



Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen

LANUV-Fachbericht 150

Inhalt

1	Veranlassung und Zielsetzung	4
2	Standorte und Methoden.....	5
2.1	Standorte der Bodenuntersuchungen	5
2.2	Probenahme und Probenvorbereitung	7
2.3	PFAS-Analytik	10
2.4	Methodik der Ableitung von Hintergrundwerten	11
3	Untersuchungsergebnisse zu PFAS-Feststoffgehalten.....	14
3.1	Böden unter Grünlandnutzung.....	14
3.2	Böden unter Ackernutzung	16
3.3	Böden unter Waldnutzung	17
4	Untersuchungsergebnisse zu PFAS-Eluatgehalten	20
4.1	Böden unter Grünlandnutzung.....	20
4.2	Böden unter Ackernutzung	22
4.3	Böden unter Waldnutzung	23
5	Untersuchungsergebnisse zum Vorkommen weiterer PFAS in Böden	26
5.1	Untersuchungen auf weitere PFAS.....	26
5.2	Untersuchungen auf ultrakurzkettige PFAS	26
5.3	Untersuchungen auf Vorläufersubstanzen mittels TOP-Assay.....	28
6	Hintergrundwerte von PFAS	30
6.1	PFAS-Hintergrundwerte im Feststoff.....	30
6.2	PFAS-Hintergrundwerte im 2:1 Eluat	31
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	35
8	Literatur.....	36
	Abbildungsverzeichnis	38
	Tabellenverzeichnis	39
	Anhang	40
	Abbildungsverzeichnis Anhang	66
	Tabellenverzeichnis Anhang	66

1 Veranlassung und Zielsetzung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) bilden eine vielschichtige Stoffgruppe, die nach heutigem Kenntnisstand mehrere tausend Einzelsubstanzen umfasst. Es handelt sich um anthropogen hergestellte, langlebige organische Verbindungen, die wasser-, schmutz- und fettabweisende Eigenschaften in Verbindung mit ihrer hohen Stabilität aufweisen und natürlicherweise nicht in der Umwelt vorkommen (HELD & REINHARD 2020). Punktuelle Belastungen des Bodens mit PFAS können beispielsweise durch Löschmitteleinsätze oder betriebliche Anwendungen (z. B. in Galvaniken) entstehen (LANUV 2023).

Zur Beantwortung stoffbezogener Fragestellungen im Bodenschutz sind neben wirkungsbezogenen Betrachtungen Kenntnisse über allgemein verbreitete Hintergrundgehalte von Stoffen von Bedeutung, mit Hilfe derer verschiedenen Fragestellungen nachgegangen werden kann. Hintergrundgehalte sind als Schadstoffgehalte eines Bodens definiert, die sich aus dem geogenen (natürlichen) Grundgehalt eines Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammensetzen. Hierbei ist für die Schadstoffgruppe PFAS der geogene Grundgehalte irrelevant, da PFAS ausschließlich anthropogen erzeugt sind. Hintergrundwerte sind repräsentative, statistisch abgeleitete Werte für allgemein verbreitete Hintergrundgehalte eines Stoffes oder einer Stoffgruppe in Böden. Für unterschiedliche Stoffe, wie beispielsweise ausgewählte Schwermetalle und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe liegen Hintergrundwerte auf Bundesebene (LABO 2017) sowie auf Landesebene (LANUV 2015) vor. Aus den Niederlanden (WINTERSEN 2020), Flandern (VRANCKEN 2022), Schweden (SÖRENGÅRD et al. 2022) und Vermont (ZHU et al. 2022) gibt es bereits Hinweise zum ubiquitären Vorkommen von PFAS in Oberböden. Aus Deutschland gibt es Studien, die durch Eluatuntersuchungen auf eine ubiquitäre Hintergrundbelastung hindeuten (LUBW 2021). Hintergrundgehalte und -werte werden in der Regel als Feststoffwerte beschrieben. Für PFAS konnten bislang keine Hintergrundwerte im Feststoff hergeleitet werden, da diese größtenteils unter der in Deutschland bisher üblichen Bestimmungsgrenze von 10 µg/kg liegen. Hinweise auf ubiquitäre PFAS-Gehalte in Oberböden NRWs konnten bisher nur über Eluatuntersuchungen aufgrund der in der wässrigen Phase gegenüber der Festphase deutlich besseren Bestimmungsgrenze beschrieben werden. Daher wurden für PFAS vorsorgeorientierte Anforderungen hilfsweise und vorläufig in Form von Eluatgehalten formuliert (Leitfaden der Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS 2022 „Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials“). Der Leitfaden ist in NRW mit erläuternden Hinweisen für den Verwaltungsvollzug per Erlass des Umweltministeriums vom 04.03.2022 (MUNV 2022) zur Anwendung bekannt gegeben worden.

Ziel dieses Projektes war der Frage nachzugehen, ob und in welcher Größenordnung diffuse, ubiquitäre PFAS-Einträge in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen vorliegen. Hierzu sollten Hintergrundgehalte von Böden in Nordrhein-Westfalen ermittelt und statistisch belastbare Hintergrundwerte für PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen abgeleitet werden. Um Hintergrundgehalte für PFAS zu ermitteln, wurden im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr (MUNV) im Rahmen dieses Projektes auf 188 Standorten im ländlichen Raum Nordrhein-Westfalens über 300 Bodenproben auf Grünland-, Acker- und Waldflächen entnommen. Damit die PFAS-Konzentrationen auch im Feststoff quantifiziert werden konnten, wurde die Bestimmungsgrenze der Feststoffuntersuchung um den Faktor 100 gegenüber der in der DIN 38414-14 vorgeschriebenen 10 µg/kg auf 0,1 µg/kg abgesenkt. Zusätzlich wurden PFAS-Eluatgehalte im 2:1 Schüttel eluat nach DIN 19529 ermittelt und nach DIN 38407-42 auf PFAS untersucht, um Informationen über die ubiquitär löslichen PFAS-Gehalte der Böden zu gewinnen.

2 Standorte und Methoden

2.1 Standorte der Bodenuntersuchungen

Fachliche Grundlage für die Auswahl der Standorte waren die Berichte „Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden“ der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO 2017) sowie der LANUV-Fachbericht 66 „Hintergrundwerte für Schadstoffgehalte in Böden – Aktualisierung der Werte und Karten für Nordrhein-Westfalen“ (LANUV 2015). Dementsprechend wurden für die Standortauswahl der Bodenbeprobungen die folgenden Bezugsgrößen berücksichtigt:

A) Nutzungsart: Acker, Grünland, Wald

Als wesentlicher Einflussfaktor bestimmt die Nutzungsart die Schadstoffverteilung und somit die Hintergrundwerte in Böden. Eine Differenzierung der Böden nach der Bodennutzung berücksichtigt die nutzungsbedingten Bearbeitungstiefen und nutzungsspezifischen Stoffeinträge. So bewirkt beispielsweise die tief reichende Bodenbearbeitung auf Ackerstandorten eine Durchmischung und Homogenisierung des Bodens innerhalb des Pflughorizontes. Dies führt in der Regel zu geringeren Schadstoffgehalten im Vergleich zu Grünlandböden, auf denen Schadstoffe im obersten humosen Horizont (Ah-Horizont) angereichert werden. Deutliche Unterschiede treten zudem meist zwischen land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden auf. Unter Wald werden in der Regel deutlich erhöhte Schadstoffgehalte der Böden ermittelt, die auf höhere atmosphärisch bedingte Stoffeinträge zurückzuführen sind. Die luftbürtigen Schadstoffe werden durch die Waldvegetation gefiltert und gelangen durch Auskämmungseffekte in den Boden. Die Hintergrundwerte werden im Hinblick auf die zu erwartenden stofflichen Unterschiede nach den Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald sowie den nutzungsspezifischen Entnahmetiefen (siehe zweite Bezugsgröße) differenziert.

B) Bodenhorizont: Oberböden und Unterböden sowie falls vorhanden organische Auflagen

Für die Ableitung der Hintergrundwerte in Böden müssen die Horizonte in Gruppen zusammengefasst werden. Dabei werden Kriterien berücksichtigt, welche den Stoffgehalt der Böden beeinflussen. Diese sind beispielsweise die Nähe zur Bodenoberfläche und damit zum Eintrag über den Luftpfad sowie die Humusgehalte der Böden und damit die Bindung an organische Gruppen (LANUV 2015). Daher werden Ober- und Unterböden sowie die humosen Auflagen im Wald separat betrachtet.

C) Siedlungsstrukturelle Gebietstypen: Gebiet mit überwiegend ländlicher Struktur, Ballungsrandzone, Ballungskern

Die gebietsspezifische Immissionssituation (diffuse atmosphärische Einträge) kann sich unmittelbar auf die Hintergrundgehalte in Oberböden auswirken (z.B. Ballungsraum versus ländlicher Raum). Daher sollten Hintergrundgehalte gebietsdifferenziert erhoben werden. Die gebietsstrukturellen Ausprägungen können auf verschiedenen Skalenebenen betrachtet werden. So erfolgte bei der erstmaligen Erarbeitung der Hintergrundwerte für bisher betrachtete Schadstoffe (bspw. Schwermetalle) in Oberböden von Nordrhein-Westfalen im Jahr 1998 die Gebietsdifferenzierung mit Hilfe der sied-

lungsstrukturellen Gebietstypisierung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR, ehemals BfLR). Es zeigte sich jedoch, dass die Gebietstypisierung auf regionaler bzw. auf Kreisebene die zu erwartenden Belastungsmuster nicht hinreichend abbildet, so dass bei den Aktualisierungen der Hintergrundwerte in den Jahren 2003 und 2015 eine Gebietsdifferenzierung auf Gemeindeebene erfolgte. Als Grundlage dafür diente die Zuordnung der siedlungsstrukturellen Gebietstypen in Anlehnung an die Vorgaben des seinerzeit gültigen Gesetzes zur Landesentwicklung (Landesentwicklungsprogramm NRW – LEPro). Danach wurden die Gemeinden entsprechend ihrer Flächengröße und Einwohnerdichte mit Hilfe der Angaben des Statistischen Jahrbuches mit Stand 2001 typisiert (siehe LANUV 2015). Diese Gebietsdifferenzierung wurde auch für die Neuableitung der Hintergrundwerte für PFAS im Rahmen des vorliegenden Projektes verwendet (Abbildung 1).

