p ≥ 0,05)

Mithilfe linearer Modelle wurde untersucht, inwiefern die bei der Beprobung und im Labor aufgenommenen Bodenparameter Trockenrohdichte, Trockensubstanz, Humusgehalt, pH-Wert und Bodenart des untersuchten Bodens einen Einfluss auf die PFAS-Gesamtgehalte haben. Im Zuge der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die linearen Modelle lediglich die Trockenrohdichte und die **Humusgehalte** als signifikante Parameter identifizierten. Aufgrund dessen, wurden bei der nachfolgenden Datenanalyse die Modelle auf diese beiden Parameter reduziert. Die Modelle wurden einzeln für die häufig auffindbaren Substanzen und aufgeteilt nach den zuvor identifizierten Regionen gerechnet. Es ergaben sich für den Einfluss von Humusgehalt und Trockenrohdichte auf die PFAS-Gesamtgehalte der Böden ein gemischtes Bild (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 8 Ergebnisse des Signifikanztests für die Korrelation von PFAS- und Humusgehalten

Signifikanztest	PFBA	PFHxA	PFOA	PFNA	PFBS	PFHxS	PFOS
	Signifikanzniveau p						
Acker							
NO-Deutschland	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,01	ns
NW-Deutschland	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mittel-/Süddeutschland	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Grünland							
NO-Deutschland	< 0,05	ns	< 0,05	< 0,01	ns	ns	ns
NW-Deutschland	ns	ns	0,05	ns	ns	ns	0,01
Mittel-/Süddeutschland	ns	0,05	ns	ns	ns	ns	ns

p < 0,001 – höchst signifikant; p < 0,01 – sehr signifikant; p < 0,05 – signifikant; ns = nicht signifikant (p ≥ 0,05)

Während sich für die Nutzungsart Acker in Nordost-Deutschland ein deutlicher Zusammenhang von Humusgehalt und PFAS-Gesamtgehalt ergab, können diese Zusammenhänge in den beiden anderen Regionen mit dem gewählten Verfahren nicht bestätigt werden. Für Grünland ist der Zusammenhang von Humusgehalt und PFAS-Gesamtgehalt auch in NO-Deutschland weniger signifikant. Durch eine nach Humusklassen differenzierte Darstellung der Verteilung der Messergebnisse in Box-Plots (siehe einschlägige Abbildungen in Kapitel 3.2) wird demgegenüber ersichtlich, dass mit steigendem Humusgehalt die PFAS-Gesamtgehalte tendenziell ebenfalls zunehmen. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, die Daten sowohl humusklassenübergreifend als auch nach Humusklassen differenziert auszuwerten.

Tabelle 9 Ergebnisse des Signifikanztests für die Korrelation von PFAS-Gehalten und der Trockenrohdichte

Signifikanztest	PFBA	PFHxA	PFOA	PFNA	PFBS	PFHxS	PFOS
	Signifikanzniveau p						
Acker							
NO-Deutschland	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NW-Deutschland	ns	ns	< 0,05	< 0,05	ns	< 0,05	ns
Mittel-/Süddeutschland	< 0,001	ns	< 0,001	< 0,001	ns	< 0,001	< 0,001
Grünland							
NO-Deutschland	ns	ns	ns	< 0,05	ns	< 0,05	< 0,05
NW-Deutschland	ns	ns	< 0,05	< 0,01	ns	ns	< 0,01
Mittel-/Süddeutschland	< 0,001	ns	< 0,05	< 0,001	< 0,05	< 0,001	< 0,05

p < 0,001 – höchst signifikant; p < 0,01 – sehr signifikant; p < 0,05 – signifikant; ns = nicht signifikant (p ≥ 0,05)

Für die Trockenrohdichte (TRD) ergab sich in den linearen Modellen vor allem für Mittel- /Süddeutschland eine stark signifikante Abhängigkeit. Für einige Verbindungen ist vor allem in Nordwest-Deutschland eine schwache Abhängigkeit nachgewiesen. Die TRD des Oberbodens, vor allem bei Acker, hängt stark vom Probennahme-Zeitpunkt, aber auch von der Probennahme selbst ab. Nach TRD differenzierte Hintergrundwerte erscheinen deshalb für die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse einzelner Standortuntersuchungen nicht zielführend. Daher wird auf eine derartige Auswertung verzichtet.

Den mit steigendem Humusgehalt in der Regel abnehmenden Trockenrohdichten und der starken Bindung von insbesondere langkettigen PFAS an die organische Bodensubstanz kann durch eine Differenzierung der Hintergrundwerte für PFAS nach Humusgehalten Rechnung getragen werden.

Bei humusklassenübergreifenden Auswertungen müssen Mineralböden (h1–h5) und organische Böden (h7) getrennt betrachtet werden. Proben der Humusklasse h6 (sehr stark humose Mineralböden) nehmen eine Sonderstellung ein: Im Datenkollektiv weisen sie häufig Humusgehalte über 20 Masse-% sowie niedrige Trockenrohdichten zwischen 0,6 und 0,9 g/cm^3 auf. Da Grünlandböden der Klassen h1–h5 in der Regel deutlich höhere Trockenrohdichten besitzen, ist eine gemeinsame Auswertung aufgrund der mangelnden Vergleichbarkeit der PFAS-Gehalte nicht zulässig. Obwohl Ackerböden der Klasse h6 ähnliche Trockenrohdichten wie die Klassen h1–h5 zeigen können, wird zugunsten einer methodischen Einheitlichkeit auf eine gemeinsame Auswertung verzichtet.

Für die Differenzierung der Messergebnisse nach Nutzungsart, Regionen und Humusklassen stehen für die einzelnen, so gebildeten Raumeinheiten hinreichende Probenanzahlen für 9 Raumeinheiten zur Verfügung (Mindestprobenzahl n≥20). Bei drei Raumeinheiten ist entsprechend der LABO-Vorgaben die Berechnung von Medianwerten möglich (Mindestprobenzahl n=15-<20), während bei 30 Raumeinheiten der Mindest-Probenumfang unterschritten wird (siehe Tabelle 10). Der Schwerpunkt bei der Auswahl von zu beprobenden Standorten lagen auf einer bundesweit möglichst guten flächenhaften Abdeckung und das auf

dieser Ebene für die dominierenden Humusklassen der Nutzungsarten Acker und Grünland hinreichende Stichprobenumfänge zur Verfügung stehen. Dies konnte für Mineralböden gut umgesetzt werden. Bei zukünftigen bundesweiten Erhebungen zur Ermittlung von Hintergrundgehalten für PFAS-Gesamtgehalten in Böden und die Ableitung entsprechender Hintergrundwerte sollte die Probenzahl erhöht werden, um eine bessere regionale Abdeckung zu gewährleisten.

Tabelle 10 Nach Regionen und Humusklassen differenzierten Anzahl der im ländlichen Raum untersuchten Acker- und Grünlandstandort

Region	Nutzung	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
		Probenanzahl						
NO-Deutschland	**Acker**	4	**54**	**51**	7	-	-	-
	Grünland	-	4	***15***	9	5	1	7
NW-Deutschland	**Acker**	-	***16***	**51**	***15***	3	2	-
	Grünland	-	-	10	**22**	6	4	4
Mittel-/ Süddeutschland	**Acker**	1	**25**	**119**	**30**	3	1	-
	Grünland	-	1	13	**63**	**29**	4	1
bundesweit	**Acker**	5	**95**	**221**	**52**	6	3	-
	Grünland	-	5	**38**	**94**	**40**	9	12

h1= < 1 Ma-% Humus, h2= 1 - < 2 Ma-% Humus, h3= 2 - < 4 Ma-% Humus, h4= 4 - < 8 Ma-% Humus, h5= 8 - < 15 Ma-% Humus, h6= 15 - < 30 Ma-% Humus, h7= > 30 Ma-% Humus

Die flächenhaft dominierenden Humusklassen sind bei Ackerböden h2–h4 (mit h3 als Schwerpunkt) und bei Grünland h3–h5 (mit h4 als Schwerpunkt). Für diese Klassen liegen für eine bundesweite statistische Auswertung hinreichende Stichprobenumfänge vor. Im Gegensatz dazu konnte für die bei Grünland ebenfalls relevanten Anteile der Humusklasse h7 kein hinreichender Stichprobenumfang bzw. keine regional repräsentative Verteilung erzielt werden. Gleiches gilt für die Humusklasse h6 bei Grünland, für die ebenfalls ausreichender Stichprobenumfang vorliegt. Insgesamt ist aufgrund der geringen Probenzahlen für die Humusklassen h1, h6 und h7 weder eine regionale noch bundesweite statistische Auswertung möglich. Ebenso kann bei Acker die Humusklasse h5 und bei Grünland die Humusklasse h2 nicht sinnvoll statistisch ausgewertet werden.

Für die Datenlage der drei Regionen NO-Deutschland, NW-Deutschland und Mittel- /Süddeutschland zeigt sich ein differenziertes Bild: Während in Mittel-/Süddeutschland für die Hauptklassen (Acker h2–h4, Grünland h4–h5) ausreichende Stichprobenumfänge

vorliegen, ist die Datenbasis in Nordost-Deutschland (Acker h4, Grünland h3–h5) sowie in Nordwest-Deutschland (außer Acker h3 und Grünland h4) teils unzureichend.

TFA-Gesamtgehalte

Die Untersuchung von **TFA** wurde in Oberbodenproben von 93 Standorte im ländlichen Raum durchgeführt. Hier konnten mittels Cluster- und Korrelationsanalysen keine regionale Differenzierung und keine signifikanten Abhängigkeiten von Bodenkenngrößen identifiziert werden. Dies ist jedoch vor dem Hintergrund des Umfangs und der Zusammensetzung der Stichprobe zu interpretieren: Der Schwerpunkt der Probenauswahl lag auf den dominierenden Humusklassen (h3 Acker, h3/h4 Grünland), um die Analyseergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, und es lagen auch keine hinreichenden Fallzahlen für eine belastbare räumliche Differenzierung vor. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die für die TFA-Analyse ausgewählten Bodenproben vorwiegend mittlere bis hohe Belastungen durch kurz- und langkettige PFAS (C4–C10) aufweisen, während Standorte mit geringerer Belastung unterrepräsentiert sind.

TOP-Assay

Für die Ergebnisse der **TOP-Assay**-Untersuchungen wurden keine Cluster- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten lediglich an Bodenproben von 50 Standorten. Dieser Stichprobenumfang ist für derartige Analyse nicht hinreichend.

3.2 Ergebnisse der Untersuchung von PFAS-Gesamtgehalten in Acker- und Grünlandböden des ländlichen Raums

3.2.1 Allgemeiner Überblick über die Verteilung der Messwerte

In allen untersuchten Bodenproben konnten PFAS nachgewiesen werden. Einige PFAS waren (nahezu) in allen Bodenproben bestimmbar, dazu zählen (a) die kurzkettigen Perfluorcarbonsäuren (bis C7) PFBA, PFHxA, PFHpA und (b) die langkettigen Perfluorcarbonsäuren (ab C8) PFOA, PFNA, PFDA und die langkettige Perfluorsulfonsäure PFOS (C8). In Grünlandböden war zusätzlich PFUnDA (C11) in fast jeder Probe nachweisbar. Andere PFAS wurden deutlich weniger häufig oder gar nicht in den Bodenproben detektiert oder quantifiziert (siehe Abbildung 6). Die Nachweisgrenze (NWG) markiert den Mindestwert für eine zuverlässige Detektion, während die Bestimmungsgrenze (BG) den Gehalt für eine präzise Quantifizierung festlegt (siehe Kapitel 2.4.2).

Abbildung 6 Prozentuale Anteile von PFAS-Messwerten oberhalb der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bei der Bestimmung von Gesamtgehalten

Acker n=382

Perfluor-carbonsäuren	> NWG	> BG
PFBA (C4)	99	98
PFPeA (C5)	92	69
PFHxA (C6)	99	95
PFHpA (C7)	99	98
PFOA (C8)	100	100
PFNA (C9)	100	98
PFDA (C10)	100	97
PFUnDA (C11)	99	62
PFDoDA (C12)	81	16
PFTrDA (C13)	46	3,4
PFTeDA (C14)	20	3,4
PFHxDA (C16)	4	1
PFODA (C18)	1	0,3

Perfluor-sulfonsäuren	> NWG	> BG
PFBS (C4)	65	12
PFHxS (C6)	31	3
PFHpS (C7)	5	0,8
PFOS (C8)	100	100
PFDS (C10)	0,3	0

weitere PFAS	> NWG	> BG
PFOSA (C8)	4	2
N-MeFOSA (C9)	0	0
N-EtFOSA (C10)	1,0	0
N-MeFOSAA (C11)	0,5	0,3
N-EtFOSAA (C12)	4	2
6-2-FTS (C8)	0,8	0
8-2-FTS (C10)	1	0,8
9Cl-PF3ONS (C8)	0,3	0
8:2 FTUCA (C10)	0,3	0
8:2 diPAP (C10)	0,3	0,3
HFPO-DA (GenX) (C6)	0	0
ADONA (C7)	14	5

Grünland n=199

Perfluor-carbonsäuren	> NWG	> BG
PFBA (C4)	100	100
PFPeA (C5)	92	87
PFHxA (C6)	98	93
PFHpA (C7)	99	96
PFOA (C8)	100	100
PFNA (C9)	100	100
PFDA (C10)	100	99
PFUnDA (C11)	100	95
PFDoDA (C12)	87	40
PFTrDA (C13)	75	19
PFTeDA (C14)	50	4
PFHxDA (C16)	5	0
PFODA (C18)	2	0

Perfluor-sulfonsäuren	> NWG	> BG
PFBS (C4)	87	67
PFHxS (C6)	71	16
PFHpS (C7)	20	4
PFOS (C8)	100	100
PFDS (C10)	0,5	0

weitere PFAS	> NWG	> BG
PFOSA (C8)	2	0,5
N-MeFOSA (C9)	0	0
N-EtFOSA (C10)	6	0,5
N-MeFOSAA (C11)	1	0,5
N-EtFOSAA (C12)	4	0,5
6-2-FTS (C8)	0,5	0,5
8-2-FTS (C10)	0,5	0
9Cl-PF3ONS (C8)	0	0
8:2 FTUCA (C10)	0	0
8:2 diPAP (C10)	0,5	0
HFPO-DA (GenX) (C6)	0	0
ADONA (C7)	33	15

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Prozentual gesehen sind PFAS in den Grünlandproben etwas häufiger nachweisbar oder bestimmbar als in Ackerproben. So war z.B. bei den Perfluorsulfonsäuren das kurzkettige PFBS deutlich häufiger bestimmbar (67 % der Mess-Ergebnisse liegen oberhalb der Bestimmungsgrenze) als in den untersuchten Ackerproben (12% oberhalb der Bestimmungsgrenze).

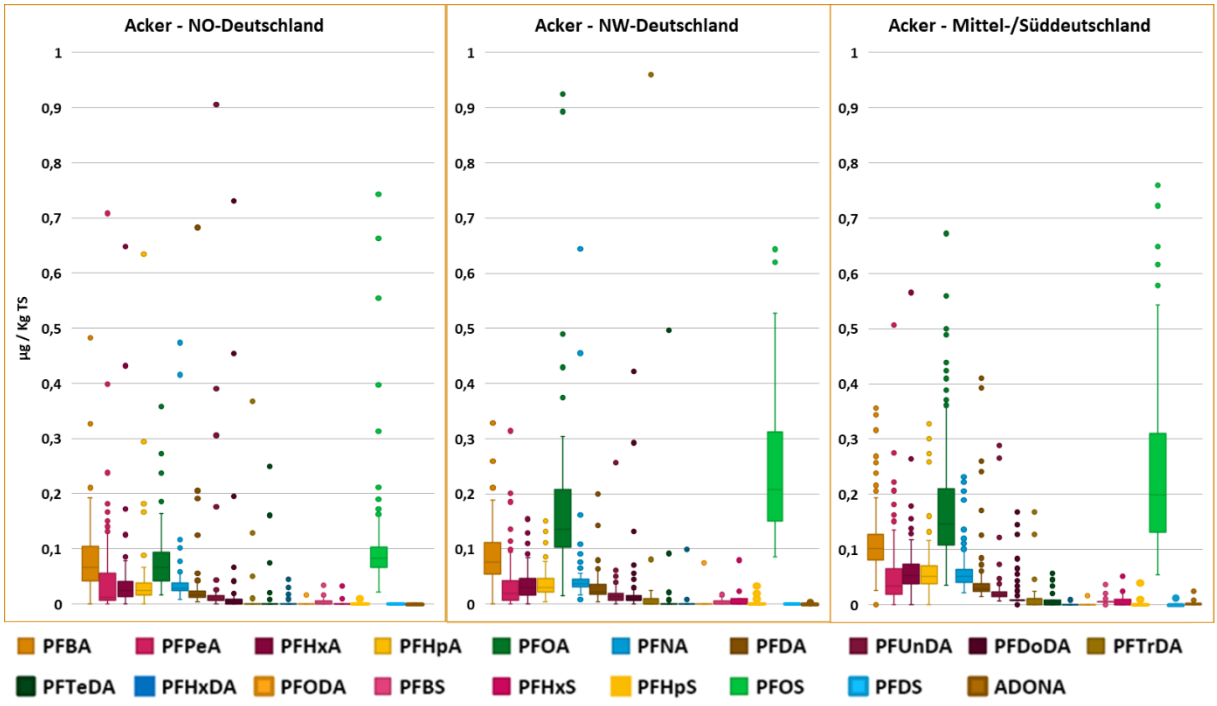
Die untersuchten 10 Vorläufersubstanzen (PFOSA, N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA, 6-2-FTS, 8-2-FTS, 9Cl-PF3ONS, 8:2 FTUCA, 8:2 diPAP) waren in den Bodenproben

häufig nicht nachweis- oder bestimmbar. Diese Ergebnisse werden auch durch die zusätzlich durchgeführten TOP-Assay Untersuchungen gestützt (siehe Kapitel 3.3).

Es wurden auch zwei PFOA-Ersatzstoffe untersucht: HFPO-DA (GenX) und ADONA. HFPO-DA wurde mit der hier verwendeten Methode in keiner der Proben nachgewiesen. ADONA hingegen konnte in 33 Prozent der Grünlandproben nachgewiesen und in 15 Prozent bestimmt werden; bei Acker liegen die jeweiligen Anteile niedriger. Der Nachweis und die Bestimmung von ADONA begrenzt sich allerdings bis auf seltene Ausnahmen auf den Süden Deutschlands und hier insbesondere auf das Alpenvorland und direkt angrenzende Gebiete.

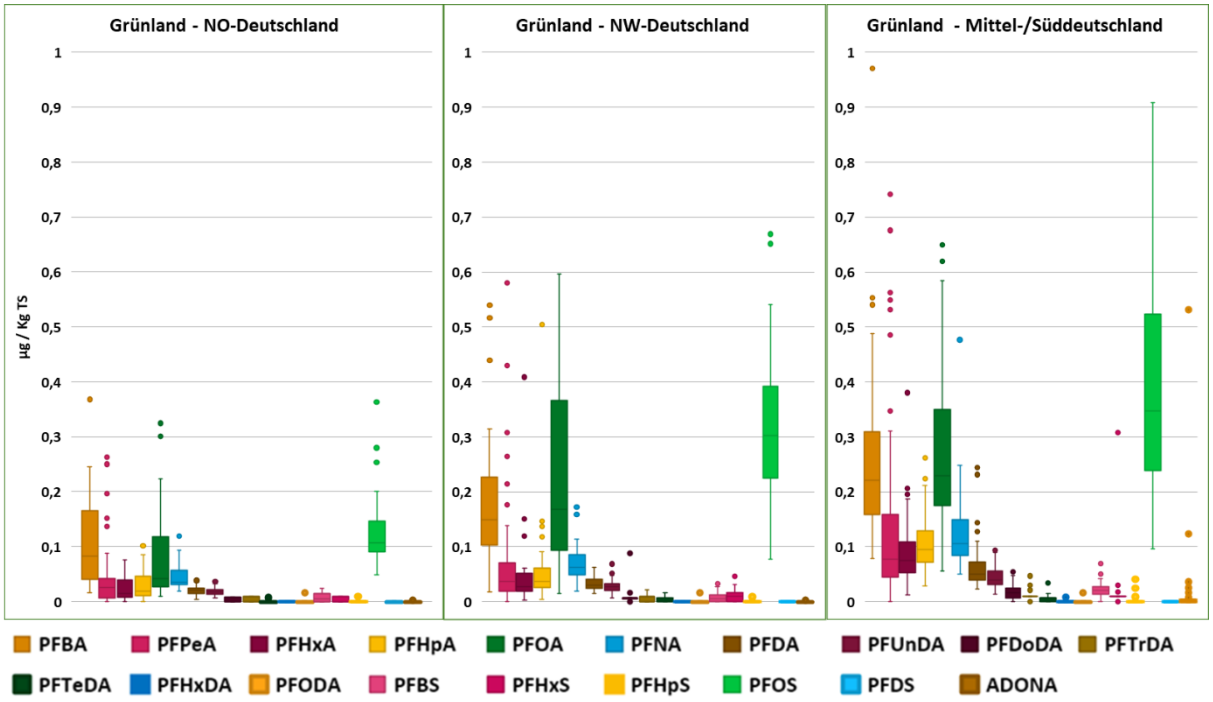
Einen Überblick der bundesweiten regionalen Verteilung und Größenordnungen der Perfluorcarbonsäuren, Perfluorsulfonsäuren und ADONA in Acker und Grünland-Oberböden geben die Abbildung 7 und Abbildung 8. Dargestellt sind die humusklassenübergreifenden Verteilungen in den Regionen Nordostdeutsches Tiefland (NO-Deutschland), Nordwestdeutsches Tiefland (NW-Deutschland) und Mittel-/Süddeutschland. Berücksichtigt wurden bei Acker die Daten der Humusklassen h1-h5 und bei Grünland diejenigen der Humusklassen h2-h5.

Abbildung 7 Verteilung der Perfluorcarbonsäuren, Perfluorsulfonsäuren und ADONA in Acker-Oberböden in den Regionen Nordostdeutsches Tiefland (NO-Deutschland), Nordwestdeutsches Tiefland (NW-Deutschland) und Mittel-/Süddeutschland



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abbildung 8 **Verteilung der Perfluorcarbonsäuren, Perfluorsulfonsäuren und ADONA in Grünland-Oberböden in den Regionen Nordostdeutsches Tiefland (NO-Deutschland), Nordwestdeutsches Tiefland (NW-Deutschland) und Mittel- /Süddeutschland**

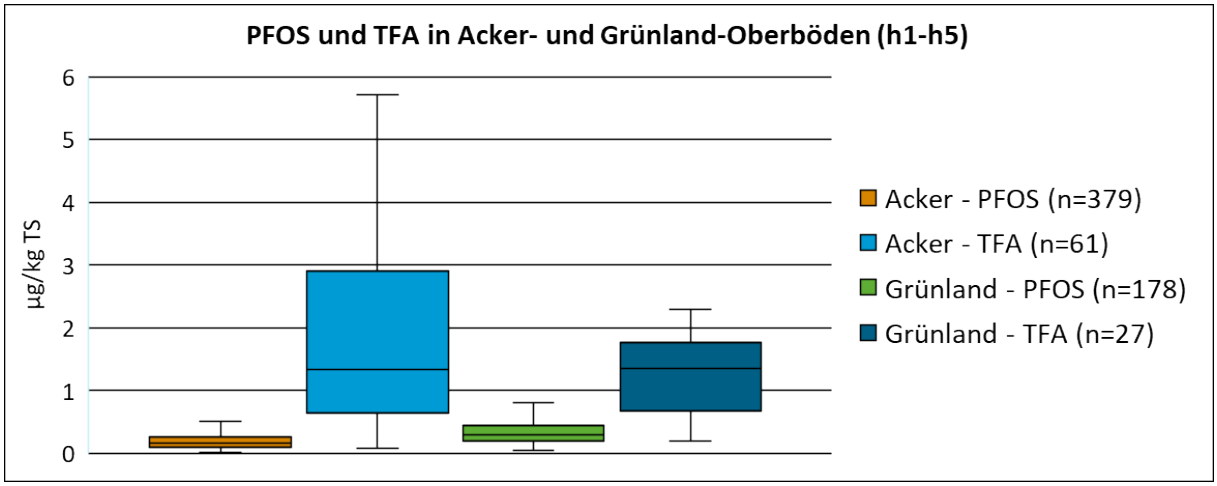


Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Die PFAS-Gehalte sind im Nordostdeutschen Tiefland im Vergleich zu den anderen beiden Regionen sowohl im Acker als auch im Grünland i.d.R. am niedrigsten. Die Hauptkontaminanten sind PFBA, PFOA und PFOS. In niedrigeren Gehaltsbereichen folgen PFPeA, PFHxA, PFHpA und PFNA. Die Gesamtgehalte der langkettigen Vertreter der Perfluorcarbonsäuren PFDA und PFUnDA liegen i.d.R. unterhalb der zuvor genannten PFAS. Die PFAS-Karten in Anhang B verdeutlichen die räumlichen Verteilungen der regelmäßig quantifizierten Substanzen und in Anhang C sind die Raummuster von Substanzen dargestellt, welche in der Regel nicht quantifiziert oder detektiert werden konnten.

TFA konnte in allen der 93 untersuchten Bodenproben des ländlichen Raums nachgewiesen werden. Bis auf Ausnahme von zwei Ackerproben, war die Substanz in allen Bodenproben auch quantifizierbar. Die Gesamtgehalte liegen i.d.R. deutlich höher als diejenigen von zum Beispiel PFOS (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9 Bundesweite Verteilung von PFOS und TFA in Acker- und Grünlandproben des ländlichen Raums



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.2.2 Substanzspezifische Auswertung der PFAS-Gesamtgehalte

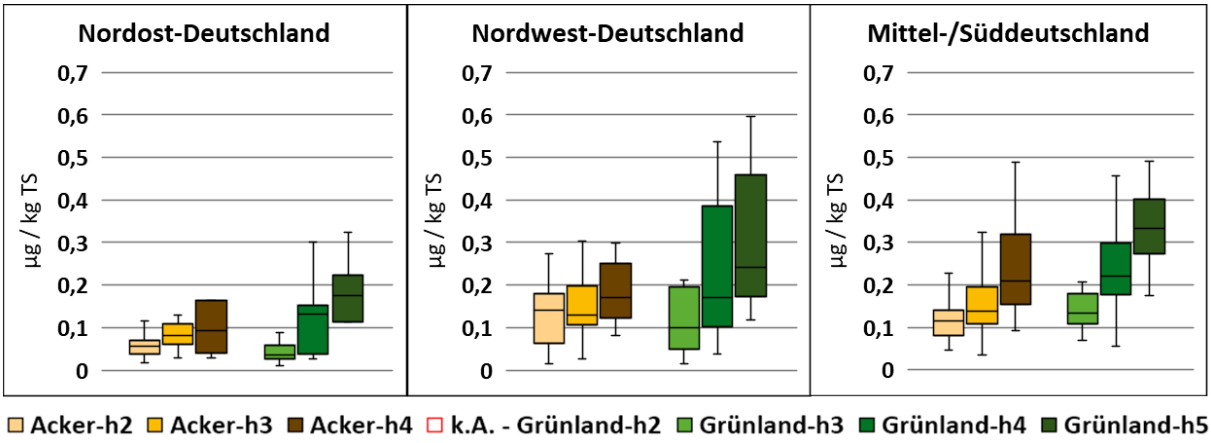
Im folgenden Abschnitt werden die Analyseergebnisse der untersuchten PFAS-Substanzen detailliert aufgeführt. Die Darstellung erfolgt dabei für jede Substanz konsistent anhand der ermittelten Differenzierungskriterien (Region, Nutzung, Humusklasse) sowie der bundesweiten und regionalen Medianwerte. Ergänzend veranschaulichen Whisker-Boxplots im Text und Kartendarstellungen in den Anhängen B und C die jeweiligen statistischen und geographischen Verteilungen. Dargestellt wird hierbei der ungefilterte Datenbestand vor einer auf logarithmierten Daten basierenden Ausreißer- und Extremwertbereinigung, wie sie für die Ableitung von Hintergrundwerten für Böden erforderlich ist. Dies führt dazu, dass der Abstand zwischen den Quantilen und die Gesamtspannweite in den hier gezeigten Plots vereinzelt enger ausfallen als bei den abgeleiteten Hintergrundwerten (Kapitel 4 und Anhang A).