Die bisher im Rahmen der Hintergrundwerteermittlung anderer Schadstoffe häufig verwendete Bezugsgröße Bodenausgangsgestein wird für die Stoffgruppe PFAS nicht differenziert betrachtet, da es keine geogenen Anteile von PFAS im Ausgangsgestein gibt.

Als Ausschlusskriterien für die Auswahl der Standorte wurden die Lage der Untersuchungsfläche in einem Überschwemmungsgebiet und Einträge im Altlastenkataster festgelegt. Zusätzlich sollte kein Hinweis auf weitere mögliche PFAS-Einträge vorhanden sein, wie beispielsweise durch

- Aufbringung von fluorhaltigem Löschmittel (Brände, Übungen),
- Vornutzung als Deponie oder Altablagerungen,
- Bewässerung mit PFAS-belastetem Grund- oder Oberflächenwasser oder
- Materialaufbringung (Klärschlamm, Bioabfall, Bodenauftrag mit standortfremden Material).

Insgesamt wurden für das Projekt 188 Standorte im ländlichen Raum NRWs zur Beprobung ausgewählt. Die Standortvorschläge wurden unter der Berücksichtigung der o.g. Ausschlusskriterien u.a. von den Unteren Bodenschutzbehörden unterbreitet. Bei der Standortauswahl wurde auf eine möglichst gute Abdeckung aller fünf Regierungsbezirke NRWs in allen Nutzungsarten geachtet. Abbildung 1 zeigt die räumliche Verteilung der beprobten 68 Grünland-, 107 Acker- und 13 Waldstandorte.

Für die statistische Ableitung von Hintergrundwerten ist eine Mindestprobenanzahl pro Einheit von 20 notwendig (LABO 2017). In diesem Projekt war die Ableitung von Hintergrundwerten für die Nutzungsarten Grünland und Acker vorgesehen, da häufig unter dieser Nutzungsart Bodenaushub anfällt. Dennoch sind Informationen über PFAS-Gehalte von Waldböden hilfreich und notwendig, um ein ubiquitäres Vorkommen nachzuweisen. Daher wurden 13 über ganz NRW verteilte Waldstandorte untersucht.

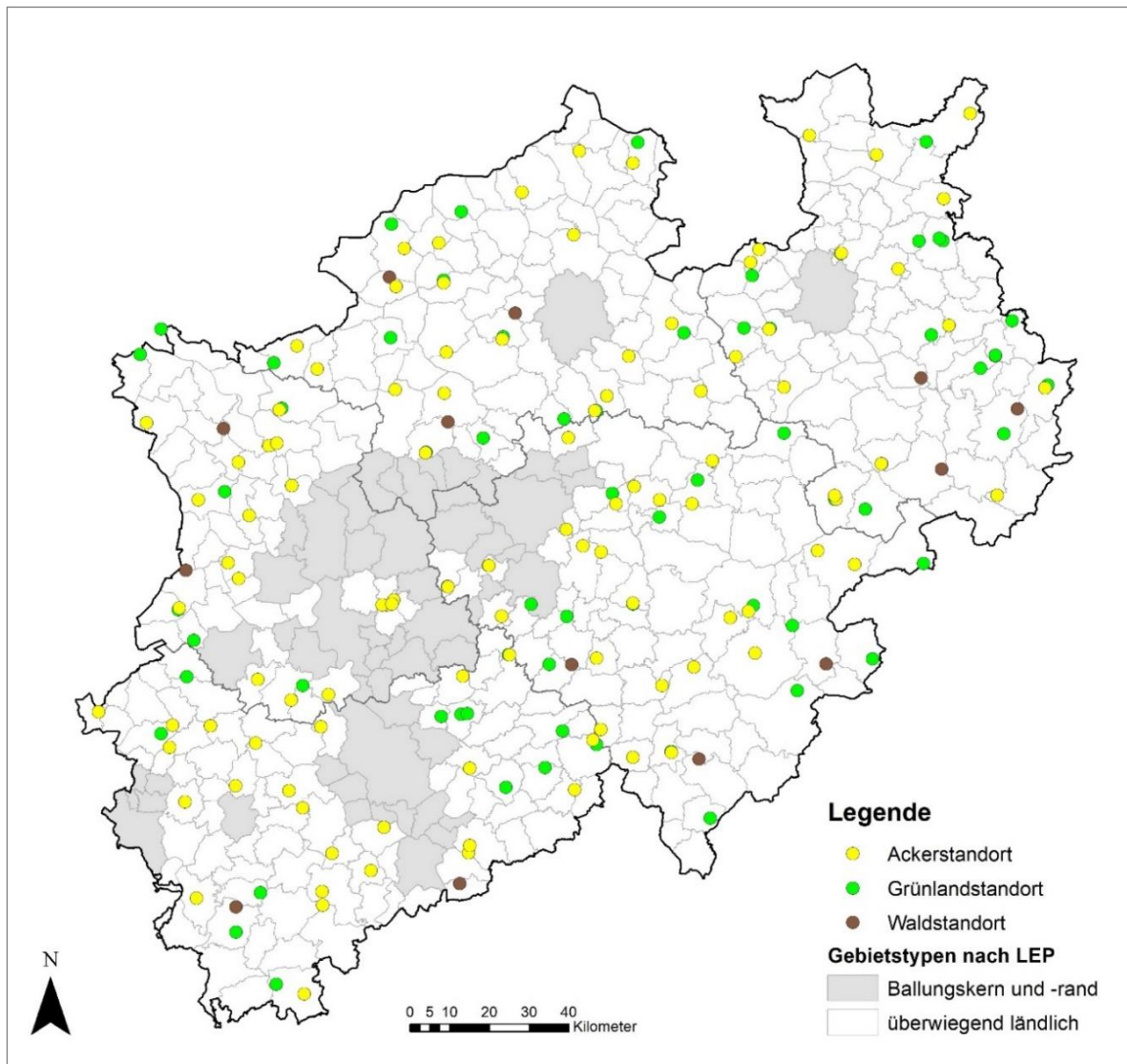


Abbildung 1: Standorte der Bodenuntersuchungen auf PFAS in ländlichen Gebieten in NRW

2.2 Probenahme und Probenvorbereitung

Die Probenahme wurde vom Geologischen Dienst NRW durchgeführt (Abbildung 2). Für die Bodenprobenahme wurde eine Mischprobe aus zwei bis drei Schürfen pro Standort durchgeführt, um die gewünschte Menge an Bodenmaterial (ca. 2 kg getrockneter < 2 mm gesiebter Boden) gewinnen zu können. Die Schürfe waren nicht weiter als drei Meter voneinander entfernt und wiesen keine erkennbaren, bodenkundlich relevanten Unterschiede auf (Bodenart, Stauwasser etc.).

Die Beprobung erfolgte ausschließlich mit plastikfreien Materialien. Beprobungen bei Regen wurden vermieden, da abperlende Wassertropfen auf Regenschutzkleidung eine Kontaminationsquelle für PFAS darstellen könnten. Die Bodenproben wurden in PP-Beutel aufbewahrt und zeitnah der Probenvorbereitung zugeführt.

Die Beprobungstiefe wurde nutzungsabhängig festgelegt. An jedem Standort wurden Oberbodenproben entnommen, an einem Teil der Standorte Unterbodenproben und bei den Waldstandorten wurden zusätzlich die Auflagen beprobt. Hierbei galten folgende Vorgaben:

Beprobungstiefe Oberböden

- Grünland: Oberboden bis max. 10 cm Tiefe (horizontbezogen; jedoch bis max. 10 cm Mächtigkeit beprobt, bei geringerer Mächtigkeit des Ah weniger als 10 cm beprobt)
- Acker: Ap-Horizont bis max. 30 cm (horizontbezogen; jedoch bis max. 30 cm Mächtigkeit beprobt, bei geringerer Mächtigkeit des Ap weniger als 30 cm beprobt)
- Wald: Oberboden bis max. 10 cm Tiefe (horizontbezogen; jedoch bis max. 10 cm Mächtigkeit beprobt, bei geringerer Mächtigkeit des Ah weniger als 10 cm beprobt)

Beprobungstiefe Unterböden

- Grünland: Unterboden bis max. 30 cm (horizontbezogen; jedoch Unterboden erst ab 10 cm Mächtigkeit bis max. 30 cm beprobt, bei geringerer Mächtigkeit weniger als 30 cm beprobt)
- Acker: Unterboden bis max. 60 cm (horizontbezogen; jedoch Unterboden erst ab 30 cm Mächtigkeit bis max. 60 cm beprobt, bei geringerer Mächtigkeit weniger als 60 cm beprobt)
- Wald: Unterboden bis max. 30 cm (horizontbezogen; jedoch Unterboden erst ab 10 cm Mächtigkeit bis max. 30 cm beprobt, bei geringerer Mächtigkeit weniger als 30 cm beprobt)

Beprobungstiefe Auflage(n)

- Im Wald wurde zusätzlich die Auflage beprobt (bis auf Mull und mullartigen Moder). Vorhandene L+Of-Horizonte wurden gemeinsam beprobt, vorhandene Oh-Horizonte wurden separat beprobt.



Abbildung 2: Schurf auf einer Ackerfläche. Foto: LANUV NRW / R. Oberhäuser

Der allergrößte Teil der Bodenproben wurde in den Jahren 2021 und 2022 entnommen. Bei einem kleinen Anteil der Bodenproben handelt es sich um Rückstellproben aus einer ersten Screeninguntersuchung aus dem Jahr 2019. Die Anzahl der jeweils untersuchten Feststoffproben und erstellten Eluatproben ist zu entnehmen. Alle Bodenproben wurden im Feststoff auf PFAS untersucht, alle 2021 und 2022 entnommen Bodenproben wurden eluiert und im Eluat auf PFAS untersucht. Für die im Jahr 2019 entnommenen Rückstellbodenproben lag nicht mehr genug Material für die Elution vor, diese Bodenproben konnten lediglich im Feststoff untersucht werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl der entnommenen Bodenproben und der daraus erstellten Eluatproben

Nutzungsart	Bezeichnung	Entnahmetiefe	Feststoffproben	Eluatproben
Grünland	Oberboden	0 – 10 cm	68	68
	Unterboden	10 – 30 cm	27	27
Acker	Oberboden	0 – 30 cm	107	95
	Unterboden	30 – 60 cm	40	31
Wald	Auflage	–	18	18
	Oberboden	0 – 10 cm	13	13
	Unterboden	10 – 30 cm	13	13

Die Probenvorbereitung wurde vom Geologischen Dienst NRW durchgeführt. Im Rahmen der Probenvorbereitung nach DIN 19747 wurden alle Boden- und Auflageproben bei ca. 40 °C im Trockenschrank getrocknet. Die Zerkleinerung erfolgte i.d.R. händisch durch Mörsern bei gleichzeitiger manueller Aussortierung von Grobmaterial (Steine, Wurzeln, anthropogene Beimengung), die Fraktionierung von Grob- und Feinmaterial über Siebung. Sehr feuchter toniger Schluff bis Ton, welcher bei der Trocknung, trotz entsprechender händischer „Vorzerkleinerung“, große Klumpen bildete, die kaum händisch zu zerstören sind, wurde ergänzend einmalig durch einen Backenbrecher auf ca. 1 cm zerkleinert. Diese Behandlung war nur in wenigen Einzelfällen nötig, da sie i.d.R. nur bei (zum Anlieferungszeitpunkt) sehr feuchten Proben notwendig ist.

Eine Aufteilung der < 2 mm gesiebten Proben für die Weiterverarbeitung in den verschiedenen Laboren erfolgte über einen automatischen Probenteiler. Das Grobmaterial wurde als Rückstellprobe gesammelt.

Für die Feststoffuntersuchungen wurden die Bodenproben entsprechend der DIN 38414-14 im TZW Karlsruhe ergänzend gemahlen und auf 250 µm kontrollgesiebt.

Für die Eluatuntersuchungen wurden die Bodenproben nach DIN 19529 im Schüttelverfahren (2:1 bzw. 10:1 bei Waldauflagen) eluiert und abweichend von den Vorgaben in der DIN nicht filtriert, sondern ausschließlich zentrifugiert, um Sorptionsverluste an den Filtermaterialien zu

vermeiden. Für die Elution wurden wie oben beschrieben abweichend von der DIN keine feldfrischen, sondern bei 40° C getrocknete Bodenproben verwendet. Die Trocknungstemperatur der Bodenproben für die Elution hat nach ersten Studien (u.a. LANGE et al. 2022) einen erheblichen Einfluss auf die PFAS-Eluatgehalte. In Abstimmung mit einer bundesweiten Arbeitsgruppe zum Thema PFAS-Hintergrundwerte wurde die Trocknung bei 40°C und die Elution ohne die Anwendung der Filtration durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen.

2.3 PFAS-Analytik

Die PFAS-Analytik wurde durch das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser durchgeführt. Die Feststoffanalytik der Bodenproben wurde in Anlehnung an die DIN 38414-14 mit einer um den Faktor 100 abgesenkten Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg auf die in Tabelle 2 angegebene Stoffliste angewandt. Die Eluatanalytik wurde in Anlehnung an die DIN 38407-42 mit einer um den Faktor 10 abgesenkten Bestimmungsgrenze von 1 ng/L ebenfalls auf die in Tabelle 2 angegebene Stoffliste angewandt. An wenigen ausgewählten Bodenproben wurde auf die in Tabelle 3 angegebenen weiteren PFAS-Einzelstoffe untersucht.

Tabelle 2: Liste der untersuchten PFAS-Einzelstoffe mit Angabe der CAS-Nummer (Standarduntersuchungsumfang des Projektes)

Kurzname	Einzelstoff	CAS-Nr.
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9
PFOA	Perfluoroktansäure	335-67-1
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1
PFDA	Perfluordekansäure	335-76-2
PFUnDA	Perfluorundekansäure	2058-94-8
PFDoDA	Perfluordodekansäure	307-55-1
PFTTrDA	Perfluortridekansäure	72629-94-8
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	2706-91-4
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	357-92-8
PFOS	Perfluoroktansulfonsäure	1763-23-1
PFNS	Perfluorononansulfonsäure	68259-12-1
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	333-77-3
H4PFHxS (4:2 FTS)	4:2-Fluortelomersulfonsäure	757124-72-4
H4PFOS (6:2 FTS)	6:2-Fluortelomersulfonsäure	27619-97-2
H4PFDS (8:2 FTS)	8:2-Fluortelomersulfonsäure	39108-34-4
HFPO-DA (Gen X)	Hexafluorpropylenoxiddimersäure	13252-13-6
DONA (ADONA)	Perfluor-4,8-dioxa-3H-nonansäure	919005-14-4
PFOSA	Perfluoroktansulfonamid	754-91-6
PFOSAA	Perfluoroktansulfonamidoessigsäure	2806-24-8
N-EtFOSA	N-Ethyl-Perfluoroktansulfonamid	4151-50-2
N-Et-FOSAA	N-Ethyl-Perfluoroktansulfonamidoessigsäure	2991-50-6

Tabelle 3: Erweiterter Untersuchungsumfang des Projektes mit Angabe der CAS-Nummer

Kurzname	Einzelstoff	CAS-Nr.
TFA	Trifluoressigsäure	76-05-1
PFPrA	Perfluorpropionsäure	422-64-0
PFUnDS	Perfluorundecansulfonsäure	749786-16-1
PFDoDS	Perfluordodecansulfonsäure	79780-39-5
PFTrDS	Perfluortridecansulfonsäure	791563-89-8
6:2-diPAP	6:2-Fluortelomerphosphatdiester	57677-95-9
8:2-diPAP	8:2-Fluortelomerphosphatdiester	678-41-1
6:6-PFPiA	6:6 Perfluorphosphinsäure	40143-77-9
6:8-PFPiA	6:8 Perfluorphosphinsäure	610800-34-5
8:8-PFPiA	8:8 Perfluorphosphinsäure	40143-79-1

Zusätzlich wurden an ausgewählten Feststoff- und Eluatproben mittels TOP-Assay Untersuchungen zum Vorhandensein von Vorläufersubstanzen durchgeführt. Für die Durchführung des TOP-Assays in Wasserproben wurden die Proben mit Peroxodisulfat im alkalischen Milieu versetzt und für 20 Stunden bei 85 °C behandelt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der gebildeten PFAS entsprechend der DIN-Vorschrift für Wasserproben. Bei der Durchführung des TOP-Assays mit Feststoffproben wurden die Proben zunächst mit Methanol extrahiert. Der Methanolextrakt wurde dann zur Trocknung eingeengt und anschließend mit alkalischer Peroxodisulfatlösung versetzt. Die Reaktionszeit betrug ebenfalls 20 Stunden bei 85 °C. Die Reaktionslösung wurde dann zur Trocknung eingeengt und zunächst mit Acetonitril und anschließend mit einer Methanol/Wasser-Mischung aufgenommen. Von dieser Mischung wird dann ein Aliquot in den Flüssigchromatographen injiziert.

Im Feststoff wurden vom Geologischen Dienst NRW ergänzend zu den PFAS-Untersuchungen des TZW Karlsruhe die Begleitparameter pH-Wert (CaCl_2), Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt, C_{org} -Gehalt, CO_3 -Gehalt und Bodenart untersucht. Im Eluat wurden vom TZW Karlsruhe zusätzlich zu den PFAS-Untersuchungen die Begleitparameter pH-Wert, DOC-Gehalt, Trübung und Leitfähigkeit bestimmt. Die Ergebnisse sind in Anhang 3 dokumentiert.

2.4 Methodik der Ableitung von Hintergrundwerten

Fachliche Grundlage für die Ableitung der Hintergrundwerte ist der Bericht „Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden“ der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO 2017) sowie der LANUV-Fachbericht 66 „Hintergrundwerte für Schadstoffgehalte in Böden – Aktualisierung der Werte und Karten für Nordrhein-Westfalen“ (LANUV 2015). Um statistisch Hintergrundwerte aus den Hintergrundgehalten von PFAS in Böden abzuleiten, wurden sowohl Berechnungen zu Hintergrundwerten für PFAS-Einzelstoffe als auch für Stoffgruppen durchgeführt.

Hintergrundwerte für Einzelsubstanzen

Vorbereitend zur Ableitung von Hintergrundwerten für Einzelsubstanzen wurde die Verteilung der Daten geprüft, da die von der LABO (2017) empfohlene Methode zur Ausreißerbereinigung eine Normalverteilung voraussetzt. Dazu wurde jeder betrachtete Datensatz für die Einzelsub-

stanzen mit IBM SPSS Statistics 27 mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests auf Normalverteilung getestet. Die Prüfung sowie die weitere Verarbeitung der Daten erfolgte getrennt nach Nutzungsart und nach Ober- und Unterböden. Waren die Daten nicht normalverteilt, so wurden sie zunächst logarithmisch transformiert, bevor dann eine Ausreißerbereinigung vorgenommen wurde. Durch die Transformation konnte jedoch nicht für alle Substanzen eine Normalverteilung erreicht werden. Da in den meisten Fällen aber mindestens eine Verbesserung der Verteilung eintrat, wurden keine weiteren Maßnahmen zur Korrektur vorgenommen. Normalverteilte Daten wurden ohne vorherige Transformation einer Ausreißerbereinigung unterzogen.