PFOA wurde in allen untersuchten Bodenproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,007 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,002 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0,015 bis 0,49 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,11 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,06 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,13 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,14 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0,01 und 0,60 µg/kg TS, der bundesweite Medianwert liegt bei 0,20 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,04 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,17 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,23 µg/kg TS.

In Abbildung 10 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFOA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFOA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFOA in Anhang B Abbildung 35 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 10 PFOA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

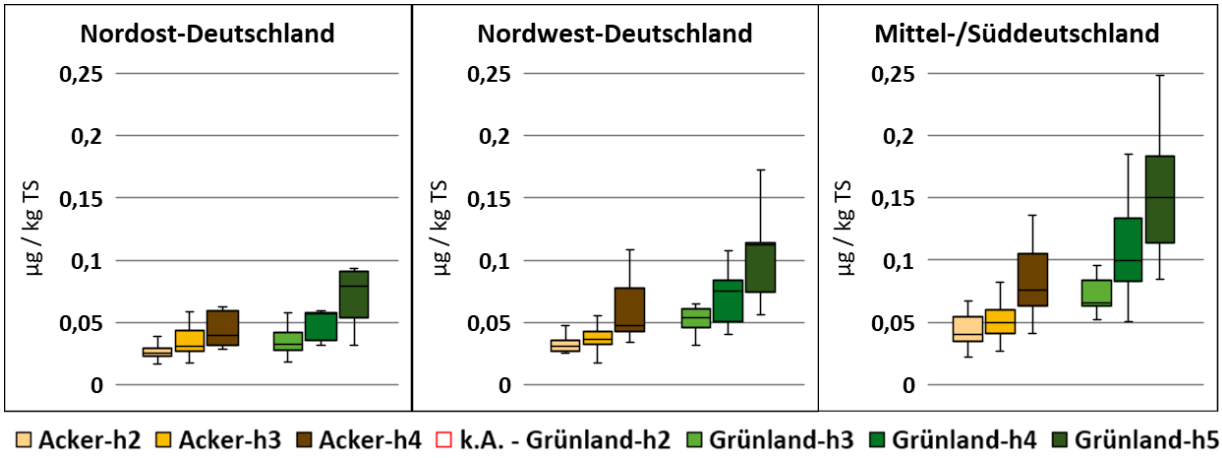
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für die Humusklassen h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der PFOA-Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die PFOA-Gehalte bei h6 liegen überwiegend zwischen 0,11 und 0,74 µg/kg TS, wobei der Maximalwert von 1,85 µg/kg TS bei einer Trockenrohdichte von 0,62 g/cm^3 auftrat. In der Klasse h7 wurden Gehalte zwischen 0,27 und 1,47 µg/kg TS gemessen.

PFNA wurde in nahezu allen untersuchten Bodenproben (Acker 98 %, Grünland 100 %) oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,016 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,005 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0,017 bis 0,14 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,04 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,03 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,04 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,05 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0,019 und 0,25 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,09 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,04 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,06 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,11 µg/kg TS.

In Abbildung 11 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFNA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFNA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFNA in Anhang B Abbildung 35 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 11 PFNA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

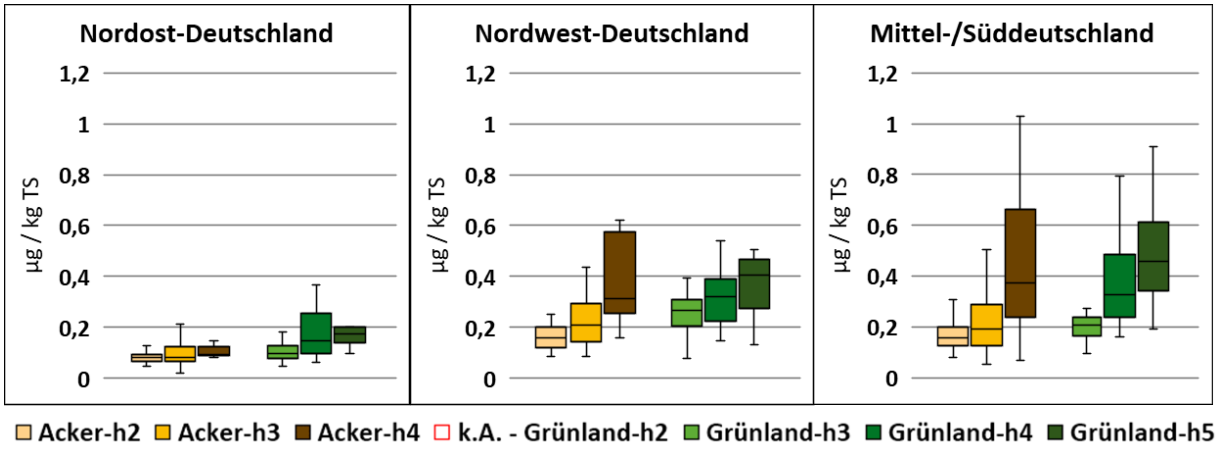
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 liegen zwischen 0,06 und 0,45 µg/kg TS, während in der Klasse h7 Werte von 0,11 bis 0,26 µg/kg TS gemessen wurden.

PFOS wurde in allen untersuchten Bodenproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,013 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,004 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0,022 bis 1,03 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,15 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,08 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,20 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,19 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0,05 und 0,91 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,29 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,10 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,30 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,34 µg/kg TS.

In Abbildung 12 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFOS-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFOS-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFOS in Anhang B Abbildung 36 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 12 PFOS – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

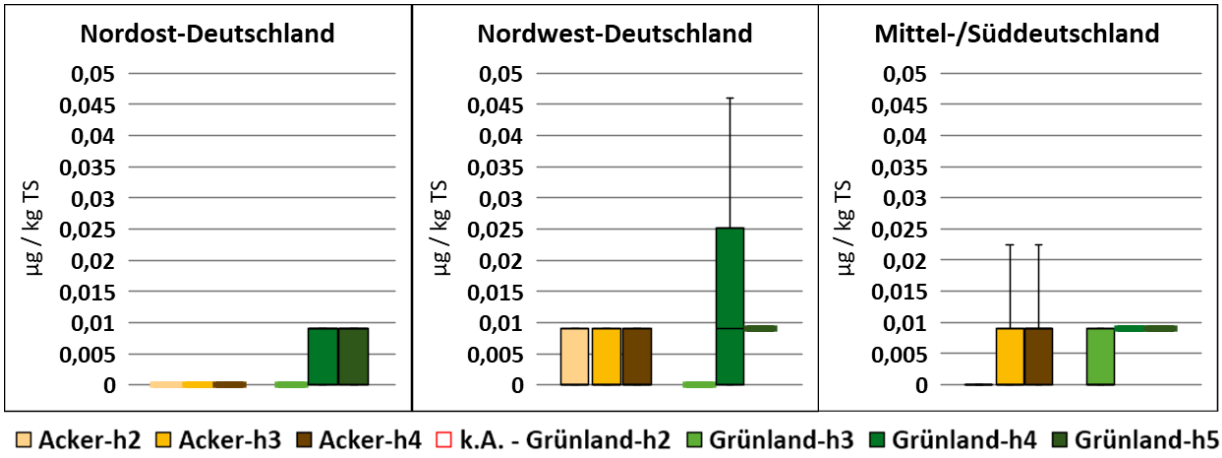
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Bei h6 liegen die Werte zwischen 0,14 und 1,0 µg/kg TS. In Klasse h7 wurden 0,2 bis 1,27 µg/kg TS gemessen, wobei ein Maximalwert von 1,84 µg/kg TS bei einer Trockenrohdichte von 0,4 g/cm^3 auftrat.

PFHxS wurde in 31 % der Ackerproben und 71 % der Grünlandproben nachgewiesen (Nachweisgrenze 0,006 µg/kg TS), wobei eine Quantifizierung nur in 3 % der Ackerproben (an 13 Standorten) und 16 % der Grünlandproben möglich war (Bestimmungsgrenze 0,018 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden wurde PFHxS in Nordost-Deutschland bis auf drei Standorte nicht nachgewiesen. In Nordwest-Deutschland erfolgte ein Nachweis in 43 % der Proben und eine Quantifizierung in 4 % der Proben, während in Mittel-/Süddeutschland in 44 % der Proben ein Nachweis (3 % quantifiziert) erfolgte.
- In Grünland-Oberböden lagen in Nordost-Deutschland 62 % der Proben unterhalb der Nachweisgrenze und 38 % unterhalb der Bestimmungsgrenze. In Nordwest-Deutschland wurde die Substanz in 60 % der Proben nachgewiesen (27 % quantifiziert) und in Mittel- /Süddeutschland in 82 % der Proben (9 % quantifiziert).

In Abbildung 13 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFHxS-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Aufgrund der geringen Anzahl an Quantifizierungen ist keine Abhängigkeit von den Humusgehalten erkennbar. Die Karte für PFHxS in Anhang C Abbildung 41 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Nachweise im ländlichen Raum.

Abbildung 13 PFHxS – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

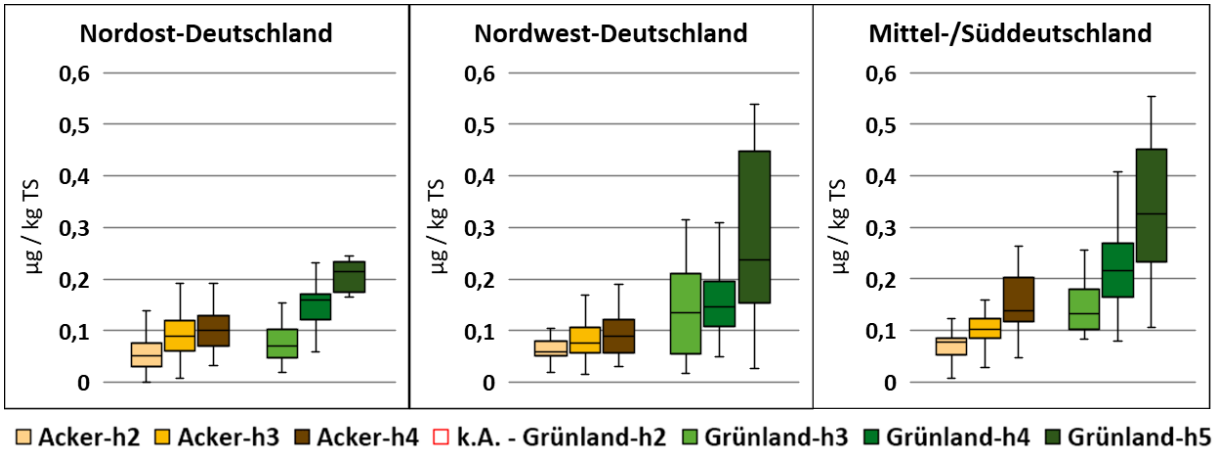
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 reichen von < NWG bis 0,06 µg/kg TS. In Klasse h7 wurden Werte von < 0,18 bis 0,09 µg/kg TS gemessen, wobei die beiden höchsten Messwerte mit Trockenrohdichten unter 0,5 g/cm^3 verknüpft sind.

PFBA wurde in 98 % der Ackerböden und 100 % der Grünlandböden oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,016 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,005 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,26 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,09 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,07 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,08 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,10 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0,018 und 0,56 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,18 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,08 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,15 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,22 µg/kg TS.

In Abbildung 14 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFBA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFBA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFBA in Anhang B Abbildung 37 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 14 PFBA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

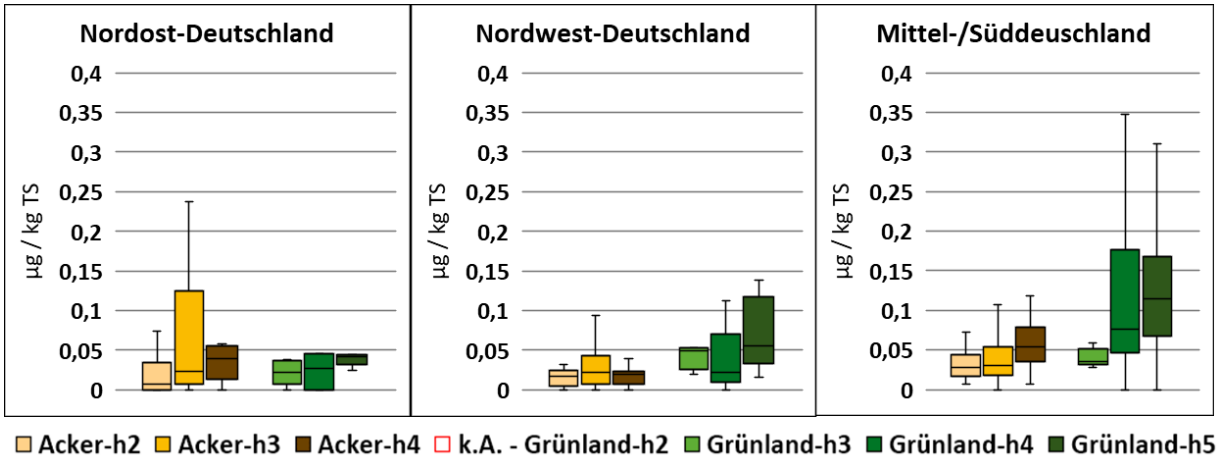
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 liegen zwischen 0,09 und 0,77 µg/kg TS. In Klasse h7 wurden Werte von 0,34 bis 0,96 µg/kg TS gemessen, mit einem Maximalgehalt von 1,33 µg/kg TS bei einer Trockenrohdichte von 1,36 g/cm^3.

PFPeA wurde in 69 % der Ackerproben und 87 % der Grünlandproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,014 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,004 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,24 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,03 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,01 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,02 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,03 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0 und 0,35 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,05 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,03 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,07 µg/kg TS.

In Abbildung 15 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFPeA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFPeA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFPeA in Anhang B Abbildung 37 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 15 PFPeA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

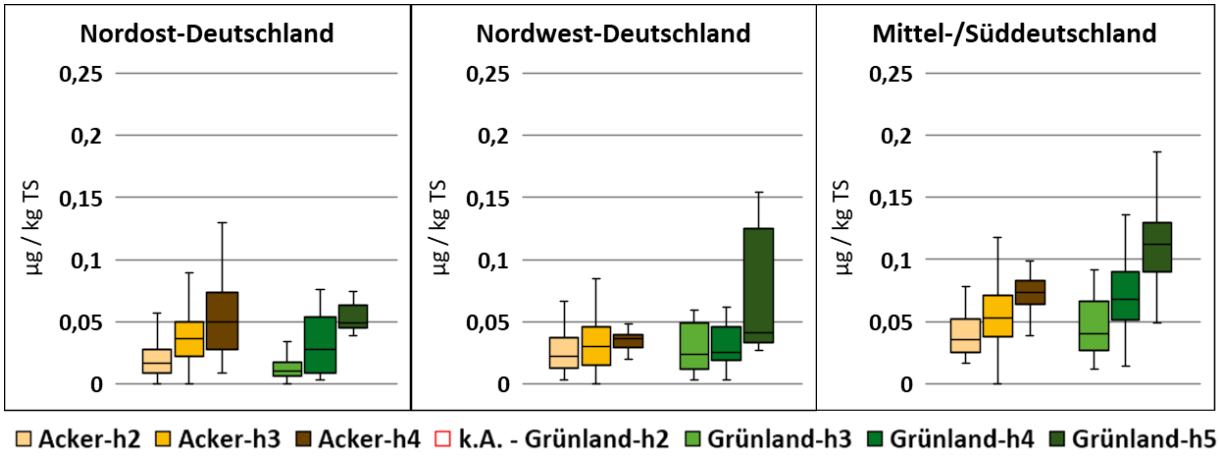
Die in der Abbildung nicht dargestellten Grünland-Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) liegen bei h6 zwischen 0,02 und 0,18 µg/kg TS (Extremwerte bis 0,87 µg/kg TS). In der Klasse h7 wurden Gehalte von < NWG bis 0,16 µg/kg TS gemessen, mit einem Extremwert von 0,63 µg/kg TS bei einer Trockenrohdichte von 0,4 g/cm^3. Für NO- und NW-Deutschland bestätigt sich damit der Trend, dass die Gehalte mit steigendem Humusgehalt zunehmen. Bei Mittel- /Süddeutschland liegen die Messergebnisse von Proben mit Humusgehalten von h6 und h7 in der Regel im Bereich der Humusklassen h4 und h5, wobei auch hier die Maximalwerte deutlich höher liegen.

PFHxA wurde in 95 % der Ackerproben und 93 % der Grünlandproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,007 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,002 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,12 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,04 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,05 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0 und 0,19 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,06 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,07 µg/kg TS.

In Abbildung 16 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFHxA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFHxA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFHxA in Anhang B Abbildung 38 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 16 PFHxA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

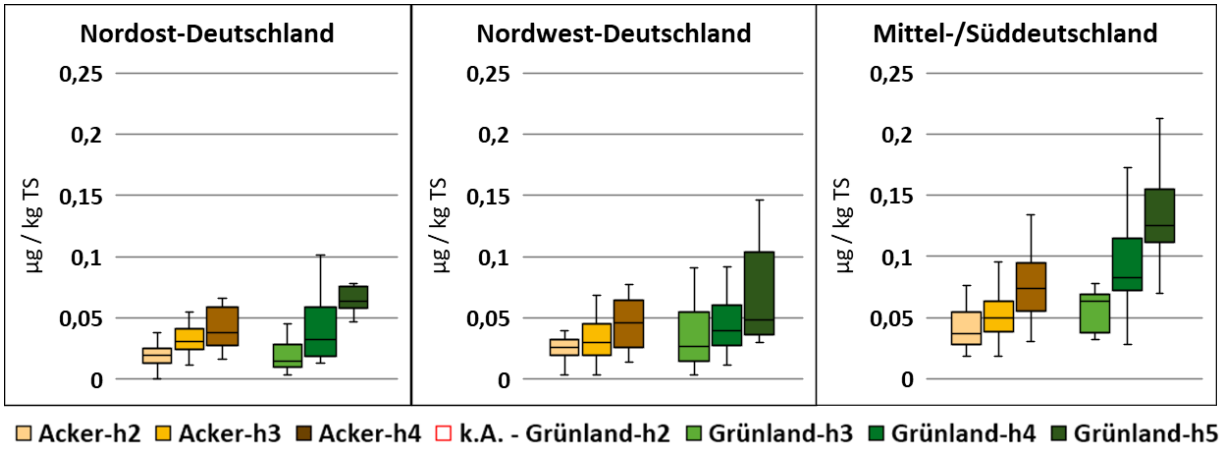
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 liegen zwischen 0,05 und 0,25 µg/kg TS, in der Klasse h7 zwischen 0,08 und 0,28 µg/kg TS.

PFHpA wurde in jeweils 98 % der Acker- und Grünlandproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,008 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,002 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,13 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,04 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,05 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0 und 0,21 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,07 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,04 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,09 µg/kg TS.

In Abbildung 17 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFHpA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFHpA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFHpA in Anhang B Abbildung 38 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 17 PFHpA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

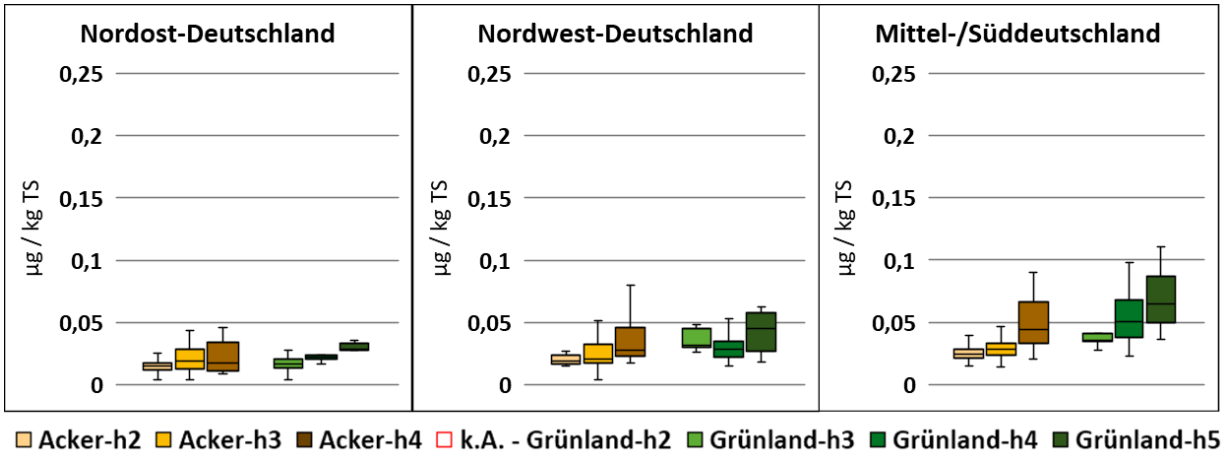
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Werte bei h6 liegen zwischen 0,03 und 0,51 µg/kg TS, in der Klasse h7 wurden Gehalte von 0,11 bis 0,24 µg/kg TS gemessen.

PFDA wurde in 97 % der Ackerproben und 99 % der Grünlandproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,008 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,003 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von kleiner Bestimmungsgrenze bis 0,09 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,024 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,02 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,03 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen kleiner Bestimmungsgrenze und 0,11 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,039 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel- /Süddeutschland 0,05 µg/kg TS.

In Abbildung 18 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFDA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFDA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFDA in Anhang B Abbildung 39 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 18 PFDA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

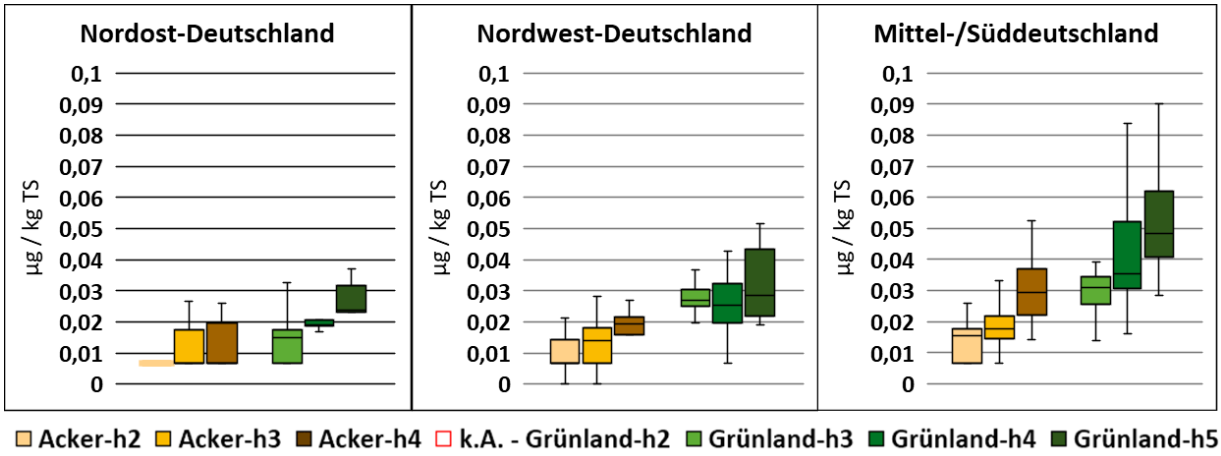
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Bei h6 wurden Gehalte von 0,03 bis 0,16 µg/kg TS gemessen, während die Werte in Klasse h7 zwischen 0,05 und 1,3 µg/kg TS liegen.

PFUnDA wurde – mit Ausnahme von drei Ackerproben – in allen Bodenproben nachgewiesen und in 63 % der Ackerböden und 95 % der Grünlandböden oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,013 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,004 µg/kg TS). Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,05 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,02 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland kleiner Bestimmungsgrenze, in Nordwest-Deutschland 0,01 µg/kg TS und in Mittel- /Süddeutschland 0,02 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen kleiner Bestimmungsgrenze und 0,09 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,03 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,02 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,03 µg/kg TS und in Mittel- /Süddeutschland 0,04 µg/kg TS.

In Abbildung 19 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFUnDA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFUnDA-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt an. Die Karte für PFUnDA in Anhang B Abbildung 39 verdeutlicht die räumliche Verteilung dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 19 PFUnDA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

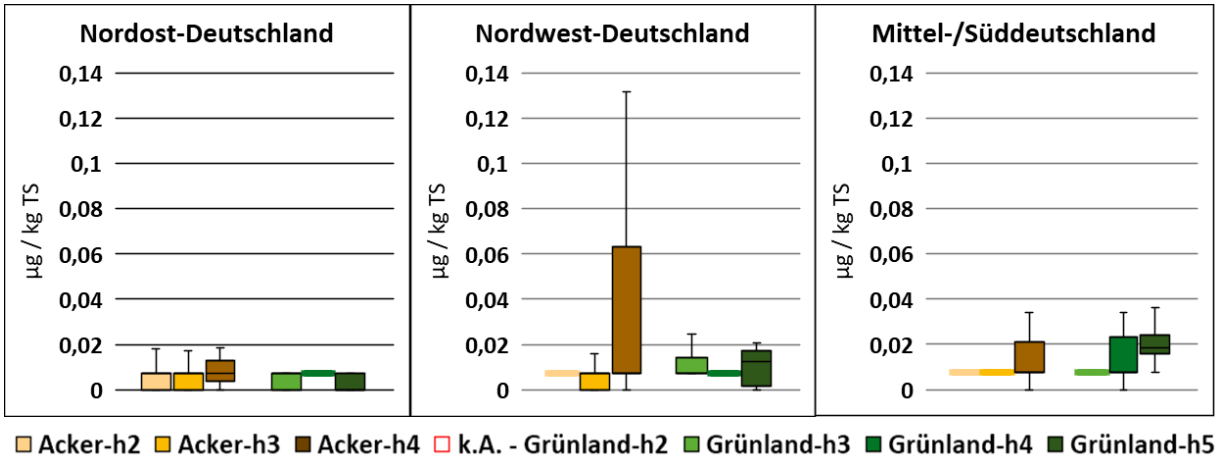
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 liegen zwischen 0,02 und 0,17 µg/kg TS, in der Klasse h7 zwischen 0,04 und 0,11 µg/kg TS.

PFDoDA wurde in 81 % der Ackerproben und in 87 % der Grünlandproben nachgewiesen (Nachweisgrenze 0,005 µg/kg TS) und eine Quantifizierung oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,015 µg/kg TS war in 16 % der Ackerproben und 40 % der Grünlandproben möglich. Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,13 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane liegen in Nordost- und Nordwest-Deutschland als auch in Mittel-/Süddeutschland unterhalb der Bestimmungsgrenze.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0 und 0,04 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane liegen in Nordost- und Nordwest-Deutschland unterhalb der Bestimmungsgrenze und in Mittel-/Süddeutschland beträgt der Median 0,016 µg/kg TS.

In Abbildung 20 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFDoDA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die Karte für PFDoDA in Anhang C Abbildung 41 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Nachweise dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 20 PFDoDA – nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

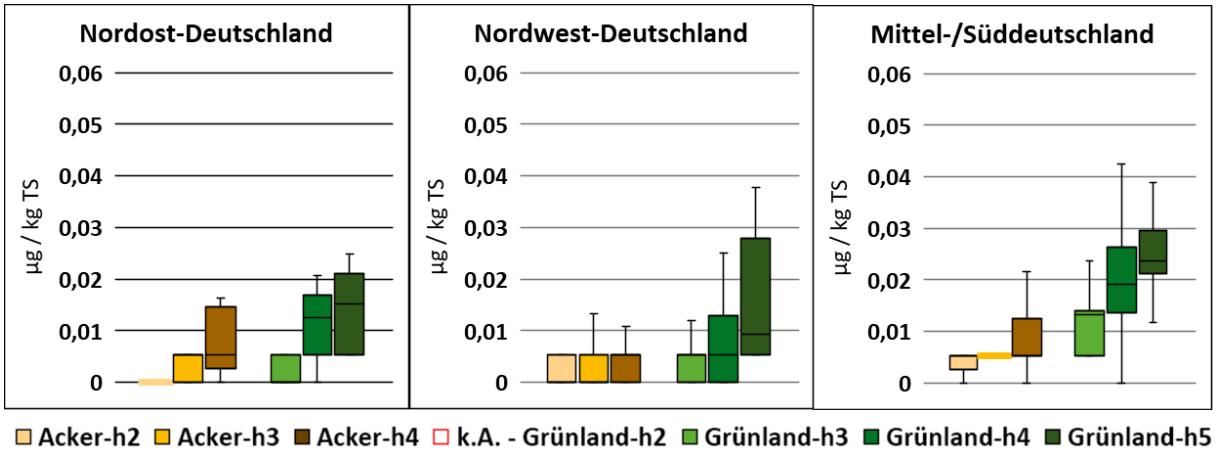
Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Die Gehalte bei h6 liegen zwischen nicht nachweisbar und 0,05 µg/kg TS und In Klasse h7 liegen die Messergebnisse zwischen nicht nachweisbar und 0,04 µg/kg TS.

PFBS wurde in 65 % der Ackerproben und in 87 % der Grünlandproben nachgewiesen (Nachweisgrenze 0,003 µg/kg TS) und eine Quantifizierung oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,011 µg/kg TS war in 12 % der Ackerproben und 67 % der Grünlandproben möglich. Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von 0 bis 0,22 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane liegen in Nordost- und Nordwest-Deutschland unterhalb der Nachweisgrenze und in Mittel-/Süddeutschland unterhalb der Bestimmungsgrenze.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0 und 0,04 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,015 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane liegen in Nordost- und Nordwest-Deutschland unterhalb der Bestimmungsgrenze und in Mittel-/Süddeutschland beträgt der Median 0,02 µg/kg TS.

In Abbildung 21 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der PFBS-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die Karte für PFBS in Anhang C Abbildung 42 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Nachweise dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 21 PFBS– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Die in der Abbildung nicht dargestellten Messergebnisse für h6 (n=9) und h7 (n=12) bestätigen die generelle Zunahme der Gehalte mit steigendem Humusanteil. Bei h6 liegen die Messergebnisse zwischen < BG und 0,06 µg/kg TS, in der Klasse h7 zwischen 0,03 und 0,07 µg/kg TS.

Das Spektrum der untersuchten Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren umfasst zudem die Verbindungen **PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFHpS** und **PFDS**. Für diese Stoffgruppen ergeben sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilungen:

- **PFTrDA** (Nachweisgrenze 0,007 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,02 µg/kg TS) wurde in 76 % der Acker- und 75 % der Grünlandproben nachgewiesen. Eine Quantifizierung war in 19 % der Grünlandproben und lediglich in 3 % der Ackerproben (an 13 Standorten) möglich. Die Messergebnisse liegen für beide Nutzungsarten im Bereich von 0 bis 0,025 µg/kg TS.
- **PFTeDA** (Nachweisgrenze 0,005 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,015 µg/kg TS) wurde in 20 % der Acker- und 50 % der Grünlandproben nachgewiesen. Eine Quantifizierung war in 13 Ackerproben und 8 Grünlandproben möglich. Die Messergebnisse für die Ackerproben liegen im Bereich von 0 und kleiner Bestimmungsgrenze, diejenigen für Grünland zwischen 0 und 0,017 µg/kg TS.
- **PFHxDA** (Nachweisgrenze 0,006 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,018 µg/kg TS) wurde in 4 % der Acker- und 5 % der Grünlandproben nachgewiesen. Eine Quantifizierung war lediglich in vier Ackerproben möglich; in den Grünlandproben erfolgte keine Quantifizierung.
- **PFODA** (Nachweisgrenze 0,011 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,032 µg/kg TS) wurde lediglich in jeweils vier Acker- und Grünlandproben nachgewiesen. Gehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze konnten nur an einem Ackerstandort quantifiziert werden.
- **PFHpS** (Nachweisgrenze 0,006 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,018 µg/kg TS) wurde in 5 % der Acker- und 20 % der Grünlandstandorte nachgewiesen. Eine Quantifizierung war an drei Acker- und sieben Grünlandstandorten möglich.

- **PFDS** (Nachweisgrenze 0,008 µg/kg TS, Bestimmungsgrenze 0,024 µg/kg TS) wurde an jeweils nur an einem Acker- und einem Grünlandstandort nachgewiesen; eine Quantifizierung war in keine Bodenprobe möglich.

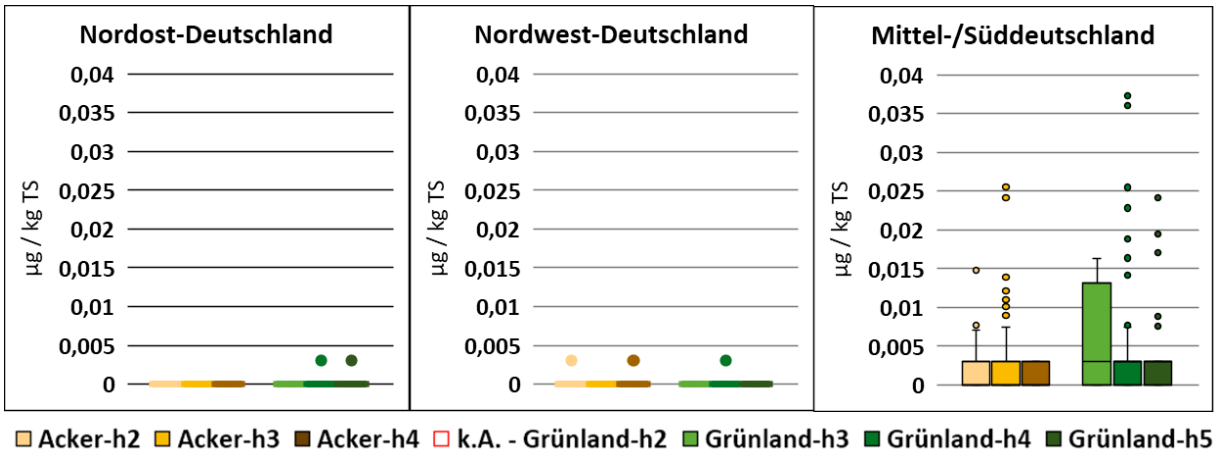
Die Karten für PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA und PFHpS in Anhang C Abbildung 42 – Abbildung 44 verdeutlichen die räumliche Verteilung der Nachweise dieser Substanzen in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Der PFOA-Ersatzstoff **ADONA** wurde – mit Ausnahme weniger Standorte – vornehmlich im Süden Deutschlands, insbesondere im Alpenvorland und angrenzenden Gebieten, nachgewiesen. Die Nachweisgrenze liegt bei 0,002 µg/kg TS; die Bestimmungsgrenze bei 0,006 µg/kg TS. Für die Messergebnisse ergibt sich folgende Verteilung:

- In Nordost- und Nordwestdeutschland konnte ADONA lediglich in den Proben von drei Acker- und fünf Grünland-Standorten nachgewiesen werden; eine Quantifizierung dieser Substanz war in keiner der Bodenproben möglich.
- In Ackerproben aus der Region Mittel- und Süddeutschland wurde ADONA in 28% der Proben nachgewiesen und in 11% quantifiziert, wobei alle Messergebnisse oberhalb der Bestimmungsgrenze aus dem Alpenvorland stammen. Die Ergebnisse der Untersuchungen liegen zwischen „nicht nachweisbar“ und 0,03 µg/kg TS und der Medianwert liegt unterhalb der Nachweisgrenzen.
- In Grünlandproben aus der Region Mittel- und Süddeutschland wurde die Substanz in 53% der Proben nachgewiesen und in 27% quantifiziert. Die Hälfte aller Messergebnisse oberhalb der Bestimmungsgrenze stammt hier aus dem Alpenvorland. Die Ergebnisse der Untersuchungen liegen hier zwischen 0 und 0,04 µg/kg TS und der Medianwert liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze.

In Abbildung 22 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2–h5) differenzierte Verteilung der ADONA-Gehalte im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Aufgrund der geringen Anzahl an Nachweisen von ADONA in den Bodenproben ist keine Abhängigkeit von den Humusgehalten erkennbar. Die Karte für ADONA in Anhang C Abbildung 44 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Nachweise dieser Substanz in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 22 ADONA– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Mit **HFPO-DA (GenX)** wurde ein weiterer Ersatzstoff untersucht, welcher jedoch bei einer Nachweisgrenze von 0.008 µg/kg TS in keiner Bodenprobe detektiert werden konnte.

Es wurden auch zehn **Vorläuferverbindungen (Precursor)** untersucht, die zu persistenten Perfluorcarbon- oder Perfluorsulfonsäuren abgebaut werden können: **PFOSA, N-MeFOSA, N-MeFOSAA, N-EtFOSA, N-EtFOSAA, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 9Cl-PF3ONS, 8:2 FTUCA** und **8:2 diPAP**. Die Nachweisgrenzen liegen hier zwischen 0,004 und 0,011 µg/kg TS, die Bestimmungsgrenzen zwischen 0,012 und 0,032 µg/kg TS (vgl. Tabelle 5). Diese Verbindungen konnten nur in wenigen Proben nachgewiesen werden und lagen dann in der Regel unterhalb der Bestimmungsgrenze; lediglich in 6 % der Ackerproben und 10 % der Grünlandproben ließen sich eine oder mehrere Vorläuferverbindungen detektieren. Während zwei Verbindungen (N-MeFOSA, 9Cl-PF3ONS) an keinem Standort nachweisbar waren, wurden PFOSA und N-EtFOSAA am häufigsten detektiert und konnten an jeweils sieben Standorten auch quantifiziert werden. Die übrigen Substanzen, wie etwa die FTS-Verbindungen oder N-MeFOSAA, traten nur sporadisch auf, wobei die Nachweise hauptsächlich auf Ackerstandorte entfielen.

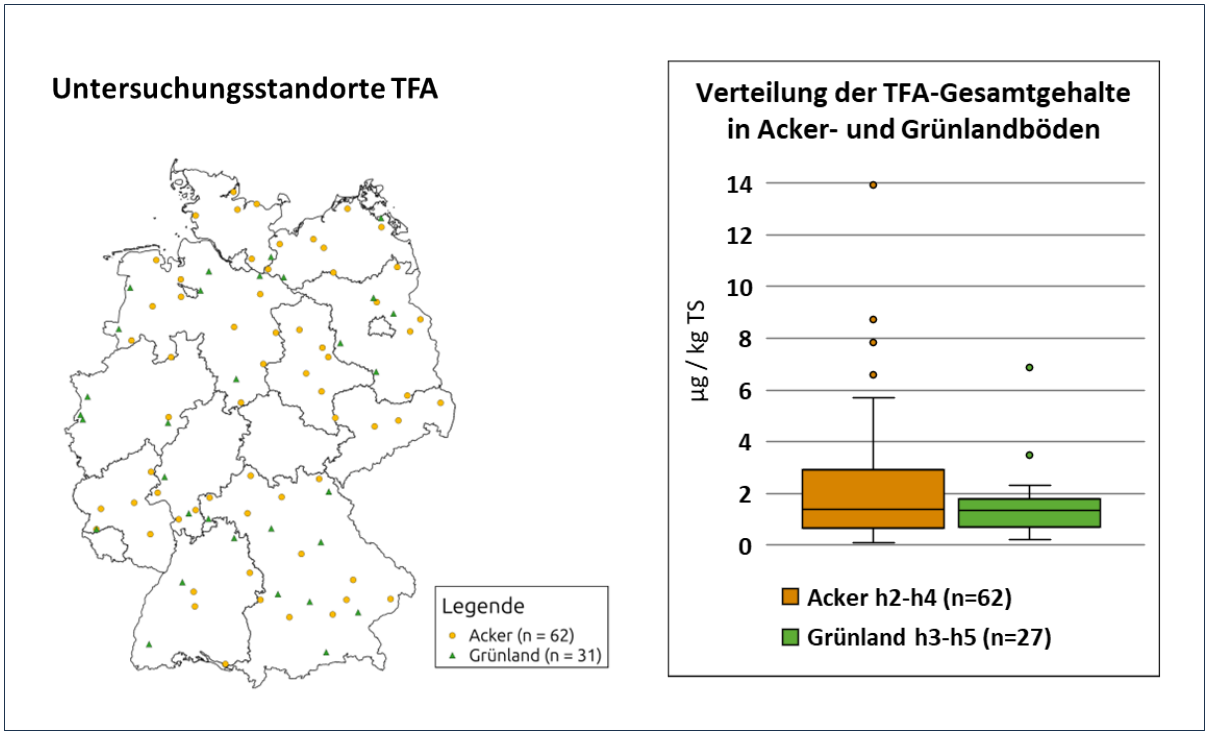
Der Nachweis von Vorläuferverbindungen korreliert häufig mit erhöhten Gehalten an Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren (z. B. PFOA, PFNA, PFOS) oder erhöhten PFAS-Summenwerten einzelner Proben. Zudem wurden PFOSA und N-EtFOSAA oft gemeinsam in denselben Bodenproben detektiert.

Trifluoressigsäure (TFA) wurde als Vertreter der ultrakurzkettigen PFAS an 93 der 581 Standorten des ländlichen Raums untersucht und konnte – mit der Ausnahme von zwei Ackerproben – in allen Bodenproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,16 µg/kg TS quantifiziert (Nachweisgrenze 0,05 µg/kg TS) werden. Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Messergebnisse im Bereich von < Bestimmungsgrenze bis 5,7 µg/kg TS, der Medianwert beträgt1,4 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h4.
- In Grünland-Oberböden liegen die Messergebnisse zwischen 0,19 und 2,3 µg/kg TS, der Medianwert liegt bei 1,3 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5.

In Abbildung 23 ist die Lage der Untersuchungsstandorte und die nach Nutzungsart differenzierte Spannweite der TFA-Gehalte (h2-h5) im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Eine regionale Differenzierung und die Abhängigkeit der Messergebnisse von Humusgehalten konnte (auf Grund der geringen Probenzahlen in den Regionen) nicht nachgewiesen werden.

Abbildung 23 Lage der Untersuchungsstandorte von TFA und Verteilung der Messergebnisse



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Der Probenumfang für die TFA-Untersuchungen umfasste zusätzlich eine Grünlandprobe der Humusklasse h6 mit einem Gehalt von 10,8 µg/kg TS sowie drei Proben der Klasse h7, deren Gehalte zwischen 1,94 und 4,86 µg/kg TS lagen.

Während bei den kurz- und langkettigen PFAS-Verbindungen (C4-C18) im Allgemeinen höhere Gehalte in Grünlandböden im Vergleich zu Ackerstandorten festzustellen sind, zeigt sich bei TFA – wie in Abbildung 23 dargestellt – ein abweichendes Bild. Hier liegen die Messergebnisse in Ackerböden auf einem vergleichbaren oder teils höheren Niveau. Als eine Ursache für das Belastungsniveau in Ackerböden kommen bestimmte fluorierte Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe als potenzielle Vorläufersubstanzen für TFA in Betracht. Wirkstoffe wie Flufenacet, Diflufenican oder Fluopyram enthalten Trifluoromethyl-Gruppen, die zu TFA transformiert werden können (UBA, 2023). Da diese Wirkstoffe primär im Ackerbau eingesetzt werden, stellt dies einen spezifischen Eintragspfad dar, der bei klassischen PFAS-Verbindungen in dieser Form entfällt. Demgegenüber ist die luftgetragenen Deposition von TFA in Böden für beide Nutzungsarten gleichermaßen von Bedeutung. Durch die hohe Mobilität von TFA können höheren Gehalte in Ackerböden auch saisonal auf aktuelle PSM-Anwendungen hinweisen. Darüber hinaus könnte die untypische Verteilung – mit höheren 3. Quantilen und Maximalwerten im Acker – methodisch bedingt sein. Da für die TFA-Analysen im Wesentlichen Standorte ausgewählt wurden, die mittlere-höhere C4-C10-PFAS-Gehalte aufwiesen, sind gering belastete Ackerflächen in der Stichprobe möglicherweise unterrepräsentiert: Dies kann das Bild im Vergleich zum Grünland zusätzlich verschieben und eine Erklärung für die in ähnlicher Größenordnung liegenden Medianwerte sein.

Zusammenfassend kann dargestellt werden, dass die Gehalte von **PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, PFOS** in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt ansteigen. Für **PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFHpS PFDS, PFHxS** konnte

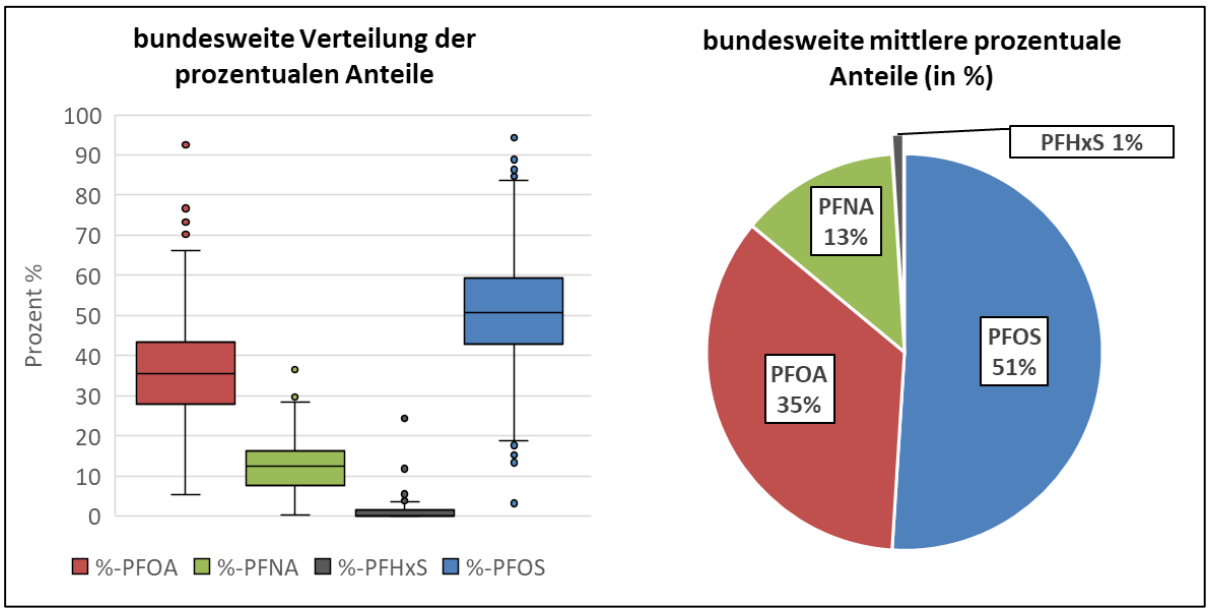
keine Abhängigkeit vom Humusgehalt identifiziert werden, da diese Stoffe häufig nicht quantifizierbar waren. Der Nachweis von **ADONA** beschränkt sich fast ausschließlich auf das Alpenvorland und angrenzende Gebiete. Für **TFA** konnte keine regionale Differenzierung und Korrelation mit Humusgehalten nachgewiesen werden. Der Nachweis von **Vorläuferverbindungen** korreliert häufig mit erhöhten Gehalten an Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren (z. B. PFOA, PFNA, PFOS).

3.2.3 Summe der Gesamtgehalte von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS (EFSA4-PFAS)

Im Jahr 2020 veröffentlichte die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) eine umfassende Risikobewertung zu vier per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS): **PFOA, PFNA, PFHxS** und **PFOS** (EFAS, 2020). Diese vier Stoffe wurden ausgewählt, da sie zu den persistenten und toxikologisch relevanten PFAS zählen, sich stark im menschlichen Körper anreichern und etwa die Hälfte der PFAS-Belastung im menschlichen Blut ausmachen. Sie werden im Folgenden als EFSA4 bezeichnet. Da die EFSA4-PFAS die Grundlage für EU-weite Höchstgehalte in Lebensmitteln bilden, kann ihre Summe als Indikator für die Bewertung des Transferrisikos in die menschliche Nahrungskette herangezogen werden.

Die Summe der EFSA4-PFAS setzt sich bei den für diese Studie untersuchten Bodenproben aus dem ländlichen Raum aus der Hauptkomponente PFOS (Median: 51%), gefolgt von PFOA (Median: 35%) und PFNA (Median: 13%) zusammen; PFHxS ist in der Regel nur geringfügig (Median: 1%) an der Höhe der EFAS4-Summe beteiligt (siehe Abbildung 24). Da sich PFHxS auf Grund seiner physikochemischen Eigenschaften in die wässrige Phase verlagert, rechtfertigen niedrige Feststoffnachweise keine Entwarnung.

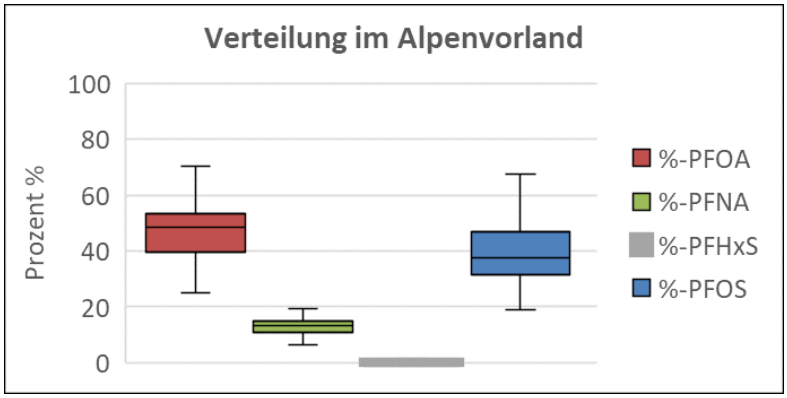
Abbildung 24 Bundesweit Verteilung und mittlere prozentuale Anteil von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS an der Summe-EFAS4



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abweichend vom bundesweit typischen Mischungsverhältnis weist die EFSA4-Summe im Alpenvorland eine spezifische Zusammensetzung auf: Hier stellt PFOA mit einem Median von 48 % häufig den größten Anteil dar, während PFOS (37 %) einen deutlich geringeren Anteil an der Gesamtsumme aufweist als in der bundesweiten mittleren Zusammensetzung (siehe Abbildung 25).

Abbildung 25 Mittlere prozentuale Anteil von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS an der Summe-EFAS4 im Alpenvorland



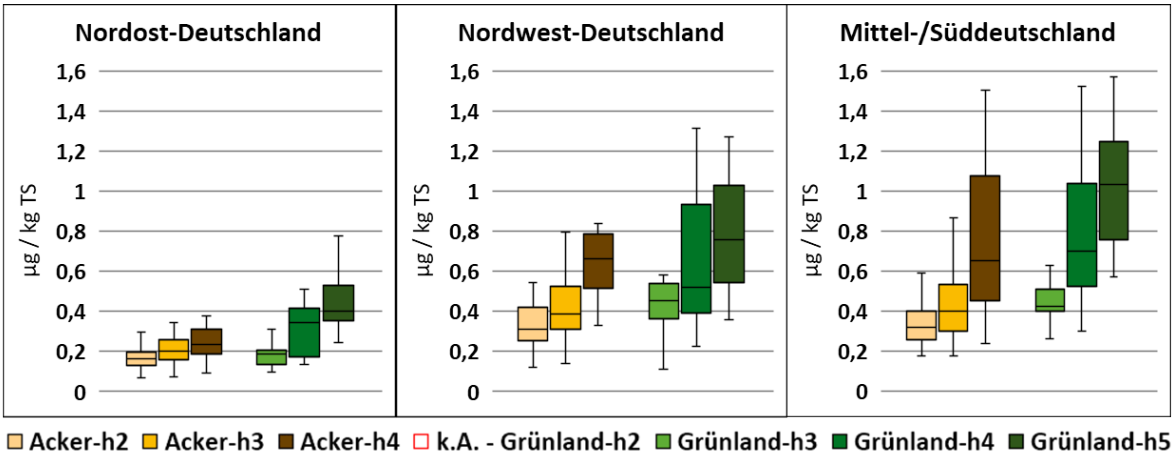
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Für alle Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Gesamtgehalte der Summe EFSA4 im Bereich von 0,07 bis 0,87 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,32 µg/kg TS für die Humusklassen h1–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,17 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,38 µg/kg TS und in Mittel- /Süddeutschland 0,39µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Summengehalte zwischen 0,09 und 1,57 µg/kg TS, der bundesweite Median liegt bei 0,57 µg/kg TS für die Humusklassen h2–h5. Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,20 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,51 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,71 µg/kg TS.

In Abbildung 26 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der Summe der EFSA4-Verbindungen im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die EFSA4-Summengehalte steigen in der Regel mit zunehmenden Humusgehalt an. Die Karte für Summe-EFSA4 in Anhang B Abbildung 36 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Summengehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 26 Summe-EFSA4– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.2.4 Summe der Gesamtgehalte von 19 PFAS-Verbindungen (Summe PFAS19)

Im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium finanzierten Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes zur Ableitung von PFAS-Prüfwertvorschlägen für die BBodSchV (Frische & Gehrenkemper, 2026) wurde ein Vorschlag für einen Summen-Prüfwert „Summe der PFAS“ für die nicht-kanzerogenen Wirkungen für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) erarbeitet. Auf Grundlage der verfügbaren toxikologischen Datenlage empfiehlt dieser Vorschlag, die folgenden 24 überwiegend langkettigen Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren inklusive ihrer bekannten Vorläuferverbindungen standardmäßig in der „Summe der PFAS“ zu berücksichtigen:

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

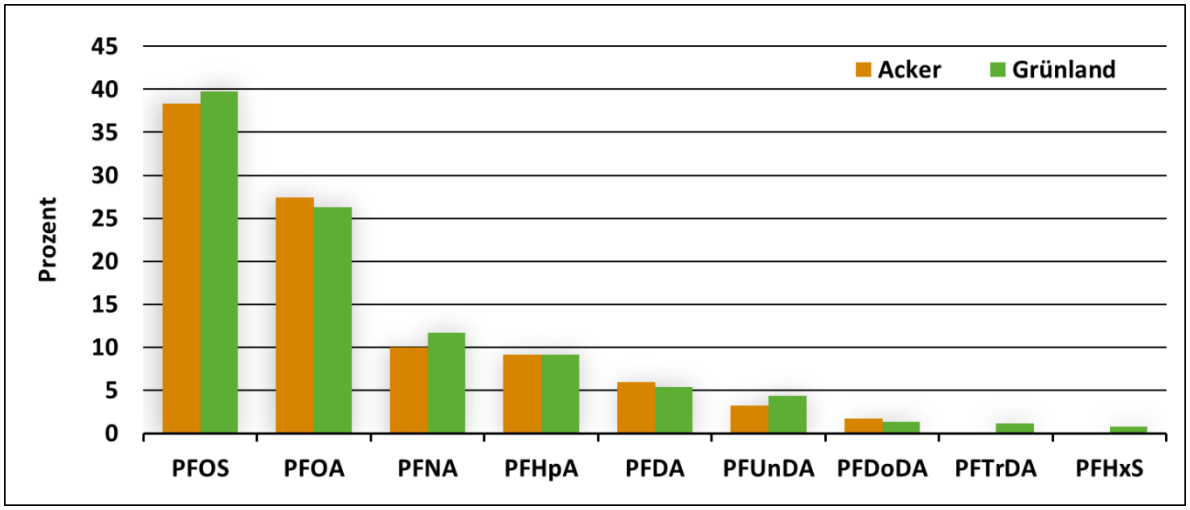
In dem vorgeschlagenen Summen-Prüfwert „Summe der PFAS“ wurden – grob skizziert - solche langkettigen PFAS eingeschlossen, für die aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes ein im Vergleich zu den umfassend toxikologisch charakterisierten EFSA4-PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) ein zumindest vergleichbares toxikologisches Profil (betreffend: Verweilzeiten im menschlichen Körper, toxische Wirkungen und relative Toxizität) als plausibel anzunehmen ist. Eine ausführliche fachliche Begründung für die im Summen-Prüfwert „Summe der PFAS“ eingeschlossenen 24 PFAS findet sich in Frische & Gehrenkemper (2026).