Die Identifikation und Elimination von Ausreißern aus den Datensätzen erfolgte in Excel 2016 nach der im LABO-Bericht „Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden“ (2017) empfohlenen Methodik, welche sich an der DIN EN ISO 19258 orientiert. Zuerst wurden dabei solche Messwerte, die unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ im Feststoff, $< 1 \text{ ng}/\text{l}$ im Eluat) lagen, durch den Wert der halben Bestimmungsgrenze ($0,05 \mu\text{g}/\text{kg}$ im Feststoff, $0,5 \text{ ng}/\text{l}$ im Eluat) ersetzt. Anschließend wurden für jede Substanz das 25. und das 75. Perzentil, der Interquartilsabstand sowie der 1,5-fache Interquartilsabstand berechnet. Über die Subtraktion des 1,5-fachen Interquartilsabstandes vom 25. Perzentil bzw. die Addition zum 75. Perzentil wurden dann die Ausreißergrenzen definiert. Messwerte, die oberhalb der oberen Ausreißergrenze lagen, wurden entfernt. Werte unterhalb der unteren Ausreißergrenze wurden aus Plausibilitätsgründen (Messwerte generell nah an der Bestimmungsgrenze) im Datensatz belassen.

Abschließend wurden auf Basis des bereinigten Datensatzes die Perzentile für jede Substanz berechnet. Dies erfolgte mit IBM SPSS Statistics 27. Relevant für die Angabe der Hintergrundwerte sind das 50. und das 90. Perzentil.

Hintergrundwerte für Summenparameter

Für die Ableitung der Hintergrundwerte von Summenparametern im Eluat wurden zunächst all solche Werte, die unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 1 \text{ ng}/\text{l}$ im Eluat) lagen, durch den Wert der halben Bestimmungsgrenze ($0,5 \text{ ng}/\text{l}$ im Eluat) ersetzt. Anschließend wurden die Messwerte pro Standort zu Summen aufaddiert: für die 4-EFSA-PFAS; für die 7-PFAS, zu denen GFS-Werte vorliegen; sowie für die 13-PFAS, für die GFS- und oder GOW-Werte vorliegen (7-GFS-PFAS und die 6-GOW-PFAS, siehe Tabelle 4). Die Summenwerte wurden dann, analog zu den Einzelwerten, auf ihre Verteilung hin getestet. Lag keine Normalverteilung vor, wurde hier gleichermaßen zunächst eine logarithmische Transformation der Daten vorgenommen, bevor dann eine Bereinigung der Daten von Ausreißern erfolgte. Waren die Daten dagegen normalverteilt, konnten Ausreißer ohne eine vorhergehende Transformation entfernt werden. Das weitere Vorgehen zur Ausreißerbereinigung sowie zur Berechnung der Perzentile erfolgte ebenfalls analog zu dem der Einzelwerte.

Tabelle 4: Für die Hintergrundwerte bei der Summenbildung berücksichtigte Einzelverbindungen

Summe 4:	Summe 7:	Summe 13:	
4-EFSA-PFAS	7-GFS-PFAS	7-GFS	6-GOW
	PFBA	PFBA	PFPeA PFHpA
PFOA PFNA	PFHxA PFOA PFNA	PFHxA PFOA PFNA	
	PFBS	PFBS	PFDA
PFHxS	PFHxS	PFHxS	
PFOS	PFOS	PFOS	PFHpS H4PFOS PFOSA

Auf die Ableitung der Hintergrundwerte von Summenparametern im Feststoff wurde verzichtet, da nur für drei Einzelsubstanzen (PFBA, PFOA und PFOS) regelmäßig Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze vorlagen.

3 Untersuchungsergebnisse zu PFAS-Feststoffgehalten

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den PFAS-Feststoffuntersuchungen in Böden ländlicher Gebiete in NRW differenziert nach Nutzungsart und Bodenhorizonten dargestellt. Bei den in diesem Kapitel dargestellten Werten handelt es sich um den unbereinigten Datensatz, aus dem später für die statistische Ableitung der Hintergrundwerte noch Ausreißer entfernt wurden. Um die Lesbarkeit der Abbildungen zu verbessern, werden jeweils nur die Einzelparameter in der Legende dargestellt, für die es Befunde oberhalb der Bestimmungsgrenze gab. Für die in diesem Kapitel zur Beschreibung der Hintergrundgehalte verwendeten Gesamtgehaltssummen wurden Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze mit dem Wert „Null“ in der Summenbildung gewertet. Alle Bodenproben wurden auf die in Tabelle 2 angegebenen Einzelparameter untersucht.

3.1 Böden unter Grünlandnutzung

Unter Grünlandnutzung wurden 68 Oberbodenproben im Feststoff auf PFAS analysiert. In allen untersuchten Oberbodenproben unter Grünlandnutzung konnte mit einer Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg PFAS im Feststoff nachgewiesen werden. Die Summe der gemessenen PFAS-Gesamtgehalte liegt zwischen 0,12 µg/kg und 45,83 µg/kg. In Abbildung 3 sind die Messergebnisse von 66 Bodenproben absteigend nach ihren Gesamtgehalten dargestellt (ab 4,91 µg/kg). Auf die Darstellung der zwei offensichtlichen Ausreißer (siehe Kapitel 2.4 und Anhang 4) mit PFAS-Summenwerten von 45,83 µg/kg und 10,25 µg/kg, wurde zugunsten der besseren Lesbarkeit verzichtet.

Am häufigsten und in den größten Anteilen wurden die Einzelsubstanzen PFOS, PFOA und PFBA detektiert. Bei höheren Gesamtgehalten wurden auch weitere Carbonsäuren wie PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA, PFDA und PFUnDA sowie die kurzkettige Sulfonsäure PFBS oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen. Umso höher die Gesamtgehalte der Bodenproben sind, desto mehr Einzelsubstanzen lassen sich in den Bodenproben nachweisen. Die Ergebnisse der im Kapitel 4 beschriebenen, von der Bestimmungsgrenze her deutlich sensibleren Eluatuntersuchungen lassen den Schluss zu, dass vermutlich die meisten der o.g. Einzelsubstanzen auch in den Feststoffproben mit geringen Gesamtgehalten vorhanden sind, deren Konzentrationen im Feststoff jedoch unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen und erst bei höheren Einträgen sichtbar werden.

Unterbodenproben wurden an 27 Standorten unter Grünlandnutzung genommen und auf PFAS im Feststoff analysiert. In 25 Bodenproben wurden PFAS oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg bis zu Gesamtgehalten von 3,26 µg/kg gemessen (Abbildung 4). In den Unterbodenproben wurden wie auch in den Oberbodenproben vor allem die Einzelsubstanzen PFOS, PFOA und PFBA gemessen. In den Unterböden wurden erwartungsgemäß generell geringere Konzentrationen nachgewiesen als in den Oberböden.

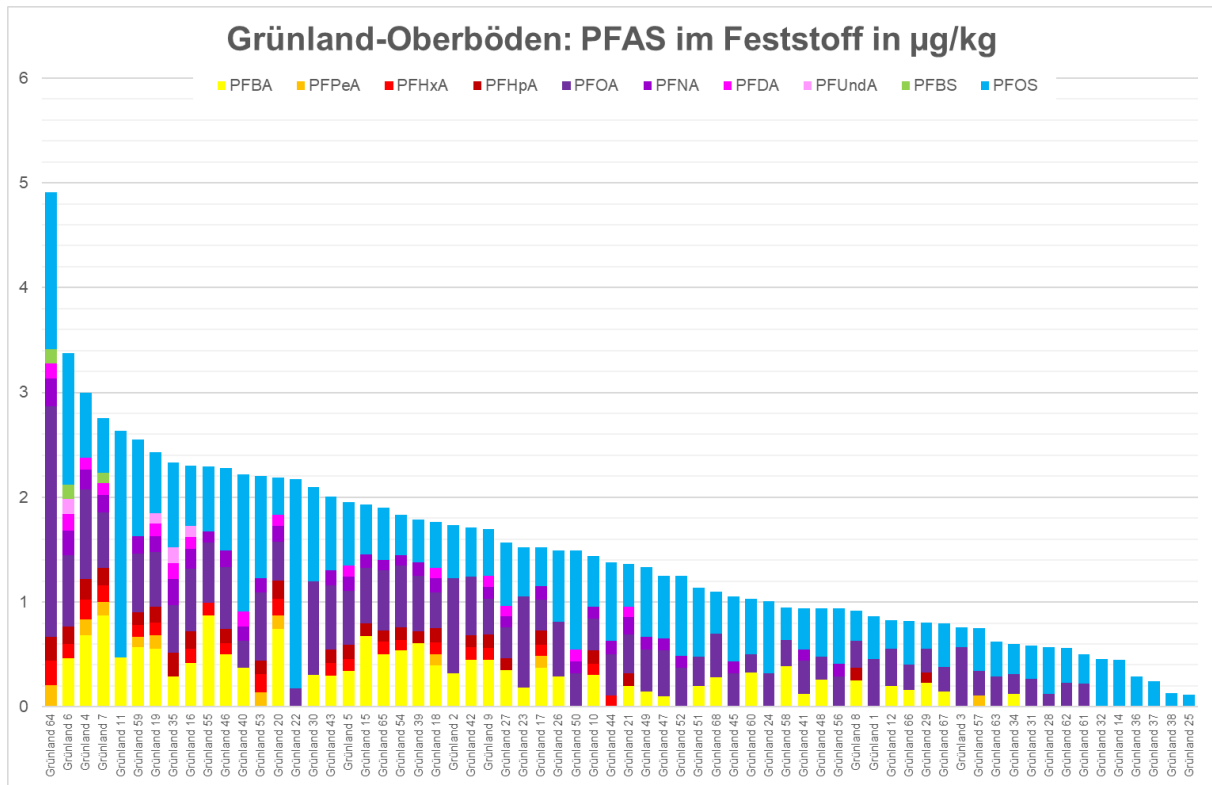


Abbildung 3: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Grünland-Oberböden im Feststoff