Von den 24 empfohlen Verbindungen für die „Summe PFAS“ wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes folgende fünf Substanzen nicht analysiert: PFPeS, PFNS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS. Die Forschungsauftrag umfasste die Untersuchung der in DIN EN ISO 21675:2019-10 gelisteten Substanzen (siehe Tabelle 2) zuzüglich TFA und die o.g. genannten Substanzen sind nicht Bestandteil dieser Norm.

Die Auswertung in diesem Bericht bezieht sich daher auf die verbleibenden 19 untersuchten Verbindungen. Daher wird deren Summenwert im Folgenden als „Summe PFAS19“ bezeichnet.

Die Zusammensetzung der Summe-PFAS19 wird in beiden Nutzungsarten maßgeblich durch die Hauptkomponenten PFOS und PFOA (ca. 39 % und 27 %) bestimmt. Es folgt eine Gruppe in der Regel stetig vertretener Verbindungen bestehend aus PFNA, PFHpA, PFDA, PFUnDA und PFDoDA, deren Anteile sich in Acker- und Grünlandböden weitgehend ähneln. Während in Ackerproben regelmäßig die genannten sieben PFAS enthalten sind, treten in Grünlandproben zusätzlich noch PFTrDA und PFHxS mit Anteilen von jeweils etwa 1 % auf (siehe Abbildung 27). PFOS, PFOA, PFNA und PFHpA bilden in etwa 85 % der Gesamtsumme von PFAS19.

Abbildung 27 Bundesweit mittlere prozentuale Anteile der einzelnen PFAS-Verbindungen an der Summe-PFAS19



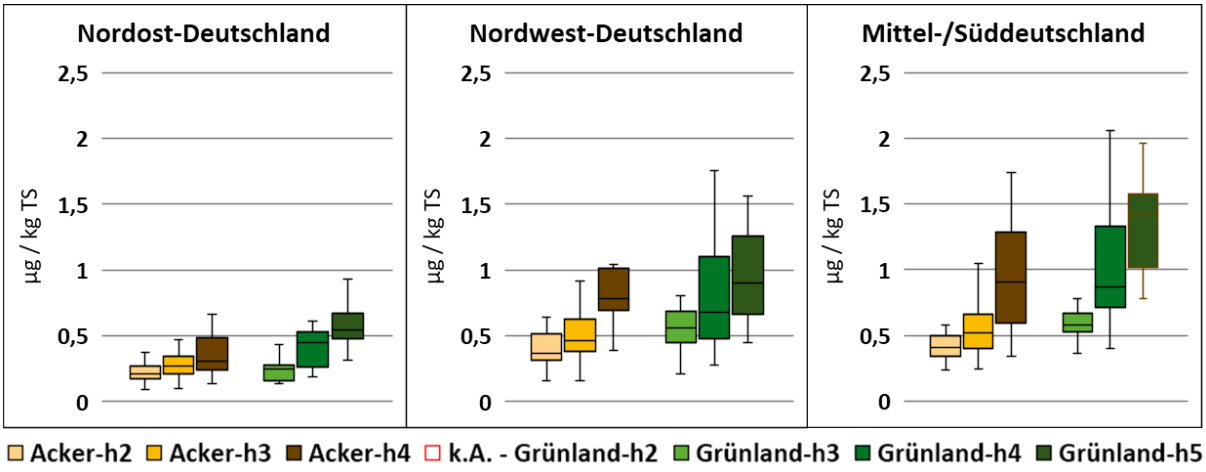
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Für die Messergebnisse ergibt sich – ohne Ausreißer und Extremwerte – folgende Verteilung:

- In Acker-Oberböden liegen die Gesamtgehalte der Summe PFAS19 im Bereich von 0,09 bis 1,05 µg/kg TS (Median: 0,39 µg/kg TS für h1–h5). Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,22 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,44 µg/kg TS und in Mittel- /Süddeutschland 0,48 µg/kg TS.
- In Grünland-Oberböden liegen die Summengehalte zwischen 0,14 und 2,06 µg/kg TS (Median: 0,75 µg/kg TS für h2–h5). Die Mediane betragen in Nordost-Deutschland 0,26 µg/kg TS, in Nordwest-Deutschland 0,61 µg/kg TS und in Mittel-/Süddeutschland 0,92 µg/kg TS.

In Abbildung 28 ist die nach Nutzungsart und Humusklassen (h2-h5) differenzierte Verteilung der Summe PFAS19 im ländlichen Raum Deutschlands dargestellt. Die PFAS19-Summengehalte steigen in der Regel mit zunehmenden Humusgehalt an. Die Karte für Summe-PFAS19 in Anhang B Abbildung 40 verdeutlicht die räumliche Verteilung Summengehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes.

Abbildung 28 Summe-PFAS19– nach Humusklassen differenzierte regionale Verteilung



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.3 Ergebnisse der TOP-Assay Untersuchungen

Der TOP-Assay wurde bei 31 Acker- und 17 Grünlandproben aus dem ländlichen Raum durchgeführt. Bei der Probenauswahl wurde insbesondere auf Standortproben mit mittleren bis hohen PFAS-Belastungen zurückgegriffen; in 11 dieser Proben wurden in der Target-Analyse Vorläuferverbindungen nachgewiesen, wobei PFOSA und N-EtFOSAA mit jeweils neun Nachweisen am häufigsten auftraten (siehe Abbildungen Abbildung 29Abbildung 30). Des Weiteren wurden 8:2 FTS (4-mal), N-MeFOSAA und 8:2 diPAP (jeweils 2-mal) sowie 6:2 FTS, N-EtFOSA und 8:2 FTUCA (jeweils einmal) detektiert.

Die ausgewählten Proben verteilen sich wie folgt auf die Regionen:

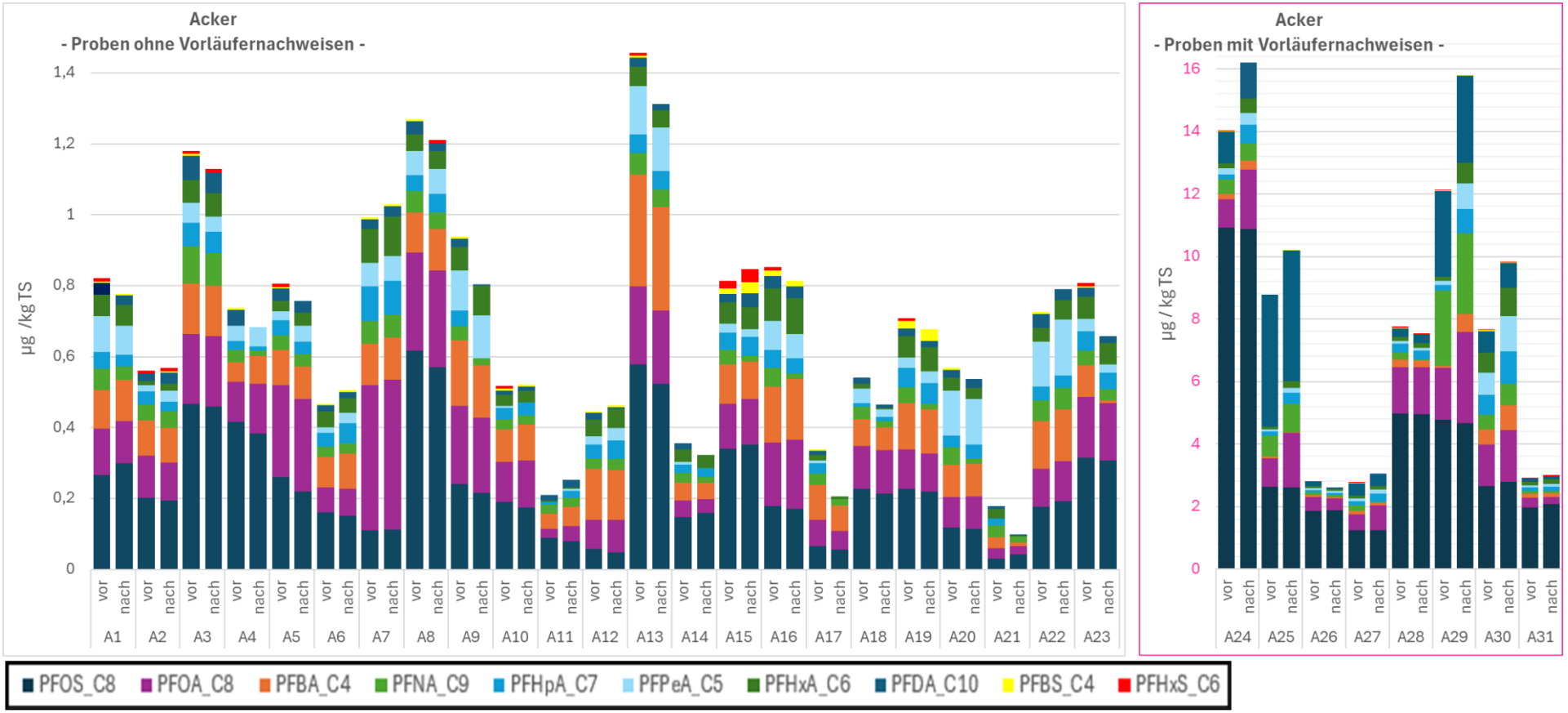
- NO-Deutschland: 8 Acker- und 11 Grünlandproben
- NW-Deutschland: 9 Acker- und 4 Grünlandproben und
- Mittel-/Süddeutschland: 14 Acker- und 11 Grünlandproben.

Die analysierten PFAS-Gehalte vor und nach dem TOP-Assay zeigen in den meisten Fällen, in denen bei der Target-Analyse keine Vorläufer gefunden werden, ähnliche Größenordnungen an. D.h., es ist in der Regel nicht davon auszugehen, dass im Bereich der Hintergrundbelastung die Vorläuferverbindungen zu einer signifikanten Belastung der Böden beitragen. In solchen Proben, in denen bereits mit der Target-Analytik PFAS Vorläufer detektiert werden konnten, wurden nur bei insgesamt höher belasteten Proben auch höhere PFCA-Gehalte durch den TOP-Assay ermittelt.

Eine nach Standorten differenzierte Darstellung der Ergebnisse vor und nach dem TOP-Assay für PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFBS, PFHxS und PFOS enthalten für Acker die nachfolgende Abbildung 29 und für Grünland die Abbildung 30.

Abbildung 29 PFAS in Acker-Oberböden vor und nach TOP-Assay

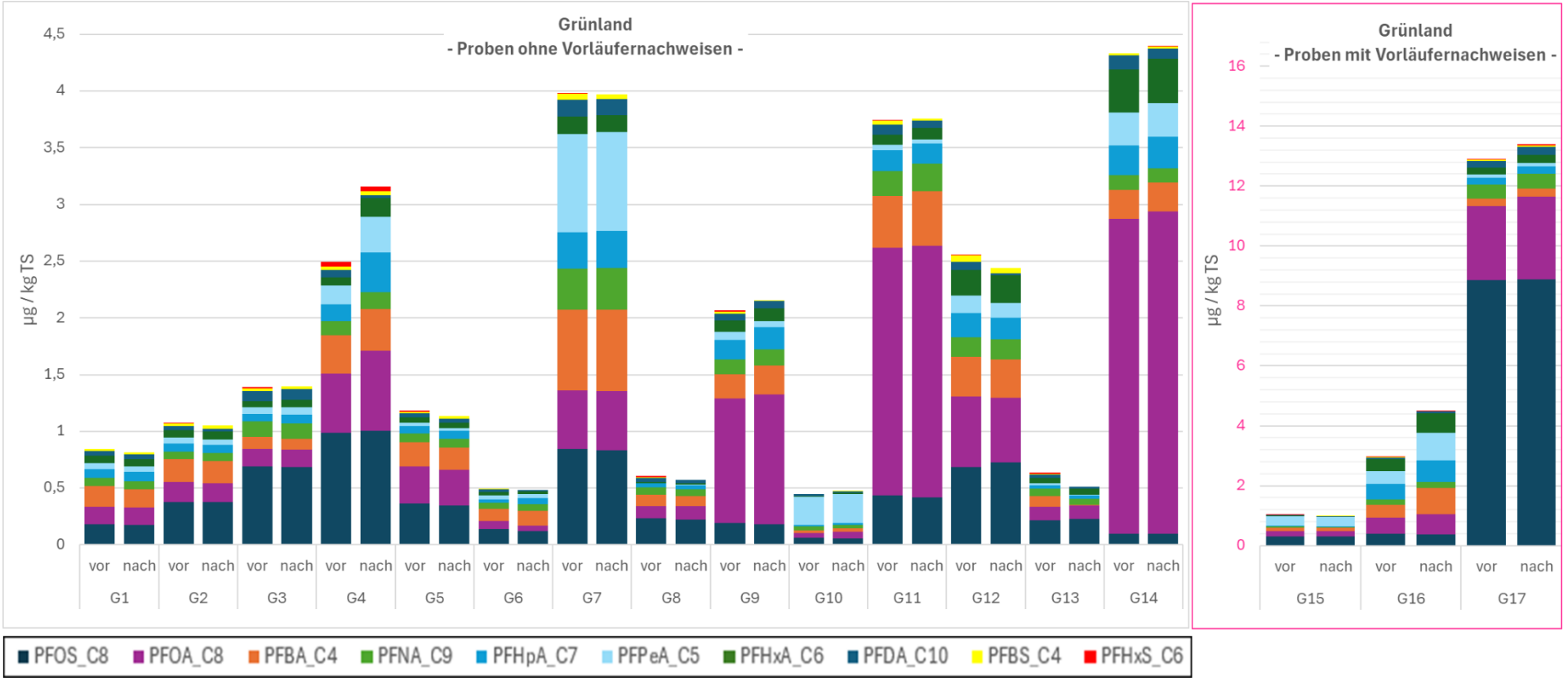
Die Darstellung ist differenziert nach Proben ohne (linke Seite) und mit dem Nachweis von Vorläufersubstanzen (rechte Seite) bei der Targetanalyse



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abbildung 30 PFAS in Grünland-Oberböden vor und nach TOP-Assay

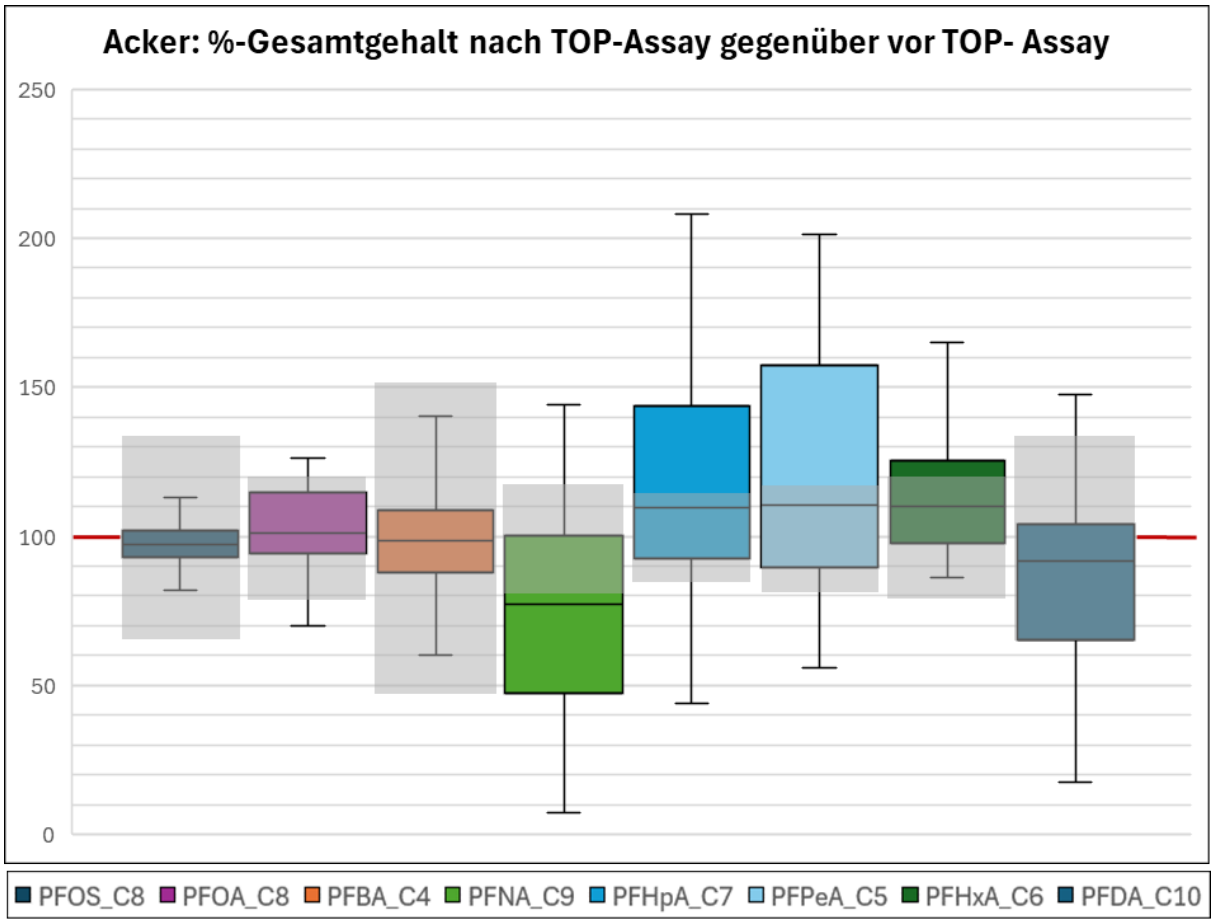
Die Darstellung ist differenziert nach Proben ohne (linke Seite) und mit dem Nachweis von Vorläufersubstanzen (rechte Seite) bei der Targetanalyse.- -



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

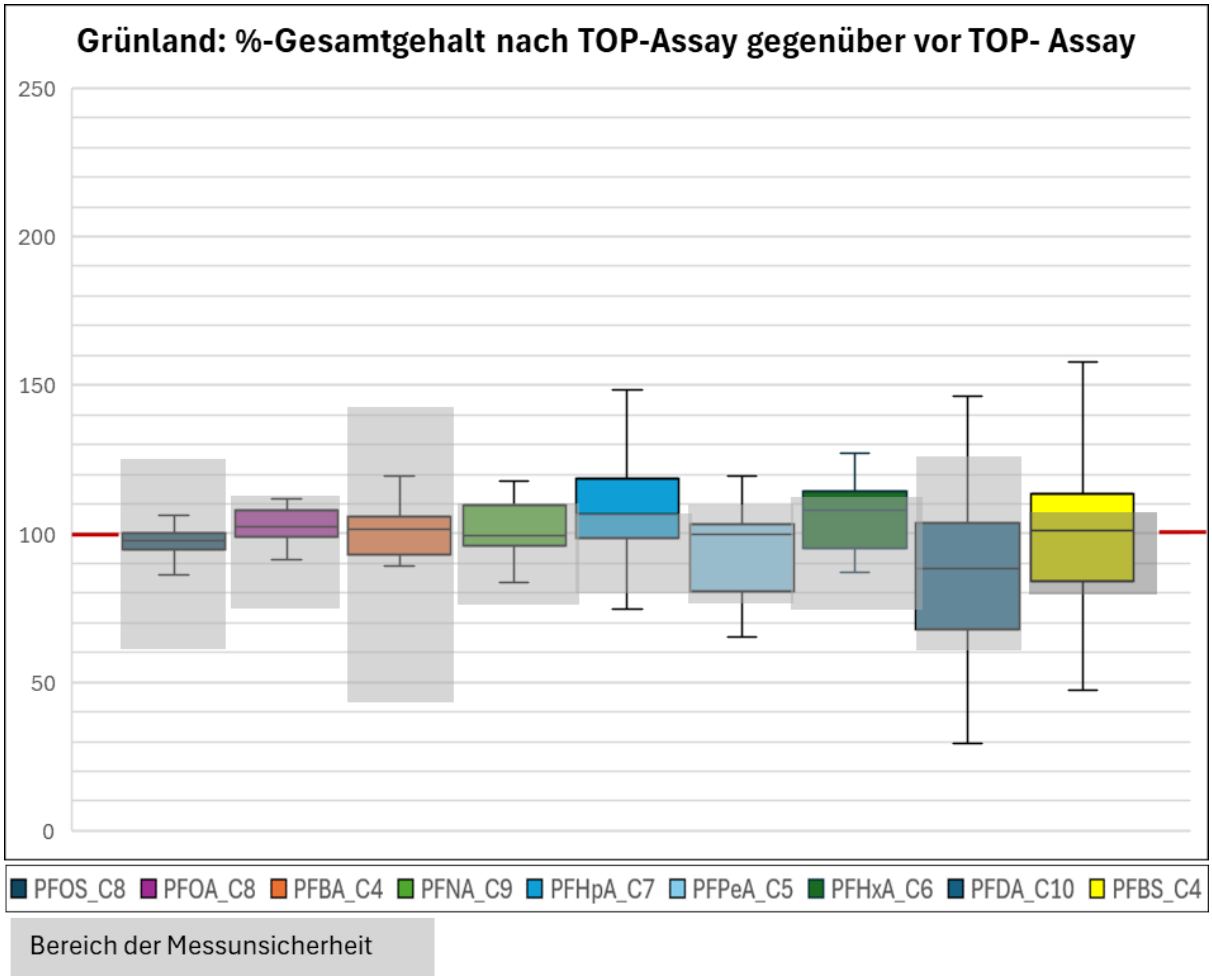
Die Ergebnisse nach dem TOP-Assay erstrecken sich im Vergleich zu den Ausgangsgehalten über eine Spanne, die sowohl Werte oberhalb als auch unterhalb von 100 Prozent umfasst (siehe Abbildungen 31 und 32). Die Messwerte liegen überwiegend innerhalb der erweiterten Messunsicherheit, wie sie in den Abbildungen markiert und in Tabelle 6 definiert ist; davon ausgenommen sind PFNA, PFHpA und PFPeA in den Ackerproben sowie PFHpA in den Grünlandproben. Die Messergebnisse von PFNA liegen nach dem TOP-Assay häufiger niedriger als vor dem TOP-Assay, während die Gehalte von PFHpA und PFPeA nach dem Top-Assay eher ansteigen. Die Interpretation dieser Ergebnisse ist aufgrund der geringen Probenzahl schwierig. Möglicherweise handelt es sich zumindest bei PFNA um einen methodischen Fehler, denn PFNA wird durch die Reaktionsbedingungen im TOP-Assay nicht abgebaut.

Abbildung 31 Prozentuale PFAS-Gehalte nach TOP-Assay im Vergleich zum Ausgangswert in Ackerböden und Spannweiten der erweiterten Messunsicherheiten



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abbildung 32 Prozentuale PFAS-Gehalte nach TOP-Assay im Vergleich zum Ausgangswert in Grünlandböden und Spannweiten der erweiterten Messunsicherheiten



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

TFA wurde in dieser Studie nicht in Verbindung mit dem TOP-Assay untersucht. Eine Aussage zur TFA-Bildung nach dem TOP-Assay ist deshalb nicht möglich. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass TFA-Vorläufersubstanzen in Böden aus dem Bereich der Hintergrundbelastung relevant sein können. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Ergebnisse belegen einen gegenüber PFOS deutlich höheren TFA-Gehalt in den Bodenproben (siehe Kapitel 3.2.1, Abbildung 9). Eine Erklärung wäre, dass TFA-bildende Vorläufersubstanzen (z.B. als Bestandteil von Pflanzenschutzmitteln eingetragen) in den untersuchten Böden vorhanden sind. Dies ist insbesondere für die Bewertung von TFA-Gehalten zu beachten.

4 Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS-Gesamtgehalte in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Untersuchungsergebnisse zu flächenhaft typischen Gehalten **(Hintergrundgehalte)** von PFAS in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums wurden zur Ableitung von **Hintergrundwerten** nach LABO (2017) herangezogen. Das Vorgehen bei der Datenauswertung wird in Kapitel 2.5 beschrieben. Demnach wurde aus dem bereinigten Datensatz das 50., 75. und 90. Perzentil errechnet. Für die Ermittlung von Hintergrundwerte ist eine Mindestprobenzahl von n=20 erforderlich. Bei kleineren Datensätzen (15-19 Messwerten) kann zur Orientierung über die Höhe der Belastung der Median (50. Perzentil) angegeben werden.

Als Kriterien für die Ableitung der Hintergrundwerte wurden neben der Nutzungsart eine regionale Differenzierung sowie die Differenzierung nach Humusgehalten bzw. Humusklassen ermittelt (siehe Kapitel 3.1.2). Die räumliche Differenzierung ermöglicht eine genauere Berücksichtigung regionalspezifische Verhältnisse (u.a. Ausmaß der früheren und aktuellen Immissionsverhältnisse). Ergänzend können die ermittelten regions- und humusübergreifenden Hintergrundwerte bei bundesweiten Fragestellungen, etwa bei der Plausibilitätsprüfung rechnerisch abgeleiteter Prüfwerte (z.B. für den Wirkungspfad Boden-Mensch) herangezogen werden.

Für eine Vielzahl der untersuchten PFAS konnten auf Grund niedriger Bestimmungsgrenzen quantitative Hintergrundwerte abgeleitet werden. Die langkettigen Perfluorcarbonsäuren PFHxDA (C16), PFODA (C18), die Perfluorsulfonsäuren PFHpS (C7) und PFDS (C10) sowie Vorläuferverbindungen und Ersatzstoffe waren größtenteils „nicht nachweisbar“. Für ADONA können nur regionale Hintergrundwerte angegeben werden, da diese Substanz bis auf wenige Ausnahmen nur in der Region Mittel-/ Süddeutschland detektiert oder quantifiziert wurde.

Die folgenden Tabellen 11 und 12 zeigen exemplarisch die im Rahmen dieser Studie **berechneten, humusklassenübergreifenden und nach Regionen differenzierten Hintergrundwerte** für die Summe der **EFSA 4** und die Summe **PFAS19** sowie für die drei Einzelstoffe **PFBA, PFOA, und PFOS;** letztere stellen die für das Vorkommen von PFAS im ländlichen Raum Deutschlands mengenmäßig maßgeblichen Verbindungen dar.

Tabelle 11 Regionale und bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summen EFSA4-PFAS und PFAS19 in Acker- und Grünland- Oberböden des ländlichen Raums - humusklassenübergreifend

Region	HK	*n*	Σ-EFSA4-PFAS			Σ-PFAS19		
			50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
Acker - Oberboden								
NO-Deutschland	h1-5	*116*	0,17	0,21	0,26	0,22	0,27	0,33
NW-Deutschland	h1-5	*85*	0,38	0,50	0,66	0,44	0,56	0,74
Mittel-/ Süddeutschland	h1-5	*178*	0,39	0,52	0,70	0,48	0,63	0,80
bundesweit	h1-5	*379*	0,32	0,46	0,64	0,39	0,56	0,76
Grünland - Oberboden								
NO-Deutschland	h2-5	*33*	0,20	0,32	0,40	0,26	0,43	0,53
NW-Deutschland	h2-5	*38*	0,51	0,89	1,12	0,61	0,93	1,24
Mittel-/ Süddeutschland	h2-5	*106*	0,71	1,04	1,27	0,92	1,39	1,58
bundesweit	h2-5	*177*	0,57	0,95	1,19	0,75	1,16	1,53

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Tabelle 12 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA und PFOA sowie der Perfluorsulfonsäure PFOS in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raums – humusklassenübergreifend

Region	HK	*n*	PFBA (C4)			PFOA (C8)			PFOS (C8)		
			50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
Acker - Oberboden											
NO-Deutschland	h1-5	*116*	0,07	0,10	0,14	0,06	0,09	0,12	0,08	0,09	0,12
NW-Deutschland	h1-5	*85*	0,08	0,11	0,14	0,13	0,20	0,28	0,20	0,26	0,38
Mittel-/ Süddeutschland	h1-5	*178*	0,10	0,12	0,15	0,14	0,20	0,30	0,19	0,28	0,38
bundesweit	h1-5	*379*	0,09	0,12	0,16	0,11	0,17	0,27	0,15	0,24	0,37
Grünland - Oberboden											
NO-Deutschland	h2-5	*33*	0,08	0,17	0,23	0,04	0,12	0,17	0,10	0,14	0,19
NW-Deutschland	h2-5	*38*	0,15	0,23	0,31	0,17	0,37	0,52	0,30	0,39	0,52
Mittel-/ Süddeutschland	h2-5	*106*	0,22	0,31	0,43	0,23	0,33	0,40	0,34	0,51	0,72
bundesweit	h2-5	*177*	0,18	0,26	0,37	0,20	0,30	0,41	0,29	0,43	0,65

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Anhand der Werte des 90. Perzentils zeigt sich ein klares, übergreifendes Muster: Die Werte auf Grünland-Oberböden liegen in allen Regionen sowohl für die beiden Summenparameter als auch für die ausgewählten Einzelstoffe über denen für Ackerböden. Unabhängig vom Nutzungstyp ist zudem ein regionales Gefälle erkennbar. Die geringsten Perzentilwerte treten durchgehend in Nordost-Deutschland auf, während für Nordwest-Deutschland sowie Mittel-/Süddeutschland z.T. deutlich höhere Werte abgeleitet wurden. Der Vergleich der Summenparameter verdeutlicht dabei, dass das Niveau der PFAS19-Summe maßgeblich - mit der Ausnahme von PFHxS - durch die EFSA4-Verbindungen geprägt ist. Wie in Abbildung 24 dargestellt, beträgt der prozentuale Anteil von PFHxS an der Summe EFSA4 ca. 1%.

Bei Acker-Oberböden bewegen sich die Perzentilwerte gegenüber Grünlandböden in einem engeren Bereich und weisen für die Summe EFSA 4 in Nordost-Deutschland ihren niedrigsten Wert auf. Höhere Werte für die Summe EFSA 4 wurden für Mittel- und Süddeutschland sowie Nordwest-Deutschland berechnet. Bei den betrachteten Einzelverbindungen zeigen sich hingegen regionale Unterschiede: Für PFOS wird der Höchstwert sowohl in Nordwest-Deutschland als auch in Mittel-/Süddeutschland erreicht. Demgegenüber liegt das Maximum für PFOA in Nordwest-Deutschland, während für PFBA der höchste Perzentilwert in Mittel- /Süddeutschland ermittelt wurde.

Bei Grünland-Oberböden fallen die regionalen Unterschiede deutlicher aus. Während für Nordost-Deutschland durchgehend die geringsten Werte berechnet wurden, werden in Nordwest-Deutschland und Mittel-/Süddeutschland höhere Perzentilwerte erreicht. Für die Summe PFAS 19 wird in Mittel-/Süddeutschland der höchste Wert verzeichnet. Dieses Muster

wiederholt sich bei den Einzelverbindungen: Mit Ausnahme von PFOA, für das in Nordwest-Deutschland sowie Mittel-/Süddeutschland der gleiche Wert ermittelt wurde, liegen die Höchstwerte für PFOS und PFBA der Grünlandflächen durchgehend in Mittel-/Süddeutschland.

Die Hintergrundwerte für PFAS-Gesamtgehalte (Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren, ADONA sowie für die Summe der EFSA4-PFAS und die Summe PFAS19) können im Einzelnen Anhang A entnommen werden.

Hintergrundwerte für die Vorläuferverbindungen und den Ersatzstoff HFPO-DA(GenX) wurden nicht in den Tabellenanhang aufgenommen. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen (siehe Tabelle 13):

Tabelle 13 Hintergrundwerte für Vorläuferverbindungen und HFPA-DA(GenX)

Substanz	Acker	Grünland
N-MeFOSA	alle Perzentilwerte < Nachweisgrenze	alle Perzentilwerte < Nachweisgrenze
N-EtFOSA		
N-MeFOSAA		
6-2-FTS		
8-2-FTS		
9Cl-PF3ONS		
8:2 FTUCA		
8:2 diPAP		
HFPO-DA (GenX)		
PFOSA	Region Mittel-/Süddeutschland - Humusklasse h4: < Bestimmungsgrenze (< 0,02 µg/kg TS)	alle Perzentilwerte < Nachweisgrenze
	alle sonstigen Perzentilwerte < Nachweisgrenze	
N-EtFOSAA	bundesweit und Region Mittel-/Süddeutschland – h4 < Bestimmungsgrenze (< 0,016 µg/kg TS)	alle Perzentilwerte < Nachweisgrenze
	alle sonstigen Perzentilwerte < Nachweisgrenze	

5 Zusammenfassung/Summary

5.1 Zusammenfassung

Hintergrundwerte von Schadstoffen in land- und forstwirtschaftlichen Böden sind neben der Beschreibung des stofflichen Bodenzustands eine wesentliche Grundlage für die Ableitung von Bodenwerten nach der BBodSchV, die eine Plausibilitätsprüfung anhand solcher Werte vorsieht. Darüber hinaus sind sie wichtig für die Risikobewertung sowie für die vorsorgliche Begrenzung weiterer Stoffeinträge. Für viele anorganische und einige organische Altstoffe (z. B. PAK, PCB, Dioxine) existieren bereits Hintergrundwerte. Für neuere organische Schadstoffe — insbesondere PFAS — fehlen sie weitgehend. Zur Schließung dieser Datenlücke wurden im Rahmen der Ressortforschungspläne 2020 und 2021 zwei Projekte zur Untersuchung von Acker- und Grünlandböden im ländlichen Raum durchgeführt:

- „Hintergrundwerte für PFAS und (Mikro)Kunststoffe - bundesweit repräsentative Beprobung von landwirtschaftlich genutzten Böden“ (FKZ 3720 72 288 0) und
- „Bundesweite Hintergrundwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS)und weitere Schadstoffe in Böden“ (FKZ 3721712010).

Im Rahmen dieser bundesweiten Forschungsprojekte wurden Bodenproben an 605 landwirtschaftlich genutzten Standorten entnommen und hinsichtlich des Vorkommens verschiedener organischer Schadstoffe analysiert. In der vorliegenden Veröffentlichung sind ausschließlich die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen für PFAS dargestellt. Grundlage hierfür sind die Analysendaten von 581 Standorten im ländlichen Raum nach dem Ausschluss von Proben aus Verdichtungsräumen und Überschwemmungsgebieten. Die methodischen Vorgehensweisen bei Probenahme und Analytik werden in den Kapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 beschrieben.

PFAS sind ausschließlich anthropogenen Ursprungs. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen eine flächenhafte PFAS-Belastung der Böden. Die zunehmende, bundesweite Belastung der Umwelt durch Einträge aus der Schadstoffgruppe der PFAS spiegelt sich in den Ergebnissen dieser Untersuchungen zweifelsfrei wider: In allen untersuchten Bodenproben konnten PFAS nachgewiesen werden.

Ermittlung von Differenzierungskriterien für PFAS-Gehalte in Böden

Die statistische Datenauswertung basiert auf den Untersuchungsergebnissen von 382 Acker- und 199 Grünland-Standorten im ländlichen Raum. Analyseergebnisse unterhalb der substanzspezifischen Bestimmungsgrenze wurden durch die halbe Bestimmungsgrenze ersetzt und Ergebnisse unterhalb der Nachweisgrenze auf „null“ gesetzt. Mittels statistischer Cluster- und Korrelationsanalysen wurde anhand der PFAS-Gesamtgehalte untersucht, ob sie eine räumliche Aufteilung vorzunehmen ist und welche Bodenkenngrößen oder sonstigen Standortparameter die Analyseergebnisse beeinflussen. Da die unlogarithmierten Daten zu stark von einer Normalverteilung abwichen, wurden die statistischen Analysen durchgehend mit logarithmisch-transformierten Daten durchgeführt.

Die Untersuchung der räumlichen Verteilung erfolgte anhand der sieben naturräumlichen Großlandschaften Deutschlands (BfN, 2022). Mittels GIS-Analysen, Tukey-Tests, Whitney-Mann-Tests und einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurde die Abhängigkeit der Messdaten von

der geografischen Lage der Standorte präzise analysiert und statistisch geprüft, ob eine Zusammenfassung dieser Großlandschaften zu größeren Regionen valide ist.

Zudem wurde mittels eines Kendall-Tau-Tests systematisch geprüft, ob Korrelationen mit Standortparametern vorliegen. Die Untersuchung umfasste die Faktoren Humusgehalt, mittlere Niederschläge, Bodenart, pH-Wert, Trockenrohdichte sowie Trockensubstanz. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung wurden anschließend genutzt, um mithilfe von multiplen linearen Modellen neben der räumlichen Clusterung weitere erklärende Variablen für die Verteilung der PFAS-Gehalte in den Böden zu bestimmen.

Die PFAS-Gehalte in Oberböden sind getrennt nach Nutzungsarten zu betrachten, da die Art der Bewirtschaftung einen erheblichen Einfluss auf die Stoffverteilung in Böden und die Höhe von Stoffeinträgen hat. So führt regelmäßiges Pflügen (ca. bis 30 cm) auf Ackerflächen zu einer Vermischung und damit Verdünnung von Schadstoffen. Demgegenüber reichern sich Stoffeinträge in Grünlandböden in deren obersten Zentimetern (ca. 10 cm Ah-Horizont) an.

Die statistische Auswertung zeigt eine räumliche Differenzierung der PFAS-Gesamtgehalte in Deutschland auf. Hierbei erweist sich eine Einteilung in die drei Regionen Nordostdeutsches Tiefland, Nordwestdeutsches Tiefland und Mittel-/Süddeutschland als statistisch valide.

Als weitere Einflussfaktoren auf die PFAS-Gehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden wurden die Bodenkenngrößen Trockenrohdichte und Humusgehalt identifiziert. Da die Trockenrohdichte des Oberbodens – insbesondere auf Ackerflächen – jedoch stark vom Zeitpunkt und der Durchführung der Probenahme abhängt, erscheinen darauf basierende Hintergrundwerte für die Praxis ungeeignet; für die Auswertungen wurde daher nur der Humusgehalt herangezogen. Gleichwohl besitzt die Trockenrohdichte eine zentrale Bedeutung bei Fragestellungen zu volumenbezogenen Stoffgehalten, weil sie die Berechnung realer Stoffvorräte in Böden sowie die direkte Vergleichbarkeit von Böden unterschiedlicher Dichte (wie etwa Moorböden versus Mineralböden) und Nutzungsarten ermöglicht.

Zur Prüfung der Stärke der Korrelation von PFAS- und Humusgehalten wurden für die drei identifizierten Regionen Signifikanztest durchgeführt. Hier ergab sich ein gemischtes Bild: Während sich für die Nutzungsart Acker in Nordost-Deutschland ein deutlicher Zusammenhang von Humusgehalt und PFAS-Gesamtgehalt ergab, können diese Zusammenhänge in den beiden anderen Regionen mit dem gewählten Verfahren nicht bestätigt werden. Auch für Grünland ist der Zusammenhang von Humusgehalt und PFAS-Gesamtgehalt deutlich weniger signifikant. Durch eine nach Humusklassen differenzierte Darstellung der Verteilung der Messergebnisse in Box-Plots wird demgegenüber ersichtlich, dass mit steigendem Humusgehalt die PFAS-Gesamtgehalte in der Regel ebenfalls zunehmen. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, die Daten sowohl humusklassenübergreifend als auch nach Humusklassen differenziert auszuwerten.

Zusammenfassend kann dargestellt werden, dass die Gehalte von PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, PFOS in der Regel mit zunehmendem Humusgehalt ansteigen. Für TFA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFHpS PFDS, PFHxS und ADONA konnte keine Abhängigkeit vom Humusgehalt identifiziert werden. da diese Stoffe nur an einer begrenzten Anzahl an Bodenproben quantifizierbar waren.

Vorkommen von PFAS in Böden

Für die untersuchten PFAS mit Kettenlängen von 4-18 perfluorierten Kohlenstoffatomen (C4 bis C18) zeigt sich ein flächenhaft wiederkehrendes Belastungsmuster. In Bezug auf die kurz und langkettigen **PFAS (C4-C18)** wird die Hauptbelastung durch die drei Verbindungen PFBA, PFOA

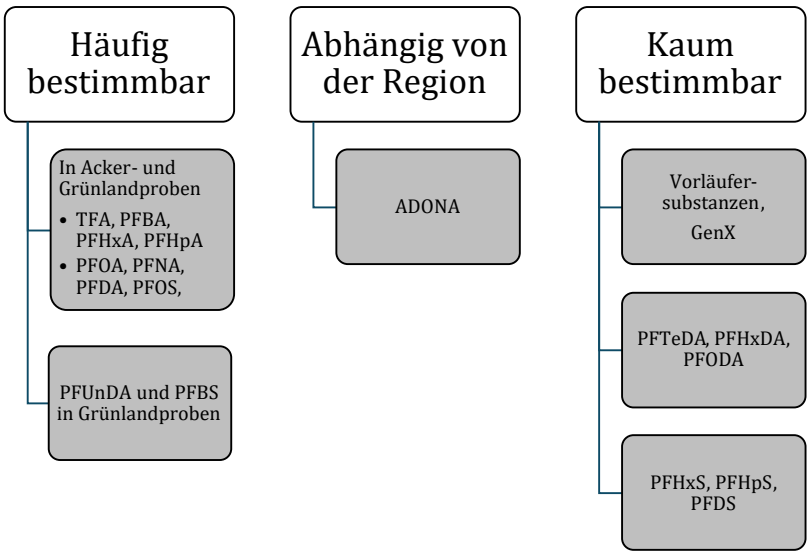
und PFOS bestimmt. Mit geringeren Gehalten folgen PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA. Die Gesamtgehalte der langkettigen Vertreter der Perfluorcarbonsäuren PFDA und PFUnDA liegen i.d.R. unterhalb der zuvor genannten PFAS. Die Anhänge B und C verdeutlichen die räumliche Verteilung der PFAS-Belastung. Wie in Abbildung 33 dargestellt waren einige PFAS (nahezu) in allen Bodenproben bestimmbar:

- die kurzkettigen Perfluorcarbonsäuren (bis C7) PFBA, PFHxA, PFHpA und
- die langkettigen Perfluorcarbonsäuren (ab C8) PFOA, PFNA, PFDA und die langkettige Perfluorsulfonsäure PFOS (C8).

In Grünlandböden war zusätzlich PFUnDA (C11) in fast jeder Probe nachweisbar. Andere PFAS wurden deutlich weniger häufig oder gar nicht in den Bodenproben detektiert oder quantifiziert.

Von den beiden untersuchten PFOA-Ersatzstoffen wurde **HFPO-DA (GenX)** mit der hier verwendeten Methode in keiner der Proben nachgewiesen. **ADONA** hingegen konnte in 33 Prozent der Grünlandproben nachgewiesen und in 15 Prozent quantitativ bestimmt werden; bei Acker liegen die jeweiligen Anteile niedriger.

Abbildung 33: Zusammenfassende Darstellung der Häufigkeit der PFAS-Nachweise in den untersuchten Bodenproben



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

In den Grünlandproben sind PFAS häufiger nachweisbar oder quantitativ bestimmbar. So war z.B. bei den Perfluorsulfonsäuren das kurzkettige PFBS deutlich häufiger bestimmbar (67 % der Mess-Ergebnisse liegen oberhalb der Bestimmungsgrenze) als in den untersuchten Ackerproben (12% oberhalb der Bestimmungsgrenze). Die im Vergleich zu Ackerflächen häufigeren PFAS-Nachweise im Grünland können u.a. auf die Art der Bewirtschaftung zurückgeführt werden: Während eingetragene PFAS im Grünland überwiegend im Oberboden akkumulieren (10 cm), führt die Bodenbearbeitung auf Ackerflächen zu einer Durchmischung des Bodens bis in eine Bodentiefe von 30 cm zu einer Verdünnung der Einträge im beprobten Horizont.

Hervorzuheben sind die Nachweise von **Trifluoressigsäure (TFA)**. TFA wurde als Vertreter der ultrakurzkettigen PFAS an 93 Standorten des ländlichen Raums untersucht. Mit der Ausnahme von zwei Ackerproben konnte TFA in allen Bodenproben oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,16 µg/kg TS quantifiziert werden. Für TFA konnte auf Grund der geringen Probenzahlen in den Regionen keine regionale Differenzierung und die Abhängigkeit der Messergebnisse von

Humusgehalten nachgewiesen werden. Aufgrund der physikochemischen Eigenschaften weist TFA eine sehr hohe Mobilität auf, was die Auswaschung in das Grundwasser sowie die Aufnahme in Nutzpflanzen begünstigt. Anders als bei den C4-C18-PFAS sind die TFA-Gehalte im Acker im Vergleich zum Grünland höher. Dies kann damit erklärt werden, dass TFA aus anderen Eintragsquellen stammt. Die Hauptquellen für TFA in der Umwelt in Deutschland sind neben Kälte- und Treibmittel Pflanzenschutzmittel (UBA 2023). Die analysierten TFA-Gehalte in den hier untersuchten Böden liegen im Vergleich zu PFOS ca. 9-fach höher in Acker- und ca. 5-fach höher in Grünlandböden. Diese Nachweise in Verbindung mit der hohen Mobilität deuten auf eine kontinuierliche Nachlieferung aus Abbauprozessen und atmosphärischen Einträgen hin. Es sei aber darauf hingewiesen, dass in dieser Studie für die TFA-Analytik Standorte mit vergleichsweise höheren C4-C18-PFAS-Gehalten ausgewählt wurden. Daher sind gering belastete Ackerflächen in der Stichprobe möglicherweise unterrepräsentiert.

Die mit der Targetanalytik untersuchten 10 **Vorläuferverbindungen** (PFOSA, N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA, 6-2-FTS, 8-2-FTS, 9Cl-PF3ONS, 8:2 FTUCA) waren in den Bodenproben häufig nicht nachweisbar. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die hier untersuchten Vorläufersubstanzen (> C4) kaum auf Standorten vorhanden sind, welche nicht im Umfeld von spezifischen Belastungsquellen liegen. Der Nachweis von Vorläuferverbindungen korreliert häufig mit erhöhten Gehalten an Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren (z. B. PFOA, PFNA, PFOS) oder erhöhten PFAS-Summenwerten einzelner Proben. Zudem wurden PFOSA und N-EtFOSAA oft gemeinsam in denselben Bodenproben detektiert. Diese Ergebnisse werden durch die zusätzlich durchgeführten **TOP-Assay**-Untersuchungen von 50 Bodenproben gestützt. Beim TOP-Assay werden PFAS-Vorläuferverbindungen durch Oxidation in mit Standardanalytik messbare PFAS umgewandelt, um das potenzielle Ausmaß einer PFAS-Belastung zu erfassen. Bei solchen Proben, in denen bereits mit der Targetanalyse Vorläufersubstanzen nachgewiesen wurden, fanden sich auch Nachweise weiterer Vorläufer nach dem TOP-Assay. Dies weist darauf hin, dass an diesen Standorten spezifische Emissionsquellen vorliegen könnten, die zu prüfen wären. In den meisten der 50 analysierten Proben konnten jedoch keine Hinweise auf signifikante Gehalte an Vorläuferverbindungen gefunden werden. Das heißt, dass Vorläuferverbindungen in Gebieten mit nicht spezifischer PFAS-Belastung kaum nachweisbar sind und daher für die Bewertung der PFAS-Gehalte in den Böden vernachlässigbar sind. Allerdings wurde in dieser Studie TFA nicht in diesem Zusammenhang analysiert. Es ist zu erwarten, dass in den Böden Stoffe vorhanden sind, die mittels TOP-Assay zu TFA abgebaut werden können, z.B. Pflanzenschutzmittel. Dies ist bei der Bewertung von TFA-Gehalten zusätzlich zu berücksichtigen.

Generell sind die PFAS-Gehalte im Nordostdeutschen Tiefland am niedrigsten und nehmen über das Nordwestdeutschen Tiefland zur Region Mittel-/Süddeutschland zu. Die PFAS-Karten in Anhang B verdeutlichen die räumlichen Verteilungen der regelmäßig quantifizierten Substanzen. In Anhang C sind die Raummuster von Substanzen dargestellt, welche in der Regel nicht quantifiziert oder detektiert werden konnten.

Das in dieser Studie dargestellte Belastungsmuster der C4- bis C18-PFAS stimmt über alle Bodenproben hinweg mit den von Nordrhein-Westfalen (LANUV, 2023) und Hessen (Lügger et al., 2025) erhobenen Daten zu PFAS-Gesamtgehalten in Acker- und Grünland-Oberböden im Wesentlichen überein.

Das flächendeckende Vorkommen von PFAS in den Oberböden des ländlichen Raums ist ein Indiz dafür, dass die atmosphärische Deposition – resultierend aus dem regionalen und

weiträumigen Transport industrieller Luftemissionen – neben Punktquellen (z.B. Einsatz von fluorhaltigen Löschschäume, Klärschlamm- oder Kompostaufbringung, Beregnungswasser) als wichtiger Eintragspfad angesehen werden kann. Dies wurde in der Wissenschaft u.a. anderem bereits von Kotthoff et al. (2020) und Cousins et al., (2022) diskutiert.

Das bundesweit typische Mischungsverhältnis der **EFSA 4** (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) ist geprägt von PFOS (ca.51 %,), PFOA (36%), PFNA (13 %) und geringfügigen PFHxS-Gehalten. Im Alpenvorland findet man hingegen eine abweichende spezifische Zusammensetzung vor: Hier stellt PFOA mit einem Median von 48 % häufig den größten Anteil dar, während PFOS (37 %) einen deutlich geringeren Anteil an der Gesamtsumme aufweist. Gleichzeitig begrenzt sich der Nachweis und die Bestimmung von ADONA bis auf seltene Ausnahmen auf den Süden Deutschlands und hier insbesondere auf das Alpenvorland und direkt angrenzende Gebiete. Es ist nicht das Ziel dieses Berichtes die einzelnen PFAS-Funde zu interpretieren. Dennoch ist es naheliegend, dass dieses spezifische Belastungsmuster von PFOA und ADONA auf die Emissionen bei der Herstellung von Fluorpolymeren zurückzuführen ist.[3]

Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in Böden

Für die Ableitung von Hintergrundwerten wurde der erhobene Datensatz nach den Vorgaben der LABO (2017) ausgewertet. Vor der Ermittlung von statistischen Kenngrößen (50., 75. und 90. Perzentil) erfolgte eine Unterteilung des Datensatzes entsprechend der genannten Differenzierungskriterien und eine Ausreißer- und Extremwertbereinigung anhand von logarithmierten Daten. Für die Ermittlung von Hintergrundwerten ist eine Mindestprobenzahl von n=20 für die jeweiligen Stichproben erforderlich. Bei kleineren Datensätzen (15-19 Messwerten) kann zur Orientierung der Median (50. Perzentil) herangezogen werden.

Die Berechnung von Perzentilwerten erfolgte einerseits für Gesamtdeutschland (bundesweit), andererseits für die drei Regionen Nordostdeutsches Tiefland, Nordwestdeutsches Tiefland und Mittel- /Süddeutschland. Weiterhin wurden die Perzentile für die Humusklassen h1 bis h5 und humusklassenübergreifend berechnet. Lagen mehr als 20 Probenpunkte vor, wurden alle Perzentilwerte angegeben. Lagen 15 bis 19 Probenpunkte vor, wurde lediglich das 50. Perzentil berechnet. Bei weniger als 15 Probenpunkten wurde keine Perzentilberechnung durchgeführt.

Als Kriterien für die Ableitung der Hintergrundwerte wurden neben der Nutzungsart eine regionale Differenzierung sowie die Differenzierung nach Humusgehalt bzw. Humusklassen ermittelt. Die räumliche Differenzierung ermöglicht eine genauere Berücksichtigung regionalspezifische Verhältnisse (u.a. Ausmaß der früheren und aktuellen Immissionsverhältnisse).

Mit dieser Veröffentlichung werden bundesweite Hintergrundwerte für folgende PFAS vorgelegt: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS und PFDS. Darüber hinaus wurden Hintergrundwerte für die Summe der EFAS4-PFAS und die Summe PFAS 19 abgeleitet. Für ADONA werden nur regionale Hintergrundwerte angegeben, da die ADONA-Belastung bis auf einzelne Werte nur in Mittel-/ Süddeutschland detektiert oder quantifiziert wurden.

Die Hintergrundwerte sind substanzspezifisch detailliert im Anhang A der Veröffentlichung aufgeführt. Nachstehend werden die Hintergrundwerte für PFAS-Summenwerte und der am häufigsten nachgewiesenen PFAS-Einzelverbindungen dargestellt:

[3] PFOA wurde zur Herstellung von Fluorpolymeren verwendet und ab 2008 durch ADONA ersetzt. Herstellung und Verwendung von Fluorpolymeren führen zu Einträgen der Stoffe in die Umwelt (Gordon, 2011; Dalmijn et al., 2023; LfU, 2026).

Die Hintergrundwerte für Summe der **EFSA4** (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) liegt beim 90. Perzentil in einem Wertebereich von 0,26 µg/kg TS (Acker) und 0,4 µg/kg TS (Grünland) im Nordostdeutschen Tiefland bis 0,7 µg/kg TS (Acker) und 1,27 µg/kg TS (Grünland) in Mittel-/Süddeutschland.