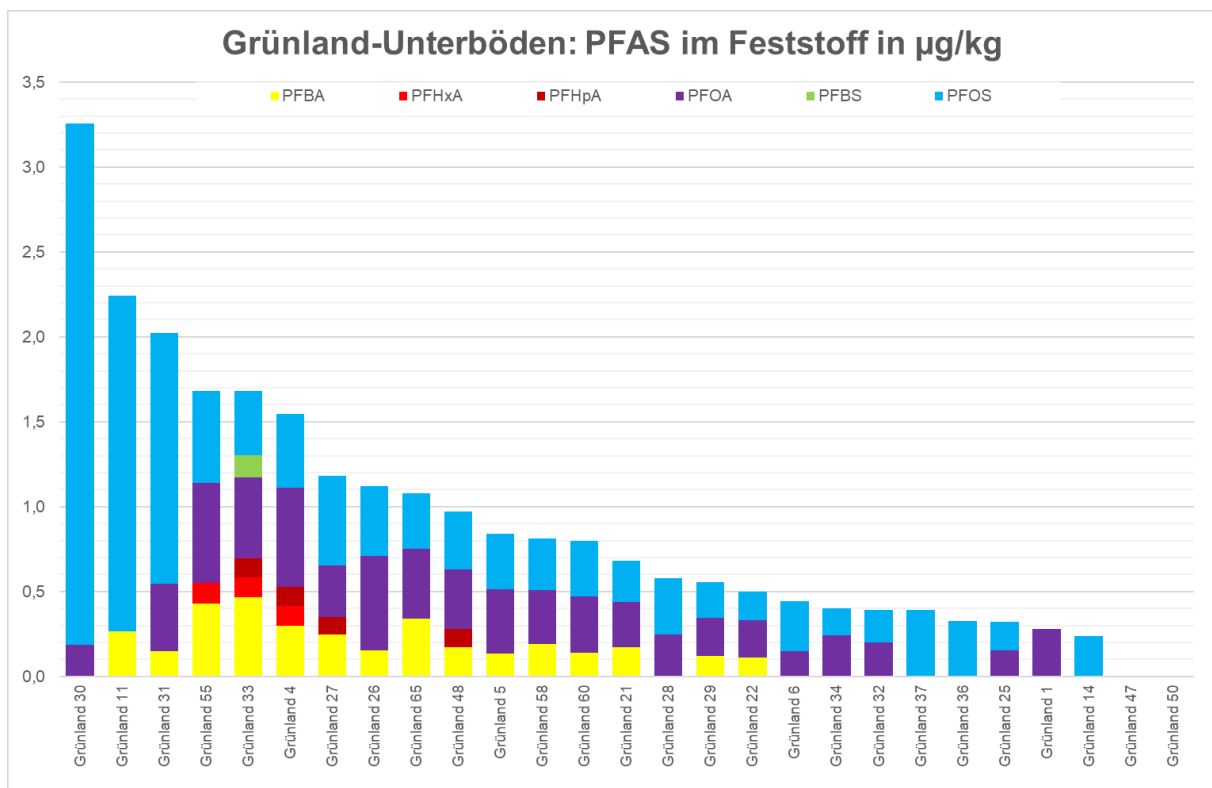


Abbildung 4: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Grünland-Unterböden im Feststoff

3.2 Böden unter Ackernutzung

Im Rahmen des Projektes wurden 107 Oberbodenproben unter Ackernutzung im Feststoff auf PFAS analysiert. Bei 102 von 107 Bodenproben wurde mindestens eine der untersuchten Einzelsubstanzen im Feststoff oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg detektiert. Die Gesamtgehalte liegen bei bis zu 7,63 µg/kg (Abbildung 5).

Unter Ackernutzung wurden, wie auch unter Grünlandnutzung (siehe Kapitel 3.1), die Einzelsubstanzen PFOS, PFOA und PFBA am häufigsten und in den höchsten Anteilen gemessen. Auch hier wurden bei höheren Gesamtgehalten weitere Carbonsäuren wie PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA und PFDA sowie in einer Bodenprobe auch PFDoA und PFTTrDA nachgewiesen. Die PFAS-Gehalte sind in den Oberböden unter Grünlandnutzung generell höher als unter Ackernutzung, was durch die abweichende Bearbeitung (Pflügen des Oberbodens unter Ackernutzung) und Probenahmetiefe (0-10 cm bei Grünland und 0-30 cm unter Ackernutzung) bei atmosphärischen Einträgen zu erwarten war. Auffällig ist neben dem bereits beschriebenen wiederkehrenden Muster aus PFBA, PFOA und PFOS in allen Bodenproben, der in einzelnen Bodenproben erhöhte PFOS-Gehalt.

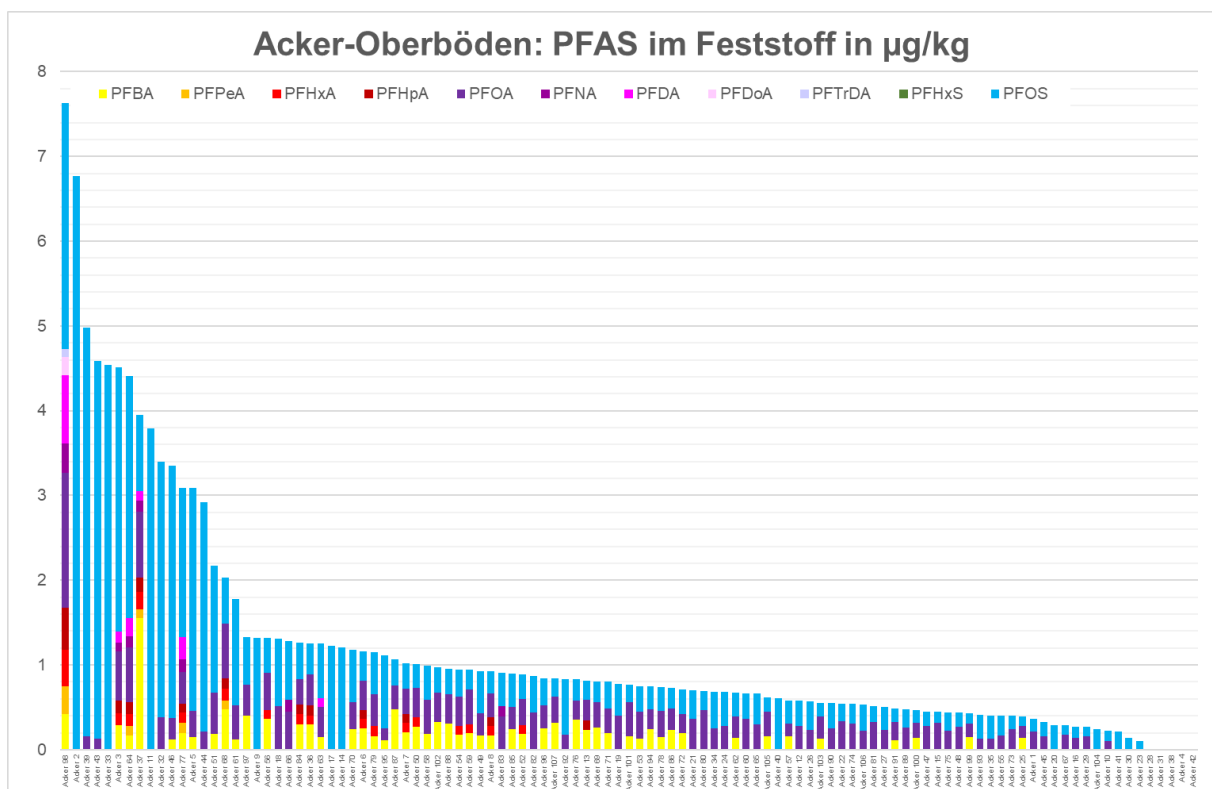


Abbildung 5: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Acker-Oberböden im Feststoff

Auf den Standorten unter Ackernutzung wurde an 40 Standorten eine Unterbodenprobe entnommen und auf PFAS im Feststoff analysiert. In 22 der 40 Bodenproben wurden PFAS oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg bis zu PFAS-Gesamtgehalten von 5,53 µg/kg gemessen (Abbildung 6). In den Unterbodenproben wurden ebenfalls vor allem PFOS, PFOA und PFBA gemessen. Wie auch unter Grünlandnutzung lagen die Konzentrationen in den Unterböden niedriger als in den Oberböden.