Die Hintergrundwerte für Summe **PFAS19** sind gegenüber der Summe EFSA4 etwas höher: die 90er Perzentilwerte liegen in einem Wertebereich von 0,33 µg/kg TS (Acker) und 0,53 µg/kg TS (Grünland) in im Nordostdeutschen Tiefland bis 0,8 µg/kg TS (Acker) und 1,58 µg/kg TS (Grünland) in Mittel-/Süddeutschland. Dies spiegelt wider, dass die Haupt-PFAS Belastung durch die EFSA4 PFAS zustande kommt.

Die höchsten Hintergrundwerte weist bei den untersuchten Einzelverbindungen **PFOS** auf: Die Hintergrundwerte liegen hier beim 90. Perzentil in einem Wertebereich von 0,12 µg/kg TS (Acker) und 0,19 µg/kg TS (Grünland) im Nordostdeutschen Tiefland bis 0,38 µg/kg TS (Acker) im Nordwestdeutschen Tiefland / Mittel-& Süddeutschland und 0,72 µg/kg TS (Grünland) in Mittel-/Süddeutschland.

Die Hintergrundwerte für **PFOA** liegen beim 90. Perzentil in einem Wertebereich von 0,12 µg/kg TS (Acker) und 0,17µg/kg TS (Grünland) im Nordostdeutschen Tiefland bis 0,3 µg/kg TS (Acker) in Mittel-/Süddeutschland und 0,52 µg/kg TS (Grünland) im Nordwestdeutschen Tiefland.

Die Hintergrundwerte für **PFBA** liegen beim 90. Perzentil in einem Wertebereich von 0,14 µg/kg TS (Acker) und 0,23µg/kg TS (Grünland) im Nordostdeutschen Tiefland bis 0,15 µg/kg TS (Acker) und 0,43 µg/kg TS (Grünland) in Mittel-/Süddeutschland.

Diese Studie bestätigt und aktualisiert die bisherigen Erkenntnisse zum flächenhaften Vorkommen von PFAS in Böden. Sie stellt die erhobenen PFAS-Gehalte und die daraus abgeleiteten Hintergrundwerte dar. Die Hintergrundwerte können nun die Grundlage für die Ableitung von Vorsorge- Prüf- und Maßnahmenwerten gemäß Bundesbodenschutzverordnung sein. Um weitere Einträge und Anreicherungen in Böden zu vermeiden, ist es notwendig, gesetzlichen Werteregelungen auch in anderen Rechtsbereichen fortzuschreiben.

5.2 Summary

Background values for contaminants in agricultural and forestry soils, along with a description of the soil's physical condition, serve as an essential basis for deriving soil values in accordance with the German Soil Protection Ordinance (BBodSchV), which requires a plausibility check based on such values. Furthermore, they are important for risk assessment and for the precautionary limitation of further contaminant inputs. Background values already exist for many inorganic and some organic legacy contaminants (e.g., PAHs, PCBs, dioxins). However, they are largely lacking for newer organic contaminants—particularly PFAS. To close this data gap, two projects were carried out as part of the 2020 and 2021 departmental research plans to investigate arable and grassland soils in rural areas:

- "Background values for PFAS and (micro)plastics—nationwide representative sampling of agricultural soils" (FKZ 3720 72 288 0) and
- "Nationwide background levels for per- and polyfluorinated chemicals (PFAS) and other contaminants in soils" (FKZ 3721712010).

As part of these nationwide research projects, soil samples were collected from 605 agricultural sites and analyzed for the presence of various organic pollutants. This publication presents only the results of the solid-phase analyses for PFAS. This is based on analytical results from 581 rural sites, after excluding samples from densely populated areas and floodplains. The methodological procedures for sampling and analysis are described in Chapters 2.2, 2.3, and 2.4.

PFAS are exclusively of anthropogenic origin. The findings presented here indicate widespread PFAS contamination of soils. The increasing nationwide environmental contamination caused by inputs from the PFAS group of pollutants is unequivocally reflected in the results of these investigations: PFAS were detected in all soil samples analyzed.

Identification of Differentiation Criteria for PFAS Contents in Soils

The statistical data analysis is based on the results from 382 arable land and 199 grassland sites in rural areas. Analysis results below the substance-specific limit of quantification were replaced by half the limit of quantification, and results below the limit of detection were set to "zero." Using statistical cluster and correlation analyses based on total PFAS contents, the study examined whether a spatial classification should be performed and which soil characteristics or other site parameters influence the analysis results. Since the non-log-transformed data deviated too greatly from a normal distribution, the statistical analyses were performed throughout using log-transformed data.

The spatial distribution was examined based on Germany's seven major natural landscapes (BfN, 2022). Using GIS analyses, Tukey tests, Whitney-Mann tests, and principal component analysis (PCA), the dependence of the measurement data on the geographic location of the sites was precisely analyzed, and a statistical test was conducted to determine whether grouping these major natural landscapes into larger regions is valid.

In addition, a Kendall's tau test was used to systematically examine whether correlations with site parameters existed. The analysis included the following factors: humus content, average precipitation, soil type, pH, dry bulk density, and dry matter content. The findings of this study were then used to determine, with the aid of multiple linear models, additional explanatory variables for the distribution of PFAS contents in the soil, in addition to spatial clustering.

PFAS contents in topsoil must be considered separately by land use type, as the type of land management has a significant influence on the distribution of substances in the soil and the

extent of substance inputs. For example, regular plowing (to a depth of approximately 30 cm) on cropland leads to the mixing and thus dilution of contaminants. In contrast, contaminant inputs in grassland soils accumulate in the uppermost centimeters (approximately 10 cm Ah horizon).

The statistical analysis reveals spatial variation in total PFAS contents across Germany. A division into three regions—the Northeast German Lowlands, the Northwest German Lowlands, and Central/Southern Germany—proves to be statistically valid.

The soil parameters dry bulk density and humus content were identified as additional factors influencing PFAS concentrations in agricultural soils. However, since the dry bulk density of the topsoil—particularly on arable land—depends heavily on the timing and method of sampling, background values based on this parameter appear unsuitable for practical applications; therefore, only humus content was used for the analyses. Nevertheless, dry bulk density is of central importance when addressing volume-related substance contents, as it enables the calculation of actual substance reservoirs in soils as well as the direct comparability of soils of different densities (such as peat soils versus mineral soils) and land-use types.

To examine the strength of the correlation between PFAS and humus content, significance tests were conducted for the three identified regions. The results presented a mixed picture: While a clear correlation between humus content and total PFAS content was found for arable land in northeastern Germany, these correlations could not be confirmed in the other two regions using the selected method. For grassland as well, the relationship between humus content and total PFAS content is significantly less pronounced. However, a box plot analysis of the distribution of measurement results, differentiated by humus class, shows that total PFAS contents generally increase as humus content rises. Against this background, it was decided to evaluate the data both across humus classes and differentiated by humus class.

In summary, it can be stated that the contents of PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, and PFOS generally increase with increasing humus content. For TFA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFHpS, PFDS, PFHxS, and ADONA, no dependence on humus content could be identified, as these compounds were quantifiable in only a limited number of soil samples.

Occurrence of PFAS in Soils

For the PFAS with chain lengths of four to 18 perfluorinated carbon atoms (C4-C18) analyzed, a widespread and repeating contamination pattern is evident. With regard to short- and long-chain **PFAS (C4–C18)**, the main contamination is caused by the three compounds PFBA, PFOA, and PFOS. These are followed by PFPeA, PFHxA, PFHpA, and PFNA, which are present in lower contents. The total contents of the long-chain perfluorocarboxylic acids PFDA and PFUnDA are generally lower than those of the PFAS mentioned above. Appendices B and C illustrate the spatial distribution of PFAS contamination. As shown in Figure 33, some PFAS were detectable in (nearly) all soil samples:

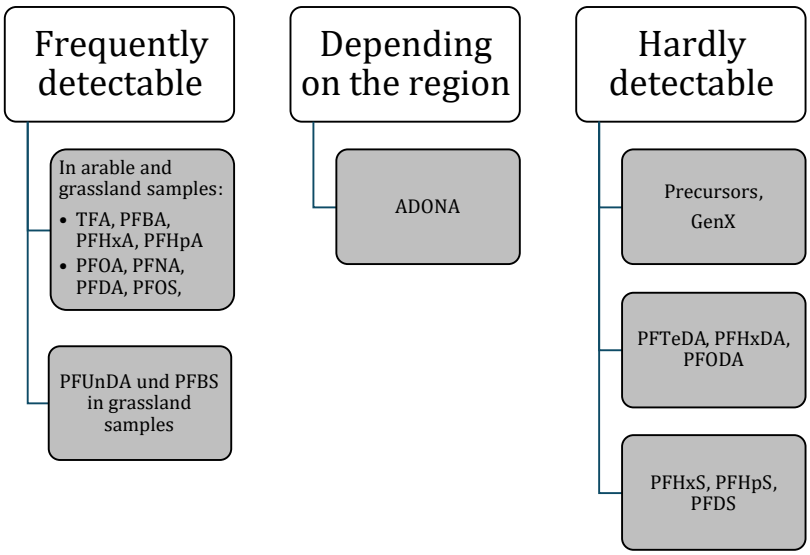
- the short-chain perfluorocarboxylic acids (up to C7)—PFBA, PFHxA, PFHpA—and
- the long-chain perfluorocarboxylic acids (C8 and above)—PFOA, PFNA, PFDA, and the long-chain perfluorosulfonic acid PFOS (C8).

In grassland soils, PFUnDA (C11) was also detectable in nearly every sample. Other PFAS were detected or quantified significantly less frequently or not at all in the soil samples.

Of the two PFOA substitutes examined, **HFPO-DA (GenX)** was not detected in any of the samples using the method employed here. **ADONA**, on the other hand, was detected in 33 percent of the

grassland samples and quantified in 15 percent; the respective proportions are lower for arable land.

Figure 34: Summary of the frequency of PFAS detections in the soil samples analysed



Source: Original image, Umweltbundesamt

PFAS are detected or quantified more frequently in grassland samples. For example, among perfluorosulfonic acids, the short-chain PFBS was detected significantly more often (67% of the measurement results were above the limit of quantification) than in the arable land samples analyzed (12% above the limit of quantification). The more frequent detection of PFAS in grassland compared to cropland can be attributed, among other things, to the type of land management: While PFAS inputs in grassland accumulate predominantly in the topsoil (10 cm), tillage on arable land results in the soil being mixed to a depth of 30 cm, leading to a dilution of the inputs in the sampled horizon.

Of particular note are the detections of **trifluoroacetic acid (TFA)**. TFA, as a representative of ultra-short-chain PFAS, was analyzed at 93 rural sites. With the exception of two arable land samples, TFA was quantified in all soil samples at levels above the limit of quantification of 0.16 µg/kg DM. Due to the small number of samples in each region, it was not possible to identify regional differences in TFA contents or to demonstrate a correlation between measurement results and humus content. Because of its physicochemical properties, TFA exhibits very high mobility, which facilitates its leaching into groundwater and uptake by crops. Unlike C4–C18 PFAS, TFA contents are higher in arable land than in grassland. This can be explained by the fact that TFA originates from different sources of input. In addition to refrigerants and propellants, the main sources of TFA in the environment in Germany are pesticides (UBA 2023). The TFA contents analyzed in the soils examined here are approximately 9 times higher in arable soils and approximately 5 times higher in grassland soils compared to PFOS. These findings, combined with the high mobility of TFA, indicate a continuous supply from degradation processes and atmospheric inputs. It should be noted, however, that sites with comparatively higher C4–C18 PFAS contents were selected for TFA analysis in this study. Consequently, arable lands with low-contamination may be underrepresented in the sample.

The 10 **precursor compounds** analyzed using target analysis (PFOSA, N-MeFOSA, N-EtFOSA, N-MeFOSAA, N-EtFOSAA, 6-2-FTS, 8-2-FTS, 9Cl-PF3ONS, 8:2 FTUCA) were often not detectable in the soil samples. These results illustrate that the precursor substances examined here (> C4) are rarely present at sites that are not located near specific sources of contamination. The detection

of precursor compounds often correlates with elevated levels of perfluorocarbon and perfluorosulfonic acids (e.g., PFOA, PFNA, PFOS) or elevated total PFAS contents in individual samples. In addition, PFOSA and N-EtFOSAA were often detected together in the same soil samples. These results are supported by the additional **TOP assay** analyses conducted on 50 soil samples. In the TOP assay, PFAS precursor compounds are converted by oxidation into PFAS that can be measured using standard analytical methods, in order to assess the potential extent of PFAS contamination. In samples where precursor substances had already been detected by the target analysis, evidence of additional precursors was also found following the TOP assay. This suggests that there may be specific emission sources at these sites that should be investigated. However, in most of the 50 samples analyzed, no evidence of significant levels of precursor compounds was found. This means that precursor compounds are scarcely detectable in areas with non-specific PFAS contamination. However, TFA was not analyzed in this context in this study. It is to be expected that substances are present in the soil that can be degraded to TFA via the TOP assay, such as pesticides. This must also be taken into account when evaluating TFA contents.

In general, PFAS contents are lowest in the Northeast German Lowlands and increase across the Northwest German Lowlands toward Central and Southern Germany. The PFAS maps in Appendix B illustrate the spatial distributions of the substances that were regularly quantified. Appendix C shows the spatial patterns of substances that generally could not be quantified or detected.

The contamination pattern of C4 to C18 PFAS presented in this study is essentially consistent across all soil samples with the data collected by North Rhine-Westphalia (LANUV, 2023) and Hesse (Lügger et al., 2025) on total PFAS contents in topsoil from arable land and grassland.

The widespread presence of PFAS in the topsoil of rural areas indicates that atmospheric deposition—resulting from the regional and long-range transport of industrial air emissions—can be considered an important pathway of entry alongside point sources (e.g., the use of fluorinated firefighting foams, sewage sludge or compost application, and irrigation water) as an important pathway of entry. This has already been discussed in the scientific literature by Kotthoff et al. (2020) and Cousins et al. (2022), among others.

The typical nationwide mixture ratio of **EFSA 4** (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) is characterized by PFOS (approx. 51%), PFOA (36%), PFNA (13%), and trace amounts of PFHxS. In the Alpine foothills, however, a different specific composition is found: Here, PFOA frequently accounts for the largest fraction, with a median of 48%, while PFOS (37%) represents a significantly smaller proportion of the total. At the same time, the detection and quantification of ADONA are limited, with rare exceptions, to southern Germany—and specifically to the Alpine foothills and directly adjacent areas. It is not the purpose of this report to interpret the individual PFAS findings. Nevertheless, it stands to reason that this specific contamination pattern of PFOA and ADONA is attributable to emissions from the production of fluoropolymers.

Nationwide background values for PFAS in soils

To derive background values, the collected dataset was analyzed in accordance with the guidelines set forth by LABO (2017). Before determining statistical parameters (50th, 75th, and 90th percentiles), the dataset was subdivided according to the specified differentiation criteria, and outliers and extreme values were removed using logarithmic data. To determine background values, a minimum sample size of n=20 is required for each sample. For smaller datasets (15–19 measurements), the median (50th percentile) can be used as a guide.

Percentile values were calculated both for Germany as a whole (nationwide) and for the three regions: the Northeast German Lowlands, the Northwest German Lowlands, and

Central/Southern Germany. Furthermore, the percentiles were calculated for humus classes h1 through h5 and across all humus classes. If more than 20 sampling points were available, all percentile values were reported. If 15 to 19 sampling points were available, only the 50th percentile was calculated. If fewer than 15 sampling points were available, no percentile calculation was performed.

In addition to land use type, regional differentiation and differentiation based on humus content or humus classes were identified as criteria for deriving the background values. Spatial differentiation allows for a more precise consideration of region-specific conditions (including the extent of past and current exposure conditions).

This publication presents nationwide background values for the following PFAS: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFODA, PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS, and PFDS. In addition, background values for the sum of EFAS4 PFAS and the sum of PFAS 19 were derived. For ADONA, only regional background values are provided, as ADONA contents—with the exception of a few isolated values—have been detected or quantified only in central and southern Germany.

The background values are listed in detail by substance in Appendix A of the publication. The background values for total PFAS contents and the most frequently detected individual PFAS compounds are presented below:

The background values for the sum of **EFAS4** (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) are at the 90th percentile, ranging from 0.26 µg/kg DM (arable land) and 0.4 µg/kg DM (pasture) in the Northeast German Lowlands to 0.7 µg/kg DM (arable land) and 1.27 µg/kg DM (pasture) in central and southern Germany.

The background values for the total of the sum of **PFAS19** are slightly higher than the totals for the EFSA4: the 90th percentile values range from 0.33 µg/kg DM (arable land) and 0.53 µg/kg DM (pasture) in the Northeast German Lowlands to 0.8 µg/kg DM (arable land) and 1.58 µg/kg DM (pasture) in Central/Southern Germany. This reflects the fact that the primary PFAS contamination stems from the EFSA4 PFAS.

Among the individual compounds examined, **PFOS** exhibits the highest background levels: The background levels here, at the 90th percentile in a range from 0.12 µg/kg DM (arable land) and 0.19 µg/kg DM (pasture) in the Northeast German Lowlands to 0.38 µg/kg DM (arable land) in the Northwest German Lowlands / Central and Southern Germany and 0.72 µg/kg DM (pasture) in Central and Southern Germany.

The background levels for **PFOA** are at the 90th percentile, ranging from 0.12 µg/kg DM (arable land) and 0.17 µg/kg DM (pasture) in the Northeast German Lowlands to 0.3 µg/kg DM (arable land) in Central and Southern Germany and 0.52 µg/kg DM (pasture) in the Northwest German Lowlands.

The background values for **PFBA** at the 90th percentile range from 0.14 µg/kg DM (arable land) and 0.23 µg/kg DM (pasture) in the Northeast German Lowlands to 0.15 µg/kg DM (arable land) and 0.43 µg/kg DM (pasture) in Central/Southern Germany.

This study confirms and updates previous findings on the widespread occurrence of PFAS in soils. It presents the measured PFAS contents and the background values derived from them. These background values can now serve as the basis for deriving precautionary, testing and action values in accordance with the Federal Soil Protection Ordinance. To prevent further inputs and accumulation in soils, it is necessary to extend regulatory value provisions to other fields of law as well.

6 Quellenverzeichnis

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2009): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Nachdruck. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) (Hrsg.), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

BBodSchV, Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).

BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumordnung (2023) Verdichtungsräume [Karte/Datensatz]. Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Bonn. Online verfügbar unter: BBSR - Raumbeobachtung – Verdichtungsräume (01.03.2026)

BfN, Bundesamt für Naturschutz (2021): Flussauen in Deutschland 2021 (Datensatz/WMS). Bonn. Online verfügbar unter: BfN-Viewer (01.03.2026)

BfN, Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2022): Naturräumliche Gliederung Deutschlands (WMS-Dienst). Bonn. Online verfügbar unter: BfN-Viewer (02.03.2026)

BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Karte der Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands 1:1.000.000. Hannover.

Cousins, I.T., Johansson, J.H., Salter, M.E., Sha, B. & Scheringer, M. (2022): Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Environmental Science & Technology, 56(16), 11172–11179.

DALMIJN, J. et al. (2024): Emission inventory of PFASs and other fluorinated organic substances for the fluoropolymer production industry in Europe. In: Environmental Science: Processes & Impacts, Jg. 26, H. 1, S. 108–122. DOI: 10.1039/D3EM00426K. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1039/D3EM00426K (24.06.2026)

Destatis, Statistisches Bundesamt (2019): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung – 2019. Fachserie 3 Reihe 5.1. Wiesbaden.

DIN 19528:2023-07, Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen

DIN 19529:2023-07, Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg

DIN 32645:2008, Chemische Analytik - Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen - Begriffe, Verfahren, Auswertung

DIN 38407-42:2011-03, Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest- Flüssig-Extraktion (F 42)

DIN 38414-14:2011, Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) (S 14)

DIN EN ISO 21675:2019-10, Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Wasser – Verfahren mittels Flüssigkeitschromatographie-Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) (ISO 21675:2019)

DWD Climate Data Center (CDC) (2025): Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1981-2010, Version v1.0.

EFSA CONTAM Panel, Schrenk D, Bignami M, et al. (2020): Scientific Opinion on the risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal, 18(9), 6223. Online verfügbar unter:

Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food - - 2020 - EFSA Journal - Wiley Online Library (01.04.2026)

Europäische Kommission (2021): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: EU-Bodenstrategie für 2030 – Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen. COM (2021) 699 final, Brüssel, 17.11.2021. Online verfügbar unter: EUR-Lex - 52021DC0699 - EN - EUR-Lex (01.03.2026)

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2025): Richtlinie (EU) 2025/2360 vom 12. November 2025 zur Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsrichtlinie). In: Amtsblatt der Europäischen Union, L 2025/2360. Online verfügbar unter: Directive - EU - 2025/2360 - EN - EUR-Lex (01.03.2026).

FBU, Fachbeirat für Bodenuntersuchungen (2024): Empfehlungen des FBU zum methodischen Vorgehen bei der Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten in Böden. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: 20220407_Protokoll_Hintergrund PFAS Boden (01.03.2026)

Frische, T., Gehrenkemper, L., (2026): Ableitung von Bodenwerten für PFAS. UBA-Texte 50/2026, Umweltbundesamt. https://doi.org/10.60810/openumwelt-8137 (13.05.2026)

Gordon, S.C. (2011): Toxicological evaluation of ammonium 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoate, a new emulsifier to replace ammonium perfluorooctanoate in fluoropolymer manufacturing. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 59(1), 64–80. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2010.09.008 (05.06.2026)

Houtz, E. F., & Sedlak, D. L. (2012): Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff. Environmental Science & Technology, 46(17), 9342–9349. Online verfügbar unter: Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff | Environmental Science & Technology (12.04.2026)

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

ISO/IEC 17025:2017-11. Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Genf: International Organization for Standardization, 2017

ISO 17034:2016-11. Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Referenzmaterialherstellern. Genf: International Organization for Standardization, 2016

Koenzen, U., Kurth, A. & Günther-Diringer, D. (2021): Auenzustandsbericht 2021 – Flussauen in Deutschland. Herausgegeben vom Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn. https://doi.org/10.19217/brs211 (01.03.2026)

Kotthoff, M., Fliedner, F., Rüdel, H., Göckener, B., Bücking, M., Biegel-Engler, A., Koschorreck, J. (2020): Per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – Levels and patterns in different matrices. Science of The Total Environment,Volume 740, 140116. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140116 (05.06.2026)

LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. IN: UTERMANN, J., KERTH, M. & STANGE, F. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kennziffer 9006, Erich Schmidt Verlag, Berlin. Online verfügbar unter: LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf (01.03.2026)

LANUV, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [Hrsg.] (2023): PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen. – LANUV-Fachbericht 150, 67 S., Recklinghausen. Online verfügbar unter: LANUV_Fachbericht_150.pdf (01.03.2026

LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2026): PFOA-Problematik im Raum Gendorf. Online-Informationsportal. Online verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/altlasten/pfoa_gendorf/index.htm (24.06.2026).

Lügger, K., Heller, C. (2025): Untersuchungen von Standorten der hessischen Boden-Dauerbeobachtung auf Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS). In: HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg.): Boden und Altlasten – Nachrichten aus Hessen: Ausgabe 2025. Wiesbaden, S. 19-33. Online verfügbar unter: Boden_und_Altlasten_Newsletter_2025.pdf (26.03.2026)

Piechotta, C., Westphalen, T., Hantschke, L., Kluge, S., Klyk-Seitz, U., Kaminski, K., Mauch, T., Scholl, J. (2027): Bundesweite Hintergrundwerte für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) und weitere Schadstoffe in Böden. UBA-Texte- Dessau-Roßlau *(Veröffentlichung in Vorbereitung).*

Scholl J, Meiers E, Mauch T, Lisec J, Sommerfeld T, Weinfurtner K, Haase H, Koch M. (2025): Approaches towards sensitive and reliable determination of trifluoroacetic acid (TFA) from German grass- and farmland soils. Chemosphere. 382, Artikel 144496. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144496 (01.03.2026)

UBA, Umweltbundesamt (2023): Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen. Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf. Texte 102/2023, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen - Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf | Umweltbundesamt (13.04.2026)

Wellbrock, N., Makowski, V., et al. (2022): Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III). Thünen Working Paper 195. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter: Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III)

Wellington Laboratories Inc. (2020). ISO 21675-NSS: Native Stock Solution/Mixture [Zertifiziertes Referenzmaterial]. Online verfügbar unter: ISO21675_12nov2020_WR.pdf

A Anhang: Bundesweite Hintergrundwerte für PFAS in Acker- und Grünland-Oberböden

Tabelle 14 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA, PFPeA und PFHxA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acker-Oberboden			PFBA (C4)			PFPeA (C5)			PFHxA (C6)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	0,05	0,08	0,11	<0,014	0,03	0,06	0,02	0,03	0,04
	h3	*51*	0,09	0,12	0,14	0,02	0,12	0,15	0,04	0,05	0,06
	h4	*7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	0,07	0,10	0,14	0,01	0,06	0,13	0,02	0,04	0,06
NW-Deutschland	h1	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	0,06	–	–	0,02	–	–	0,02	–	–
	h3	*51*	0,08	0,11	0,14	0,02	0,04	0,08	0,03	0,05	0,06
	h4	*15*	0,09	–	–	0,02	–	–	0,03	–	–
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*85*	0,08	0,11	0,14	0,02	0,04	0,09	0,03	0,04	0,06
Mittel-/ Süddeutschland	h1	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	0,08	0,09	0,10	0,03	0,04	0,06	0,04	0,05	0,07
	h3	*119*	0,10	0,12	0,15	0,03	0,05	0,10	0,05	0,07	0,10
	h4	*30*	0,14	0,20	0,26	0,05	0,08	0,12	0,07	0,08	0,09
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*178*	0,10	0,12	0,15	0,03	0,06	0,10	0,05	0,07	0,09
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*95*	0,06	0,08	0,11	0,02	0,04	0,07	0,02	0,04	0,06
	h3	*221*	0,10	0,12	0,15	0,03	0,06	0,12	0,04	0,06	0,09
	h4	*52*	0,12	0,16	0,24	0,04	0,07	0,12	0,06	0,08	0,11
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*379*	0,09	0,12	0,16	0,03	0,06	0,11	0,04	0,06	0,09

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil;

Tabelle 15 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFBA, PFPeA und PFHxA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFBA (C4)			PFPeA (C5)			PFHxA (C6)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	**0,07**	–	–	**0,02**	–	–	**0,01**	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	**0,08**	**0,17**	**0,23**	**0,03**	**0,04**	**0,15**	**0,02**	**0,04**	**0,06**
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	**0,15**	**0,20**	**0,26**	**0,02**	**0,07**	**0,30**	**0,02**	**0,04**	**0,06**
	h5	*6*	–	–		–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	**0,15**	**0,23**	**0,31**	**0,03**	**0,05**	**0,10**	**0,03**	**0,05**	**0,06**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	**0,22**	**0,27**	**0,36**	**0,07**	**0,15**	**0,35**	**0,07**	**0,09**	**0,12**
	h5	*29*	**0,33**	**0,45**	**0,50**	**0,10**	**0,16**	**0,24**	**0,11**	**0,13**	**0,15**
	h2-5	*106*	**0,22**	**0,31**	**0,43**	**0,07**	**0,15**	**0,27**	**0,07**	**0,11**	**0,14**
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	**0,11**	**0,16**	**0,21**	**0,03**	**0,05**	**0,07**	**0,02**	**0,04**	**0,06**
	h4	*94*	**0,20**	**0,26**	**0,35**	**0,06**	**0,13**	**0,31**	**0,06**	**0,08**	**0,10**
	h5	*40*	**0,28**	**0,40**	**0,52**	**0,09**	**0,16**	**0,23**	**0,11**	**0,13**	**0,15**
	h2-5	*177*	**0,18**	**0,26**	**0,37**	**0,05**	**0,12**	**0,25**	**0,06**	**0,09**	**0,12**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil;