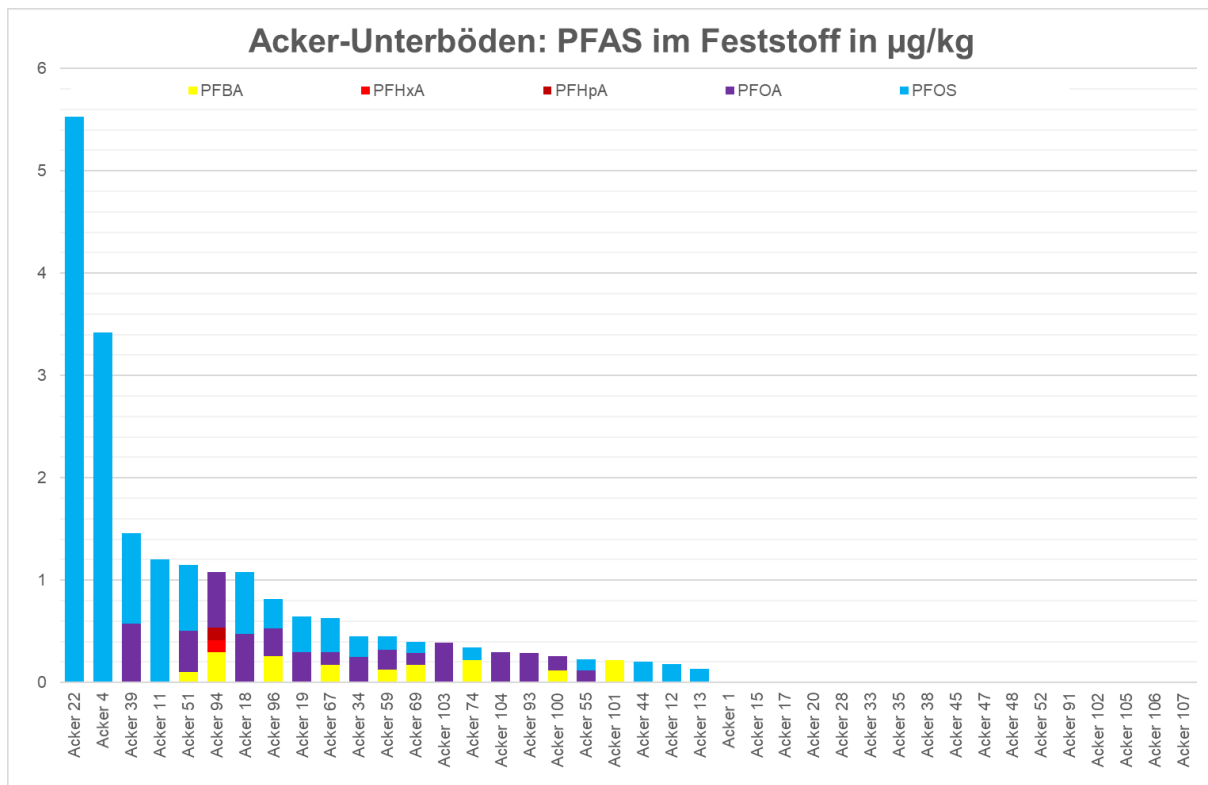


Abbildung 6: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Acker-Unterböden im Feststoff

3.3 Böden unter Waldnutzung

Im Rahmen des Projektes wurden 13 Oberbodenproben unter Waldnutzung im Feststoff auf PFAS analysiert. Die gemessenen Gesamtgehalte liegen zwischen 1,00 µg/kg und 10,82 µg/kg (Abbildung 7). Am häufigsten wurden PFOS und PFOA detektiert, bei höheren Gesamtgehalten wurden aber auch weitere Carbonsäuren wie PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA und PFDA sowie PFUnDA, PFDoA und PFTTrDA gemessen. Unter Waldnutzung wurden im Vergleich zu anderen Nutzungsformen deutlich häufiger und in höheren Konzentrationen weitere Sulfonsäuren wie PFBS, PFHxS und PFHpS nachgewiesen. Zusätzlich konnten die Ersatzstoffe bzw. Vorläufersubstanzen H4PFOS sowie PFOSA, PFOSAA, N-EtFOSA und N-EtFOSAA detektiert werden. Die PFAS-Gehalte in den Mineralböden sind unter Waldnutzung auch insgesamt höher als unter Grünland- oder Ackernutzung, was sich vermutlich durch den auch für andere Schadstoffe bekannten Auskämmeffekt des Waldes (siehe Kapitel 2) erklären lässt. Der Nachweis von höheren Gehalten an längererkettigen Carbonsäuren (PFNA bis PFTTrDA) sowie kürzererkettigen Sulfonsäuren (PFBS und PFHxS) und das weniger starke Vorkommen von PFBA könnte aber auch ein Hinweis auf andere Sorptionsmechanismen in Waldböden sein.

Auf allen 13 Standorten unter Waldnutzung wurden Unterbodenproben entnommen und auf PFAS analysiert. In allen Bodenproben wurden PFAS oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen. Die Gesamtgehalte erreichten Summenwerte von 0,11 bis 3,40 µg/kg (Abbildung 8) und liegen somit wie auch unter den anderen Nutzungsarten niedriger als in den Oberböden. In den Unterbodenproben wurde in allen Messungen PFOA festgestellt, häufig sind auch PFOS, PFBA sowie teilweise PFBS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFNA und PFBS nachgewiesen worden.

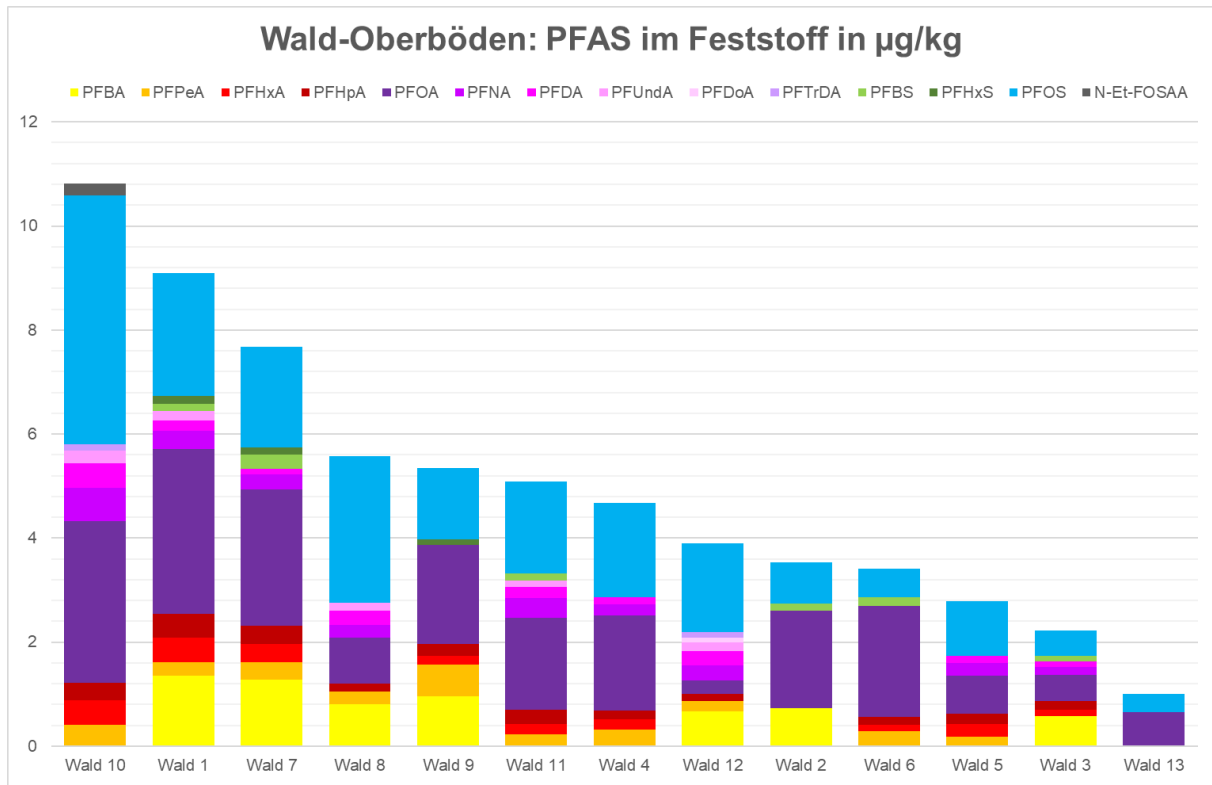


Abbildung 7: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Wald-Oberböden im Feststoff

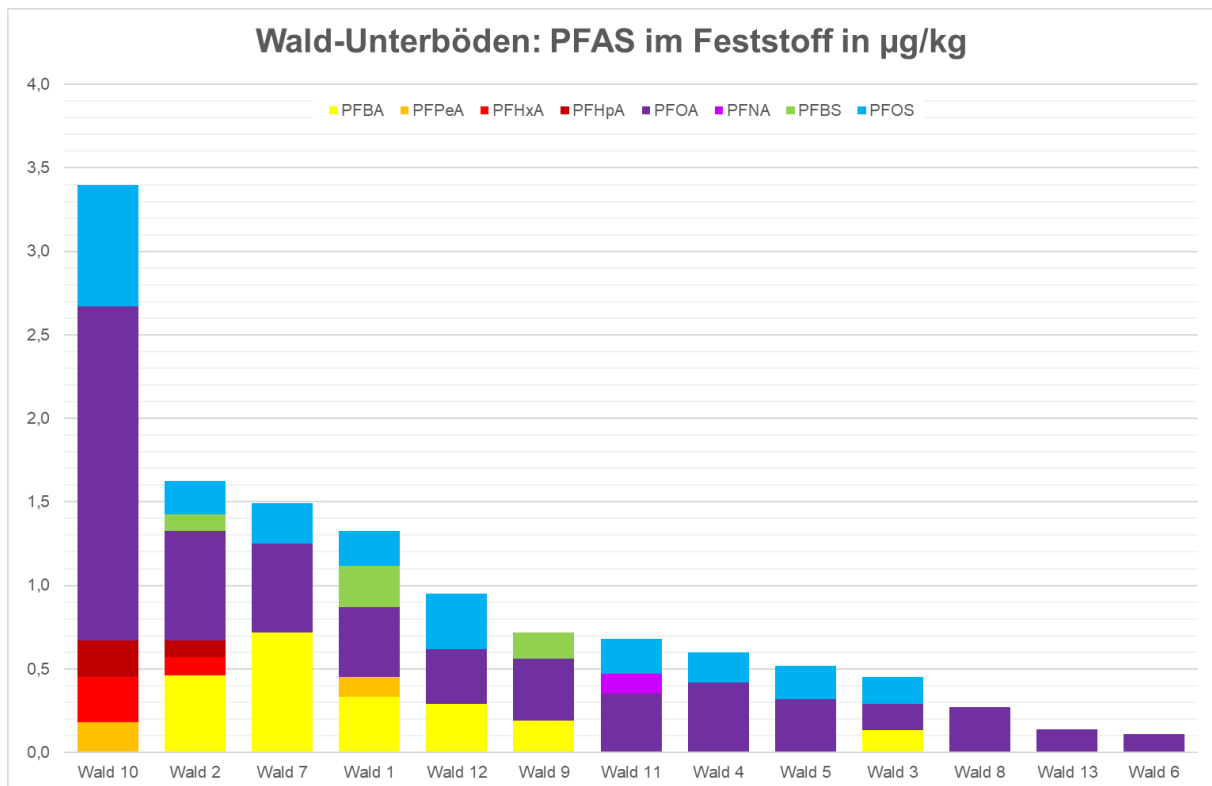


Abbildung 8: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Wald-Unterböden im Feststoff