Tabelle 16 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFHpA, PFOA und PFNA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acker-Oberboden			PFHpA (C7)			PFOA (C8)			PFNA (C9)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,03	0,03	0,04
	h3	*51*	0,03	0,04	0,05	0,08	0,10	0,12	0,03	0,04	0,05
	h4	*7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	0,02	0,04	0,04	0,06	0,09	0,12	0,03	0,03	0,04
NW-Deutschland	h1	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	0,03	–	–	0,14	–	–	0,03	–	–
	h3	*51*	0,03	0,04	0,05	0,13	0,19	0,27	0,04	0,04	0,05
	h4	*15*	0,05	–	–	0,17	–	–	0,05	–	–
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*85*	0,03	0,05	0,06	0,13	0,20	0,28	0,04	0,04	0,05
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14	0,20	0,04	0,05	0,06
	h3	*119*	0,05	0,06	0,08	0,14	0,19	0,29	0,05	0,06	0,07
	h4	*30*	0,07	0,09	0,10	0,20	0,28	0,36	0,07	0,10	0,11
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*178*	0,05	0,07	0,09	0,14	0,20	0,30	0,05	0,06	0,08
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*95*	0,02	0,04	0,05	0,07	0,12	0,18	0,03	0,04	0,05
	h3	*221*	0,04	0,05	0,07	0,12	0,18	0,26	0,04	0,05	0,06
	h4	*52*	0,06	0,08	0,10	0,17	0,28	0,35	0,07	0,10	0,12
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*379*	0,04	0,05	0,07	0,11	0,17	0,27	0,04	0,05	0,07

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Tabelle 17 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFHpA, PFOA und PFNA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFHpA (C7)			PFOA (C8)			PFNA (C9)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	**0,01**	–	–	**0,04**	–	–	**0,03**	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	**0,02**	**0,05**	**0,07**	**0,04**	**0,12**	**0,17**	**0,04**	**0,06**	**0,08**
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	**0,04**	**0,06**	**0,08**	**0,17**	**0,39**	**0,47**	**0,08**	**0,08**	**0,11**
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	**0,04**	**0,06**	**0,09**	**0,17**	**0,37**	**0,52**	**0,06**	**0,09**	**0,11**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	**0,08**	**0,11**	**0,15**	**0,22**	**0,28**	**0,38**	**0,10**	**0,13**	**0,18**
	h5	*29*	**0,13**	**0,15**	**0,19**	**0,33**	**0,40**	**0,45**	**0,15**	**0,18**	**0,21**
	h2-5	*106*	**0,09**	**0,13**	**0,17**	**0,23**	**0,33**	**0,40**	**0,11**	**0,15**	**0,18**
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	**0,03**	**0,06**	**0,08**	**0,08**	**0,13**	**0,20**	**0,05**	**0,06**	**0,08**
	h4	*94*	**0,08**	**0,10**	**0,14**	**0,21**	**0,29**	**0,40**	**0,09**	**0,12**	**0,17**
	h5	*40*	**0,12**	**0,14**	**0,18**	**0,30**	**0,40**	**0,49**	**0,12**	**0,17**	**0,21**
	h2-5	*177*	**0,07**	**0,11**	**0,15**	**0,20**	**0,30**	**0,41**	**0,09**	**0,12**	**0,18**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Tabelle 18 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFDA, PFUnDA und PFDoDA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acker-Oberboden			PFDA (C10)			PFUnDA(C11)			PFDoDA (C12)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	0,014	0,016	0,019	<0,013	<0,013	0,017	<0,015	<0,015	<0,015
	h3	*51*	0,018	0,025	0,036	<0,013	0,014	0,020	<0,015	<0,015	<0,015
	h4	*7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	0,015	0,019	0,026	<0,013	<0,013	0,018	<0,015	<0,015	<0,015
NW-Deutschland	h1	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	0,014	0,016	0,019	<0,013	–	–	<0,015	–	–
	h3	*51*	0,018	0,025	0,036	0,014	0,017	0,024	<0,015	<0,015	0,025
	h4	*15*	–	–	–	0,018	–	–	<0,015	–	–
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*85*	0,015	0,019	0,026	0,014	0,019	0,023	<0,015	<0,015	0,023
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	0,024	0,029	0,035	0,015	0,018	0,024	<0,015	<0,015	<0,015
	h3	*119*	0,028	0,032	0,038	0,017	0,021	0,024	<0,015	<0,015	0,016
	h4	*30*	0,043	0,060	0,076	0,029	0,036	0,045	<0,015	0,019	0,029
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*178*	0,028	0,033	0,041	0,018	0,023	0,027	<0,015	<0,015	0,019
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*95*	0,017	0,024	0,031	<0,013	0,015	0,019	<0,015	<0,015	<0,015
	h3	*221*	0,025	0,031	0,040	0,016	0,020	0,025	<0,015	<0,015	0,019
	h4	*52*	0,036	0,055	0,074	0,022	0,034	0,042	<0,015	0,019	0,045
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*379*	0,024	0,031	0,043	0,015	0,020	0,026	<0,015	<0,015	0,019

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 19 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFDA, PFUnDA und PFDoDA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFDA (C10)			PFUnDA(C11)			PFDoDA (C12)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	0,016	–	–	0,015	–	–	<0,015	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	0,020	0,024	0,032	0,018	0,022	0,031	<0,015	<0,015	<0,015
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	0,029	0,035	0,042	0,024	0,032	0,038	<0,015	<0,015	0,017
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	0,031	0,041	0,053	0,027	0,032	0,039	<0,015	<0,015	0,020
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	0,050	0,067	0,087	0,035	0,052	0,064	<0,015	0,023	0,030
	h5	*29*	0,065	0,087	0,094	0,048	0,062	0,073	0,019	0,024	0,033
	h2-5	*106*	0,051	0,069	0,089	0,039	0,056	0,068	0,016	0,024	0,032
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	0,030	0,036	0,047	0,025	0,031	0,035	<0,015	<0,015	0,017
	h4	*94*	0,040	0,058	0,076	0,033	0,042	0,061	<0,015	0,019	0,028
	h5	*40*	0,056	0,072	0,093	0,043	0,058	0,069	0,017	0,022	0,031
	h2-5	*177*	0,039	0,058	0,084	0,033	0,045	0,063	<0,015	0,019	0,029

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 20 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFTrDA, PFTeDA und PFHxDA in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acker-Oberboden			PFTrDA (C13)			PFTeDA (C14)			PFHxDA (C16)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	<NWG	<NWG	**<0,02**	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	*51*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	<NWG	<NWG	**<0,02**	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
NW-Deutschland	h1	*–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	<NWG	–	–	<NWG	–	–	–	–	–
	h3	*51*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*15*	**<0,02**	–	–	**<0,015**	–	–	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*85*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	*119*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*30*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	**<0,018**
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*178*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*95*	<NWG	<NWG	**<0,02**	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	*221*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*52*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	**<0,018**
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*379*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 21 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäuren PFTrDA, PFTeDA und PFHxDA in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFTrDA (C13)			PFTeDA (C14)			PFHxDA (C16)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	<NWG	–	–	<NWG	–	–	<NWG	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	<NWG	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	**<0,02**	**<0,02**	**0,025**	**<0,015**	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*29*	**<0,02**	**0,024**	**0,027**	**<0,015**	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h2-5	*106*	**<0,02**	**<0,02**	**0,026**	**<0,015**	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	**<0,02**	**<0,02**	**<0,02**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*94*	**<0,02**	**<0,02**	**0,022**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*40*	**<0,02**	**0,022**	**0,025**	**<0,015**	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG
	h2-5	*177*	**<0,02**	**<0,02**	**0,024**	<NWG	**<0,015**	**<0,015**	<NWG	<NWG	<NWG

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 22 **Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäure PFODA und Perfluorsulfonsäuren PFBS / PFHxS in Acker-Oberböden des ländlichen Raums**

Acken-Oberboden			PFODA (C18)			PFBS (C4)			PFHxS (C6)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	< NWG	< NWG	< NWG
	h3	*51*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**<0,011**	< NWG	< NWG	< NWG
	h4	*7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	< NWG	< NWG	< NWG
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	<NWG	–	–	<NWG	–	–	< NWG	–	–
	h3	*51*	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	< NWG	**<0,018**	**<0,018**
	h4	*15*	<NWG	–	–	**<0,011**	–	–	< NWG	–	–
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*85*	–	–	–	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	< NWG	**<0,018**	**<0,018**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**0,009**	< NWG	< NWG	**<0,018**
	h3	*119*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**0,013**	< NWG	**<0,018**	**<0,018**
	h4	*30*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,013**	**0,019**	**<0,018**	**<0,018**	**0,021**
	h5	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*178*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**0,014**	**< NWG**	**<0,018**	**<0,018**
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*95*	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	< NWG	< NWG	< NWG
	h3	*221*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**0,013**	< NWG	**<0,018**	**<0,018**
	h4	*52*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,009**	**0,016**	< NWG	**<0,018**	**0,022**
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*379*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**<0,011**	**0,012**	< NWG	**<0,018**	**<0,018**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 23 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorcarbonsäure PFODA und Perfluorsulfonsäuren PFBS / PFHxS in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFODA (C18)			PFBS (C4)			PFHxS (C6)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	<NWG	–	–	<NWG	–	–	<NWG	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,014**	**0,017**	<NWG	**<0,018**	**<0,018**
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,013**	**0,017**	**<0,018**	**0,025**	**0,029**
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,013**	**0,024**	**<0,018**	**0,017**	**0,027**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,019**	**0,026**	**0,031**	**<0,018**	**<0,018**	**<0,018**
	h5	*29*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,024**	**0,029**	**0,033**	**<0,018**	**<0,018**	**0,021**
	h2-5	*106*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,020**	**0,027**	**0,032**	**<0,018**	**<0,018**	**<0,018**
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	<NWG	<NWG	<NWG	**<0,011**	**0,013**	**0,016**	**<NWG**	**<NWG**	**<0,018**
	h4	*94*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,015**	**0,023**	**0,030**	**<0,018**	**<0,018**	**0,021**
	h5	*40*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,023**	**0,029**	**0,034**	**<0,018**	**<0,018**	0,021
	h2-5	*177*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,015**	**0,024**	**0,030**	**<0,018**	**<0,018**	**<0,018**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 24 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorsulfonsäuren PFHpS, PFOS und PFDS in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acken-Oberboden			PFHpS (C7)			PFOS (C8)			PFDS (C10)		
Region	HK	n	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	4	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	54	<NWG	<NWG	<NWG	**0,08**	**0,09**	**0,11**	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	51	<NWG	<NWG	<NWG	**0,08**	**0,10**	**0,14**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	7	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	116	<NWG	<NWG	<NWG	**0,08**	**0,09**	**0,12**	<NWG	<NWG	<NWG
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	16	<NWG	–	–	**0,15**	–	–	<NWG	–	–
	h3	51	<NWG	<NWG	<NWG	**0,20**	**0,26**	**0,40**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	15	<NWG	–	–	**0,29**	–	–	<NWG	–	–
	h5	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	85	<NWG	<NWG	<NWG	**0,20**	**0,26**	**0,38**	<NWG	<NWG	<NWG
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	25	<NWG	<NWG	<NWG	**0,15**	**0,19**	**0,21**	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	119	<NWG	<NWG	<NWG	**0,19**	**0,28**	**0,35**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	30	<NWG	**<0,018**	**<0,018**	**0,37**	**0,48**	**1,11**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	178	<NWG	<NWG	<NWG	**0,19**	**0,28**	**0,38**	<NWG	<NWG	<NWG
bundesweit	h1	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	95	<NWG	<NWG	<NWG	**0,09**	**0,15**	**0,20**	<NWG	<NWG	<NWG
	h3	221	<NWG	<NWG	<NWG	**0,16**	**0,24**	**0,35**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	52	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,28**	**0,48**	**1,05**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	6	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	379	<NWG	<NWG	<NWG	**0,15**	**0,24**	**0,37**	<NWG	<NWG	<NWG

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 25 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Perfluorsulfonsäuren PFHpS, PFOS und PFDS in Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden			PFHpS (C7)			PFOS (C8)			PFDS (C10)		
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg / kg TS			in µg / kg TS			in µg / kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*4*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*15*	<NWG			**0,10**	–	–	<NWG	–	–
	h4	*9*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h5	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*33*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,10**	**0,14**	**0,19**	<NWG	<NWG	<NWG
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*10*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*22*	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,32**	**0,39**	**0,54**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2-5	*38*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,30**	**0,39**	**0,52**	<NWG	<NWG	<NWG
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*13*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h4	*63*	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,33**	**0,49**	**0,67**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*29*	<NWG	**<0,018**	**<0,018**	**0,46**	**0,61**	**0,80**	<NWG	<NWG	<NWG
	h2-5	*106*	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,34**	**0,51**	**0,72**	<NWG	<NWG	<NWG
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	*38*	<NWG	<NWG	<NWG	**0,17**	**0,25**	**0,32**	<NWG	<NWG	<NWG
	h4	*94*	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,31**	**0,44**	**0,65**	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*40*	<NWG	**<0,018**	**<0,018**	**0,42**	**0,55**	**0,74**	<NWG	<NWG	<NWG
	h2-5	*177*	<NWG	<NWG	**<0,018**	**0,29**	**0,43**	**0,65**	<NWG	<NWG	<NWG

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

Tabelle 26 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summen EFSA4-PFAS und PFAS19 in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Acker-Oberboden		Σ-EFSA4-PFAS				Σ-PFAS19			
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	*n*	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg/ kg TS				in µg/ kg TS		
NO-Deutschland	h1	*4*	–	–	–	*4*	–	–	–
	h2	*54*	**0,15**	**0,19**	**0,21**	*54*	**0,19**	**0,23**	**0,27**
	h3	*51*	**0,19**	**0,24**	**0,27**	*51*	**0,24**	**0,31**	**0,35**
	h4	*7*	–	–	–	*7*	–	–	–
	h5	–	–	–	–	–	–	–	–
	h1-5	*116*	**0,17**	**0,21**	**0,26**	*116*	**0,22**	**0,27**	**0,33**
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	**0,31**	–	–	*16*	**0,34**	–	–
	h3	*51*	**0,38**	**0,47**	**0,60**	*46*	**0,45**	**0,56**	**0,69**
	h4	*15*	**0,54**	–	–	*15*	–	–	–
	h5	*3*	–	–	–	*3*	–	–	–
	h1-5	*85*	**0,38**	**0,50**	**0,66**	*85*	**0,44**	**0,56**	**0,74**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	*1*	–	–	–	*1*	–	–	–
	h2	*25*	**0,29**	**0,35**	**0,40**	*25*	**0,38**	**0,45**	**0,49**
	h3	*119*	**0,39**	**0,51**	**0,64**	*119*	**0,49**	**0,63**	**0,78**
	h4	*30*	**0,59**	**0,78**	**1,06**	*30*	**0,71**	**1,06**	**1,30**
	h5	*3*	–	–	–	*3*	–	–	–
	h1-5	*178*	**0,39**	**0,52**	**0,70**	*178*	**0,48**	**0,63**	**0,80**
bundesweit	h1	*5*	–	–	–	*5*	–	–	–
	h2	*95*	**0,20**	**0,28**	**0,40**	*95*	**0,26**	**0,38**	**0,48**
	h3	*221*	**0,35**	**0,48**	**0,62**	*221*	**0,44**	**0,59**	**0,75**
	h4	*52*	**0,54**	**0,76**	**1,07**	*52*	**0,68**	**0,94**	**1,28**
	h5	*6*	–	–	–	*6*	–	–	–
	h1-5	*379*	**0,32**	**0,46**	**0,64**	*379*	**0,39**	**0,56**	**0,76**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Tabelle 27 Bundesweite Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte der Summe EFSA4-PFAS und PFAS24 in Acker-Oberböden des ländlichen Raums

Grünland-Oberboden		Σ-EFSA4-PFAS				Σ-PFAS19			
Region	HK	*n*	50.P.	75.P.	90.P.	*n*	50.P.	75.P.	90.P.
			in µg/ kg TS				in µg/ kg TS		
NO-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	4	–	–	–	4	–	–	–
	h3	15	**0,18**	–	–	15	**0,25**	–	–
	h4	9	–	–	–	9	–	–	–
	h5	5	–	–	–	5	–	–	–
	h2-5	33	**0,20**	**0,32**	**0,40**	33	**0,26**	**0,43**	**0,53**
NW-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	–	–	–	–	–	–	–	–
	h3	10	–	–	–	10	–	–	–
	h4	22	**0,52**	**0,93**	**1,14**	22	**0,60**	**0,93**	**1,24**
	h5	6	–	–	–	6	–	–	–
	h2-5	38	**0,51**	**0,89**	**1,12**	38	**0,61**	**0,93**	**1,24**
Mittel-/Süd-Deutschland	h1	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	1	–	–	–	1	–	–	–
	h3	13	–	–	–	13	–	–	–
	h4	63	**0,63**	**1,01**	**1,19**	63	**0,81**	**1,31**	**1,52**
	h5	29	**1,03**	**1,21**	**1,42**	29	**1,39**	**1,57**	**1,77**
	h2-5	106	**0,71**	**1,04**	**1,27**	106	**0,92**	**1,39**	**1,58**
bundesweit	h1	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	5	–	–	–	5	–	–	–
	h3	38	**0,33**	**0,44**	**0,57**	38	**0,43**	**0,58**	**0,74**
	h4	94	**0,57**	**0,95**	**1,18**	94	**0,77**	**1,18**	**1,45**
	h5	40	**0,90**	**1,17**	**1,35**	40	**1,11**	**1,56**	**1,73**
	h2-5	177	**0,57**	**0,95**	**1,19**	177	**0,75**	**1,16**	**1,53**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil

Tabelle 28 (Bundesweite) Hintergrundwerte für die Gesamtgehalte des Ersatzstoffes ADONA in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raums

		ADONA – Acker-Oberboden				ADONA – Grünland-Oberboden			
Region	**HK**	***n***	**50.P.**	**75.P.**	**90.P.**	***n***	**50.P.**	**75.P.**	**90.P.**
			in µg / kg TS				in µg / kg TS		
NO-Deutschland	**h1**	*4*	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*54*	<NWG	<NWG	<NWG	*4*	–	–	–
	h3	*51*	<NWG	<NWG	<NWG	*15*	<NWG	–	–
	h4	*7*	–	–	–	*9*	–	–	–
	h5	–	–	–	–	*5*	–	–	–
	h1-5	*116*	<NWG	<NWG	<NWG				
	h2-5					*33*	<NWG	<NWG	<NWG
NW-Deutschland	**h1**	–	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*16*	<NWG	–	–	–	–	–	–
	h3	*51*	<NWG	<NWG	<NWG	*10*	–	–	–
	h4	*15*	<NWG	–	–	*22*	<NWG	<NWG	<NWG
	h5	*3*	–	–	–	*6*	–	–	–
	h1-5	*85*	<NWG	<NWG	<NWG				
	h2-5					38	**<NWG**	**<NWG**	**<NWG**
Mittel-/Süd-Deutschland	**h1**	*1*	–	–	–	–	–	–	–
	h2	*25*	<NWG	**<0,006**	**0,007**	*1*	–	–	–
	h3	*119*	<NWG	**<0,006**	**0,010**	*13*	–	–	–
	h4	*30*	<NWG	**<0,006**	**<0,006**	*63*	**<0,006**	**<0,006**	**0,022**
	h5	*3*	–	–	–	*29*	**<0,006**	**<0,006**	**0,010**
	h1-5	*178*	<NWG	**<0,006**	**0,007**				
	h2-5					*106*	**<0,006**	**<0,006**	**0,019**

HK = Humusklasse; h1= <1 Ma-% Humus, h2= 1 - <2 Ma-% Humus, h3= 2 - <4 Ma-% Humus, h4= 4 - <8 Ma-% Humus, h5= 8 - <15 Ma-% Humus; n = Probenanzahl; P. = Perzentil; < NWG = kleiner Nachweisgrenze der jeweiligen Verbindung bzw. nicht nachweisbar; < 0, X = kleiner Bestimmungsgrenze der jeweiligen Verbindung

B Anhang: Karten der bundesweiten Verteilung von PFAS-Gesamtgehalten in landwirtschaftlichen genutzten Böden des ländlichen Raums

Abbildung 35 Verteilung der PFOA- und PFNA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)

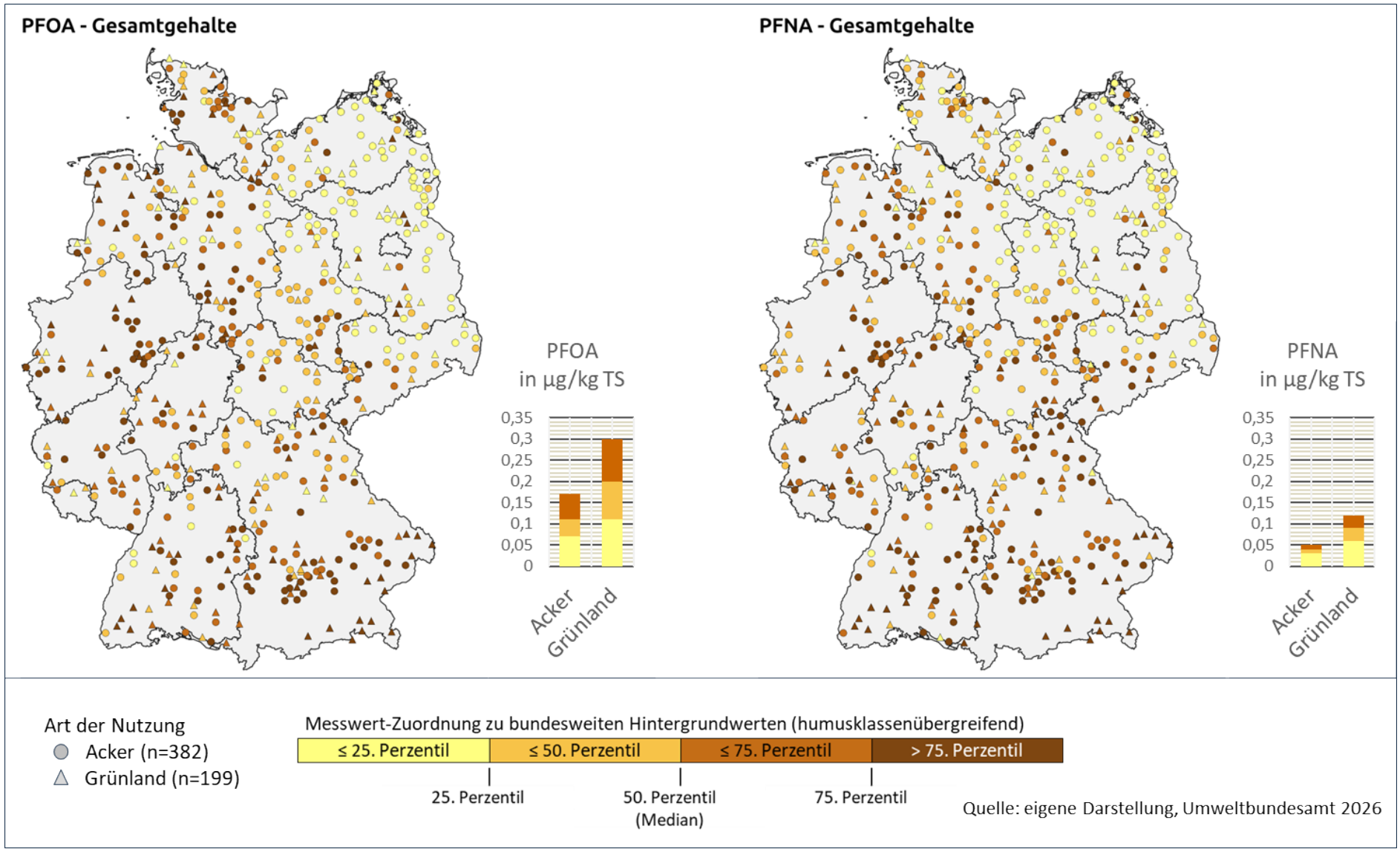


Abbildung 36 Verteilung der PFOS- und Σ-EFSA4- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)

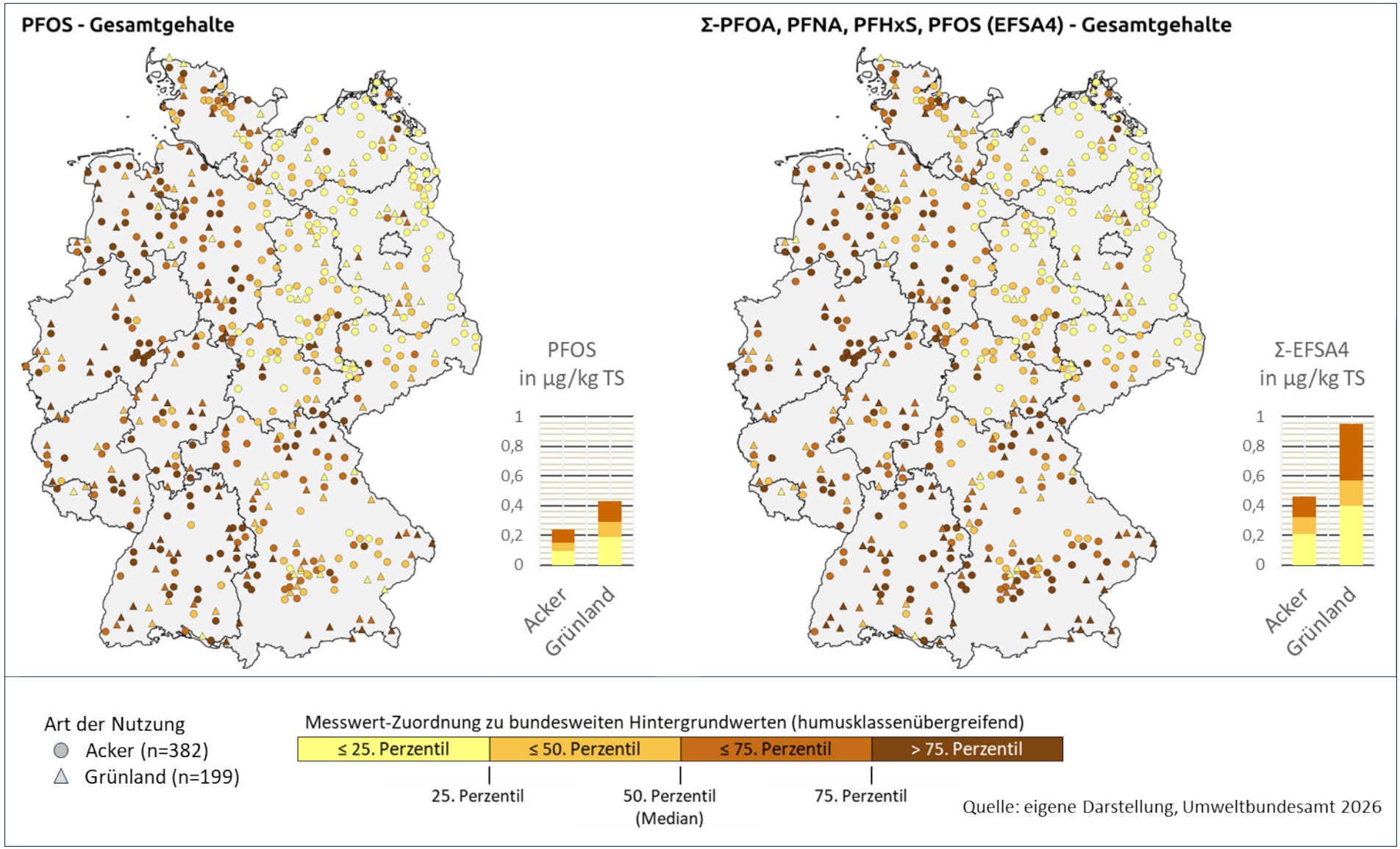


Abbildung 37 Verteilung der PFBA- und PFPeA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)