Unter Waldnutzung wurde zusätzlich die Auflage auf PFAS untersucht (bis auf Mull und mullartigen Moder). Vorhandene L-Of-Horizonte wurden gemeinsam untersucht, Oh-Horizonte wurden separat analysiert. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Waldauflagen deutlich abweichende Trockenrohdichten im Gegensatz zu den Mineralböden haben und die Konzentrationen so nicht direkt vergleichbar sind.

In den L-Of-Horizonten wurden PFAS-Gesamtgehalte von 1,12 bis 11,50 µg/kg gemessen, in den darunterliegenden Oh-Horizonten von 7,52 bis 31,24 µg/kg (Abbildung 9). Auffällig ist neben den häufig und in höheren Konzentrationen gemessenen Einzelsubstanzen PFOA und PFOS insbesondere der verstärkte Nachweis von längererkettigen Carbonsäuren (PFNA bis PFTTrDA) sowie kürzerkettigen Sulfonsäuren (PFBS, PFHxS und PFPeS) und Vorläufersubstanzen (H4PFOS, PFOSA, PFOSAA, N-EtFOSA, und N-Et-FOSAA).

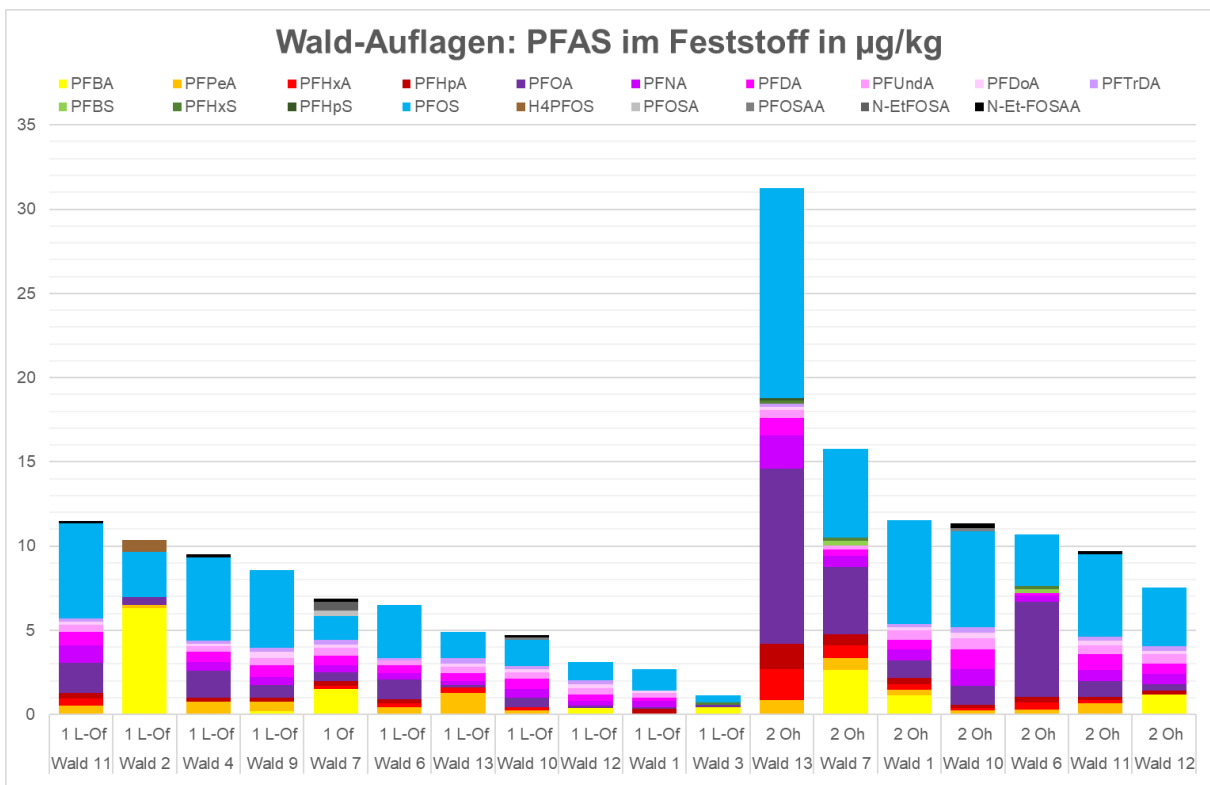


Abbildung 9: PFAS-Gehalte (µg/kg) in Wald-Auflagen (L-Of und Oh) im Feststoff

4 Untersuchungsergebnisse zu PFAS-Eluatgehalten

Die Ergebnisse zu den PFAS-Eluatuntersuchungen der Böden in ländlichen Gebieten in NRW werden differenziert nach Nutzungsart und Bodenhorizonten im Folgenden dargestellt. Bei den in diesem Kapitel dargestellten Werten handelt es sich um den unbereinigten Datensatz, aus dem später für die statistische Ableitung der Hintergrundwerte noch Ausreißer entfernt wurden. Um die Lesbarkeit der Abbildungen zu verbessern, werden jeweils nur die Einzelparameter in der Legende dargestellt, für die es Befunde oberhalb der Bestimmungsgrenze gab. Alle Bodenproben wurden auf die in Tabelle 2 angegebenen Einzelparameter untersucht. Für die in diesem Kapitel zur Beschreibung der Hintergrundgehalte verwendeten Gesamtgehaltssummen wurden Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze mit dem Wert „Null“ in der Summenbildung gewertet.

4.1 Böden unter Grünlandnutzung

Im Rahmen des Projektes wurden 68 Oberbodenproben unter Grünlandnutzung im 2:1-Eluat auf PFAS analysiert. Die gemessenen PFAS-Summenkonzentrationen liegen zwischen 121 und 802 bzw. 1.848 ng/L. Auf die Darstellung eines offensichtlichen Ausreißers (1.848 ng/L) wurde zugunsten der besseren Lesbarkeit verzichtet (siehe Abbildung 10 und Anhang 5).

Unter Grünlandnutzung wurden im Eluat vorwiegend die kurzkettigen Carbonsäuren bis PFOA nachgewiesen. Längerkettige Carbonsäuren wie PFNA und PFDA sowie die Sulfonsäuren PFBS, PFPeS, PFHxS und PFHpS wurden nur in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen. Die im Feststoff in hohen Anteilen messbare langkettige Sulfonsäure PFOS ist aufgrund ihrer guten Sorptionseigenschaften (siehe Anhang 1) im Eluat nur in deutlich geringeren Anteilen messbar. Auffällig ist neben dem wiederkehrenden Muster der Einzelsubstanzen das Vorkommen der neueren Ersatzstoffe H4PFOS (bis 5 ng/L), HFPO-DA (bis 6 ng/L) und DONA (bis 106 ng/L) in einigen Bodeneluat.