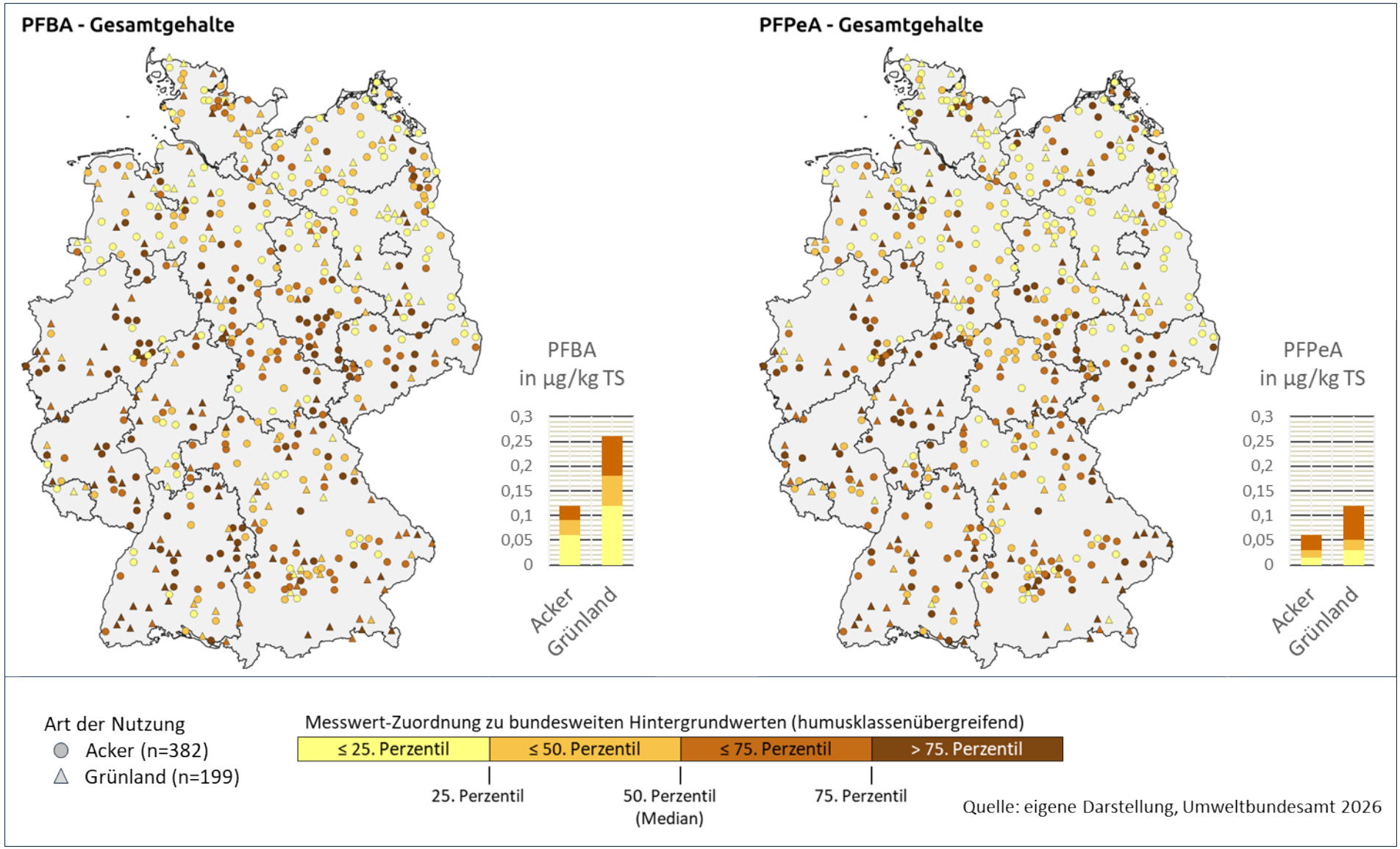


Abbildung 38 Verteilung der PFHxA- und PFHpA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)

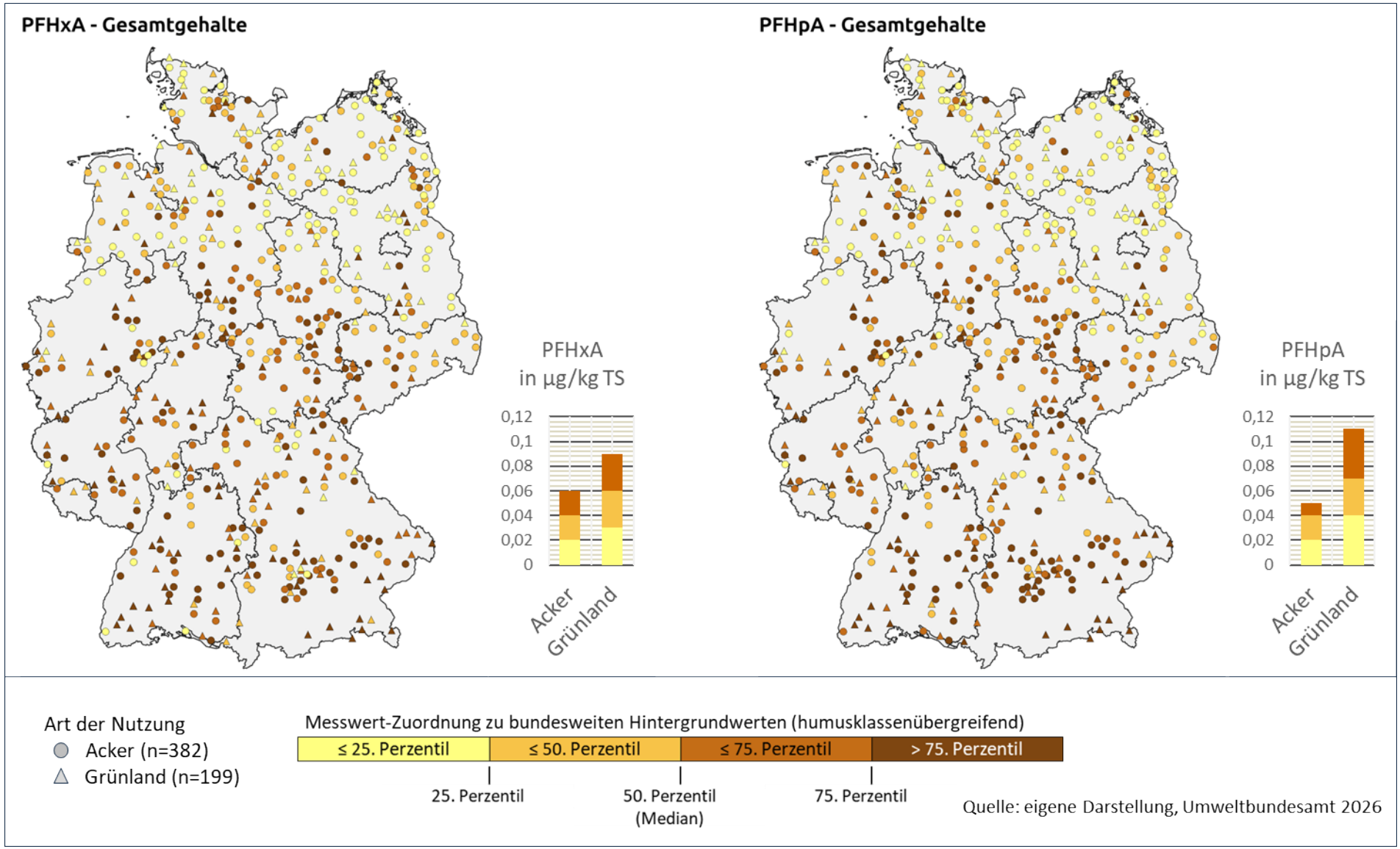


Abbildung 39 Verteilung der PFDA- und PFUnDA- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)

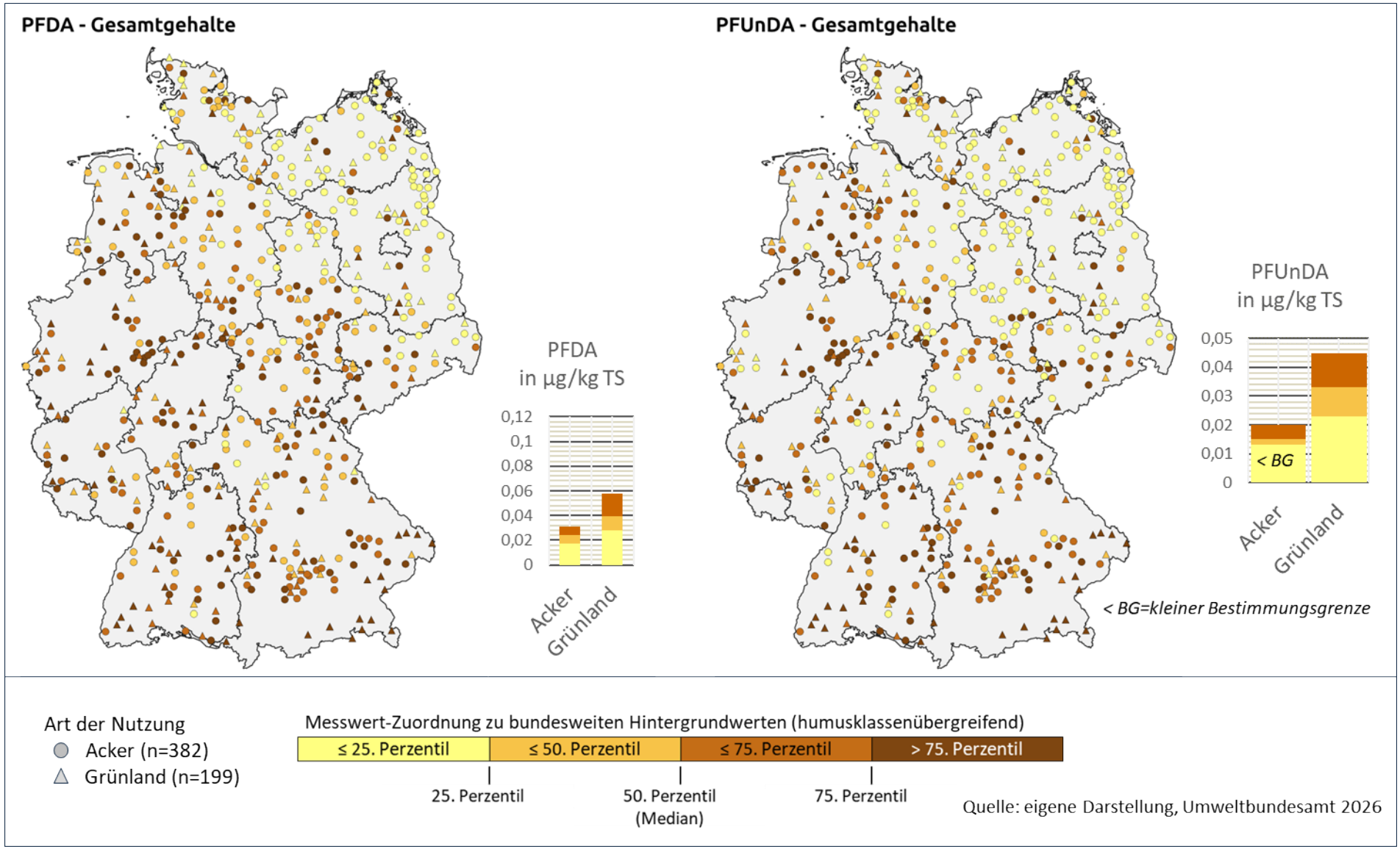
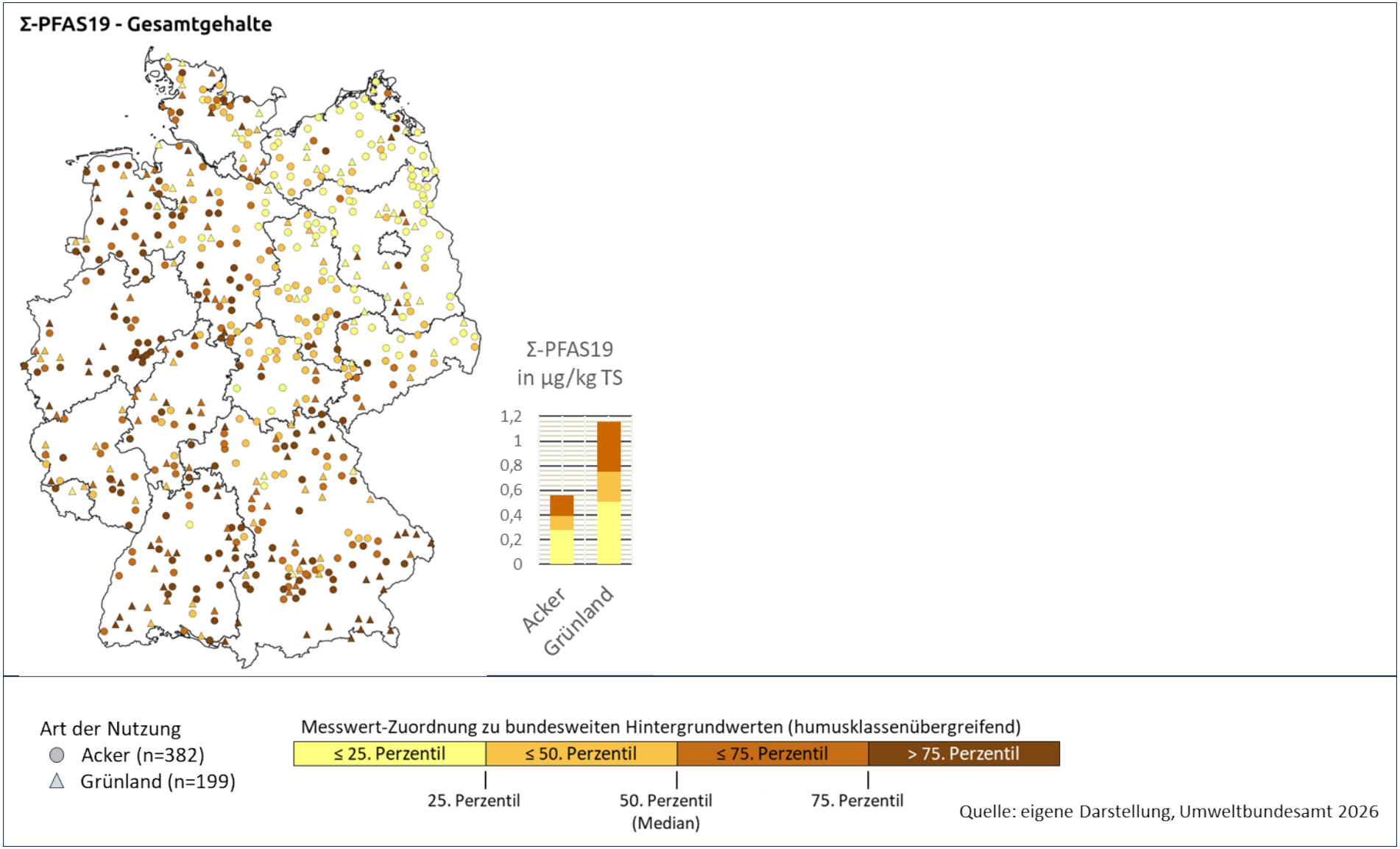


Abbildung 40 Verteilung der Σ-PFAS19- Gesamtgehalte in Acker- und Grünland-Oberböden des ländlichen Raumes (nach Perzentilklassen gruppiert)



C Anhang: Karten der bundesweiten Detektion und Quantifizierung von PFAS-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

Abbildung 41 Detektion und Quantifizierung von PFHxS- und PFDoDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

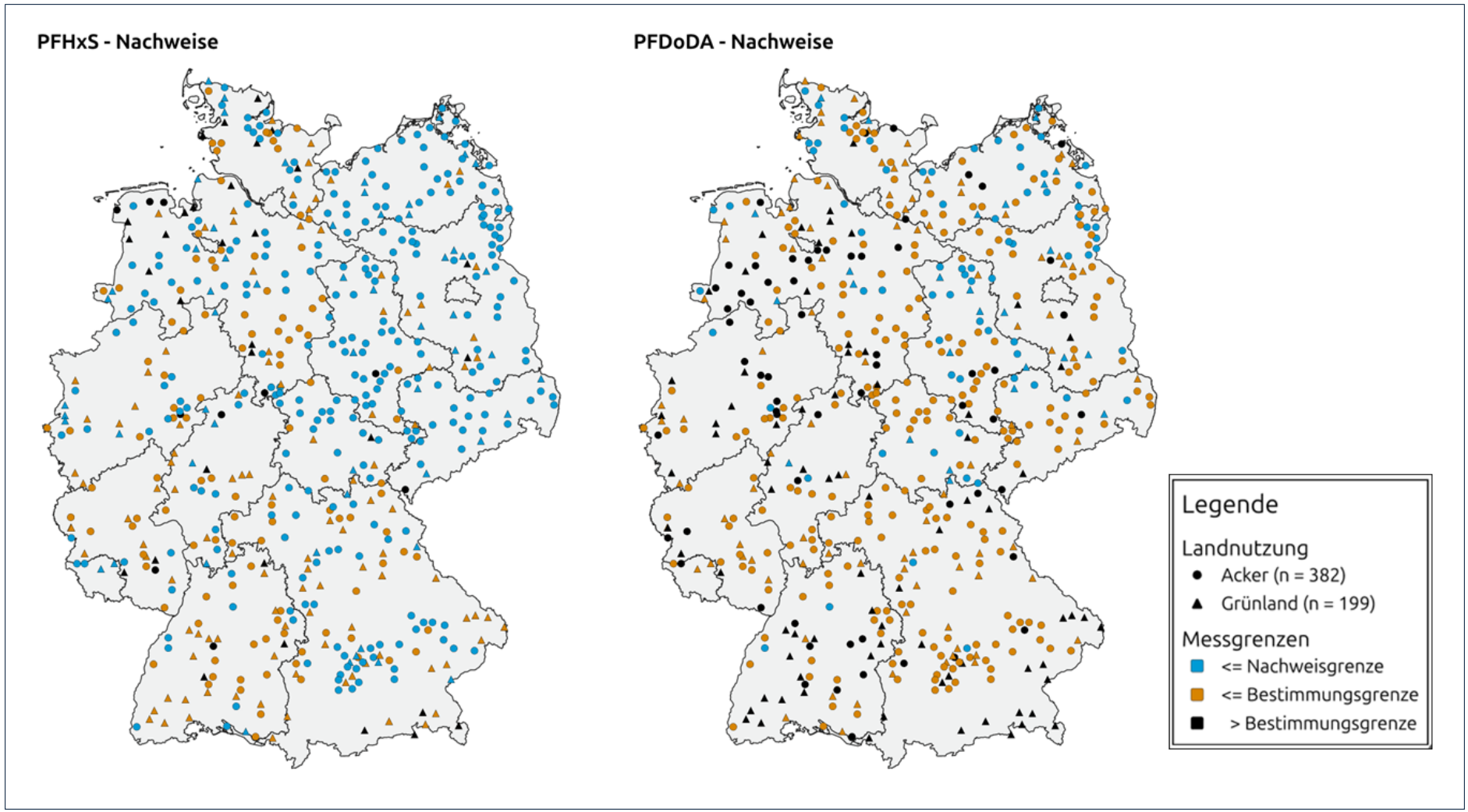


Abbildung 42 Detektion und Quantifizierung von PFBS- und PFTrDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

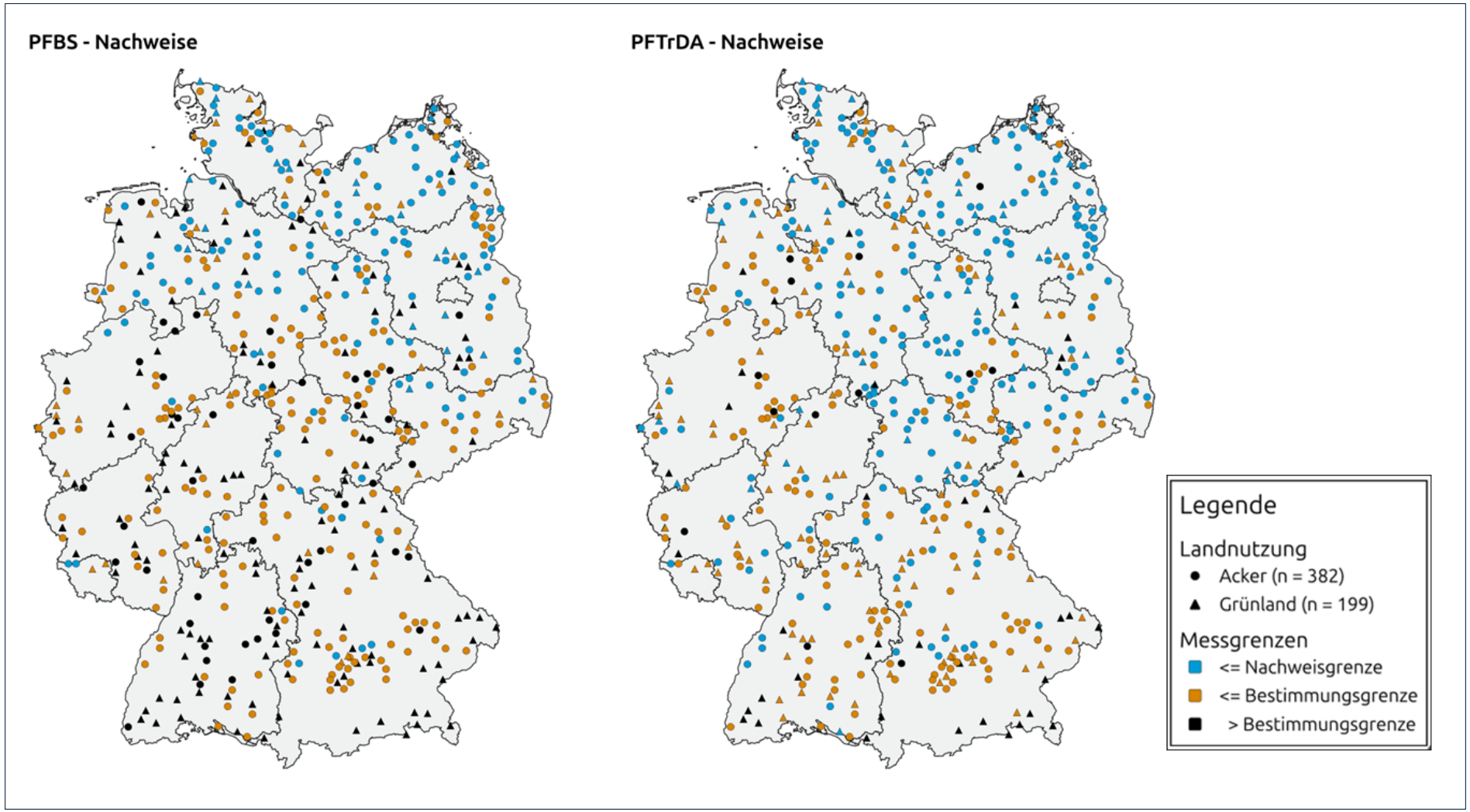


Abbildung 43 Detektion und Quantifizierung von PFTeDA- und PFHxDA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

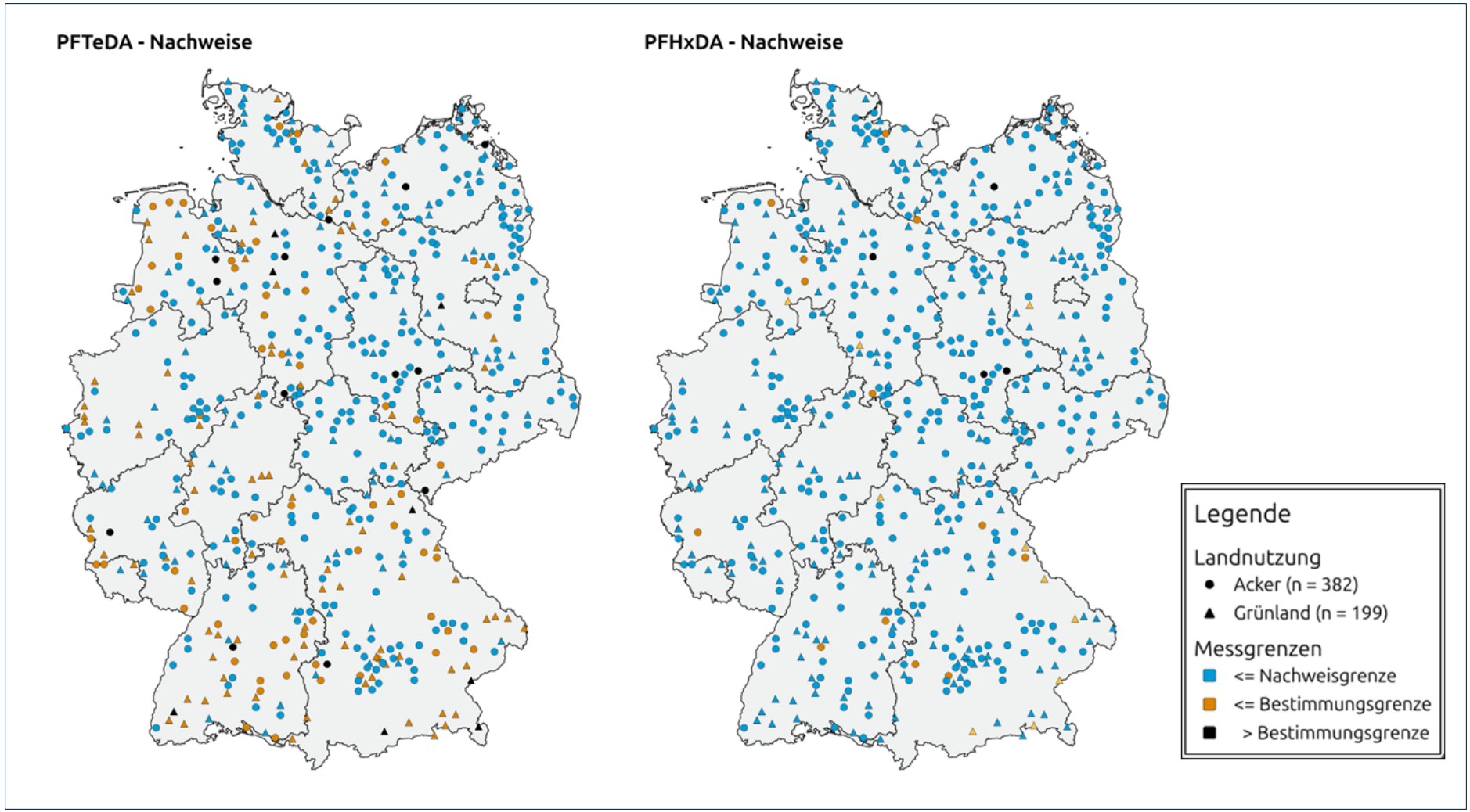


Abbildung 44 Detektion und Quantifizierung von PFHpS- und ADONA-Gesamtgehalten in landwirtschaftlich genutzten Böden des ländlichen Raums