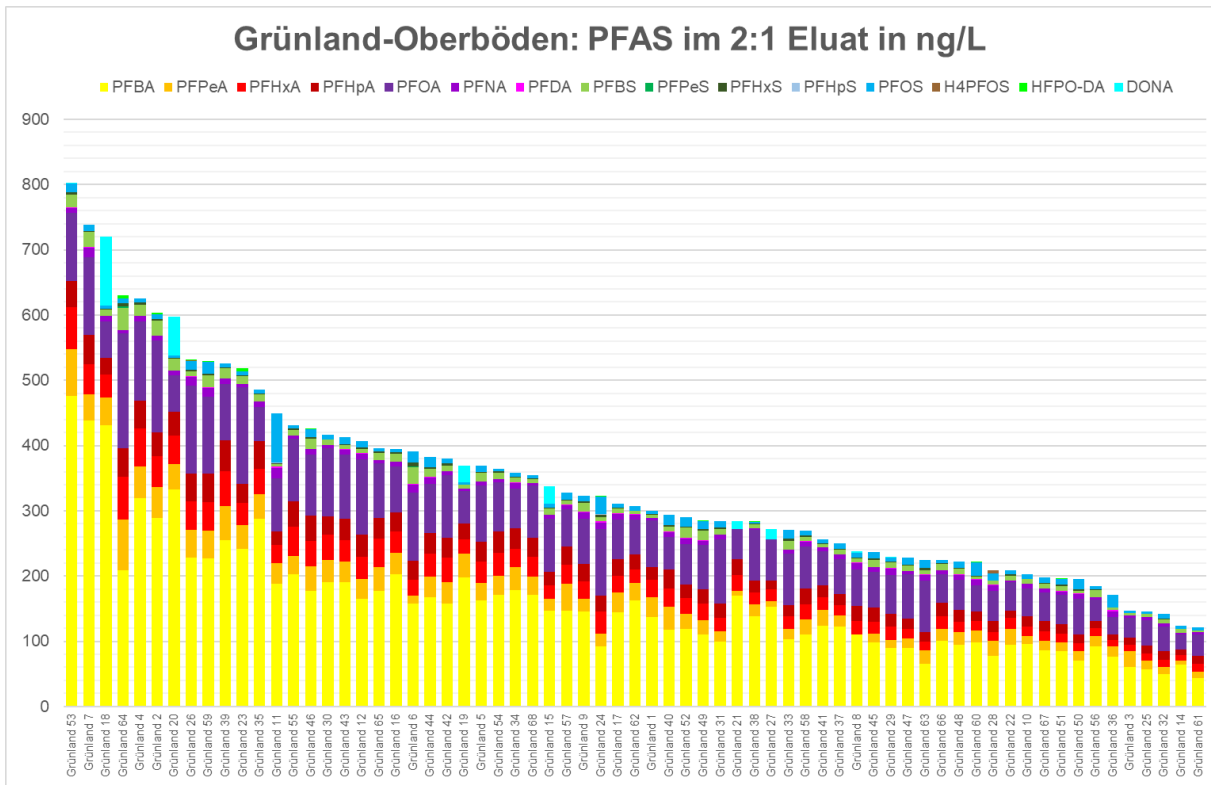


Abbildung 10: PFAS-Gehalte (ng/L) in Grünland-Oberböden im 2:1 Eluat

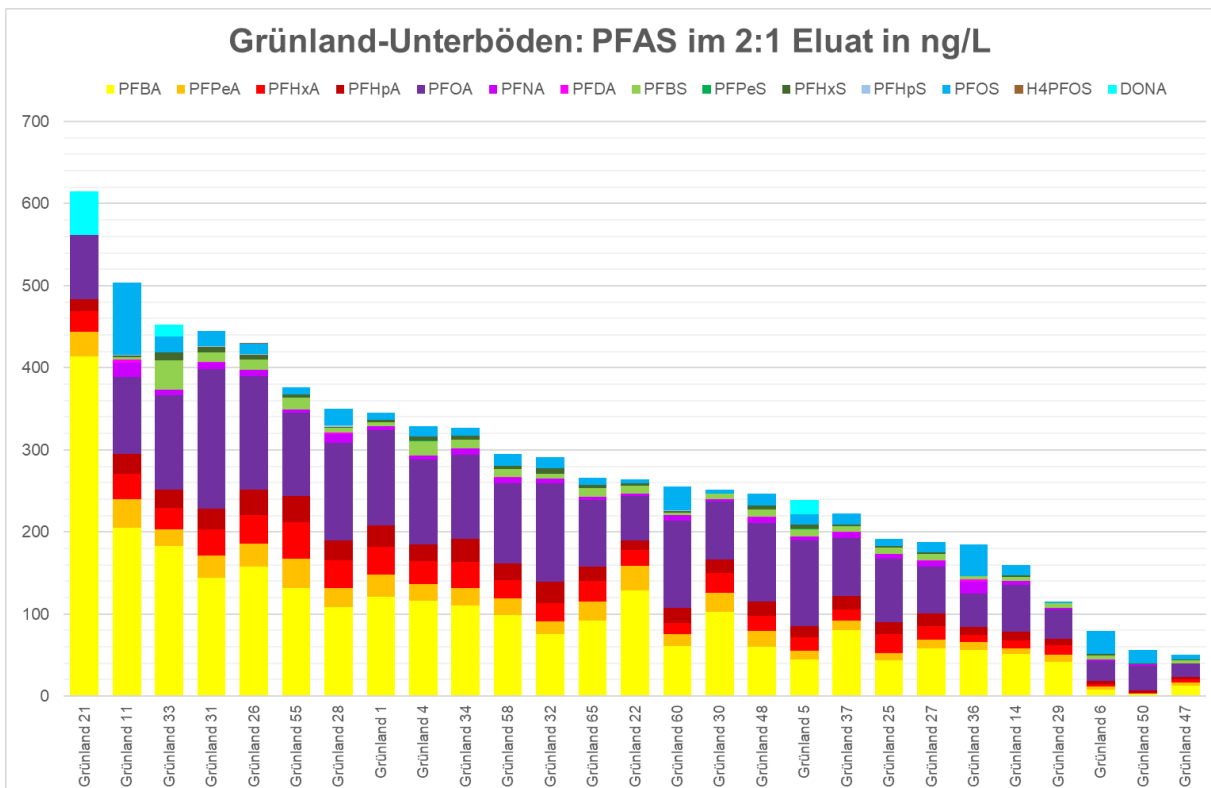


Abbildung 11: PFAS-Gehalte (ng/L) in Grünland-Unterböden im 2:1 Eluat

Auf den Standorten unter Grünlandnutzung wurden an 27 Standorten auch Unterbodenproben entnommen und auf PFAS im 2:1-Eluat analysiert. Die gemessenen PFAS-Summenkonzentrationen liegen zwischen 50 und 615 ng/L (Abbildung 11). Auch hier lässt sich das oben beschriebene Verteilungsmuster der PFAS deutlich erkennen. Die Ersatzstoffe H4PFOS (bis 1 ng/L) und DONA (bis 53 ng/L) wurden ebenfalls nachgewiesen.

4.2 Böden unter Ackernutzung

Im Rahmen des Projektes wurden 95 Oberbodenproben unter Ackernutzung im 2:1-Eluat auf PFAS analysiert. Die gemessenen PFAS-Summenkonzentrationen liegen zwischen 92 und 626 ng/L (Abbildung 12).

Auch unter Ackernutzung wurden vorwiegend kurzkettige Carbonsäuren bis PFOA nachgewiesen. Längerkettige Carbonsäuren wie PFNA, PFDA und PFUnDA sowie die Sulfonsäuren PFBS, PFPeS, PFHxS und PFHpS wurden nur in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen. Die im Feststoff in hohen Anteilen messbare langkettige Sulfonsäure PFOS ist auch unter Ackernutzung aufgrund ihrer guten Sorptionseigenschaften im Eluat nur in deutlich geringeren Anteilen messbar. Auffällig ist neben dem wiederkehrenden Muster der Einzelsubstanzen das Vorkommen der Ersatzstoffe H4PFOS (bis 2 ng/L), HFPO-DA (bis 5 ng/L) und DONA (bis 21 ng/L) in einigen Bodeneluaten.

Auf den Standorten unter Ackernutzung wurde an 31 Standorten auch eine Unterbodenprobe entnommen und auf PFAS im 2:1-Eluat analysiert. Die gemessenen PFAS-Summenkonzentrationen liegen zwischen 36 und 571 ng/L (Abbildung 13). Auch hier lässt sich das oben beschriebene Verteilungsmuster der PFAS deutlich erkennen.

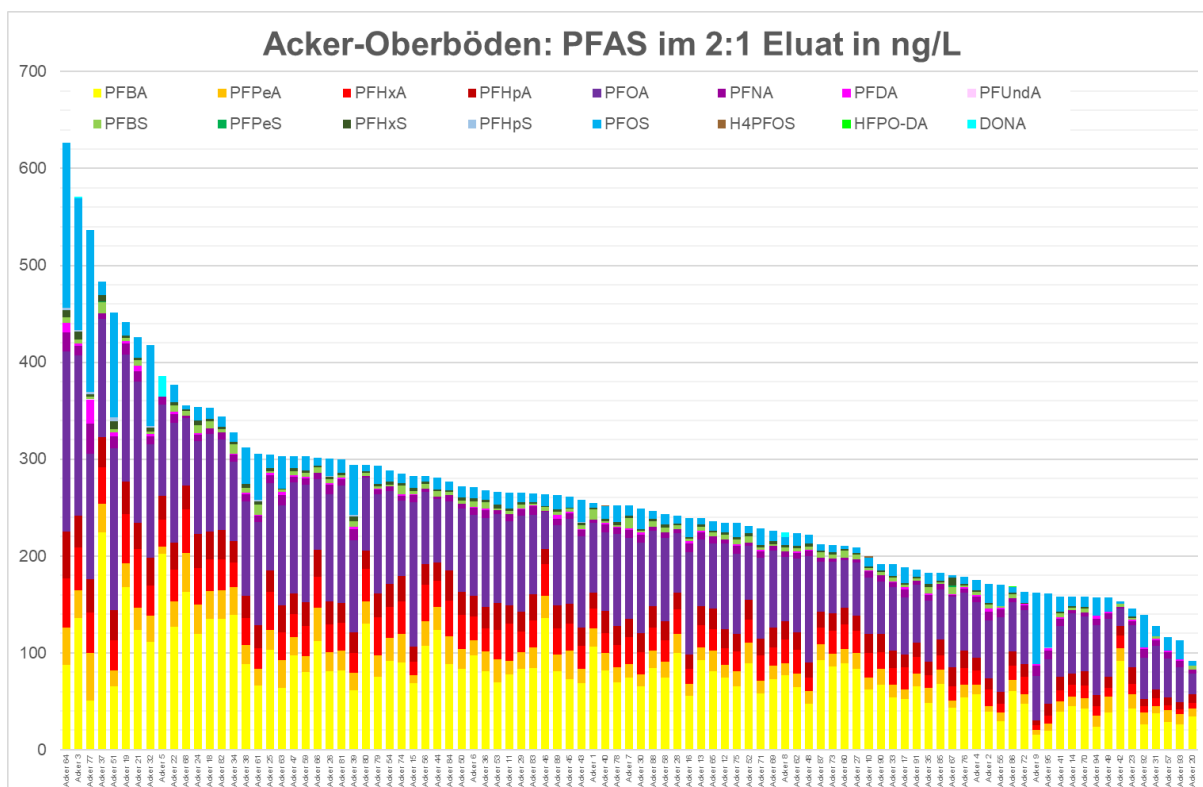


Abbildung 12: PFAS-Gehalte (ng/L) in Acker-Oberböden im 2:1 Eluat

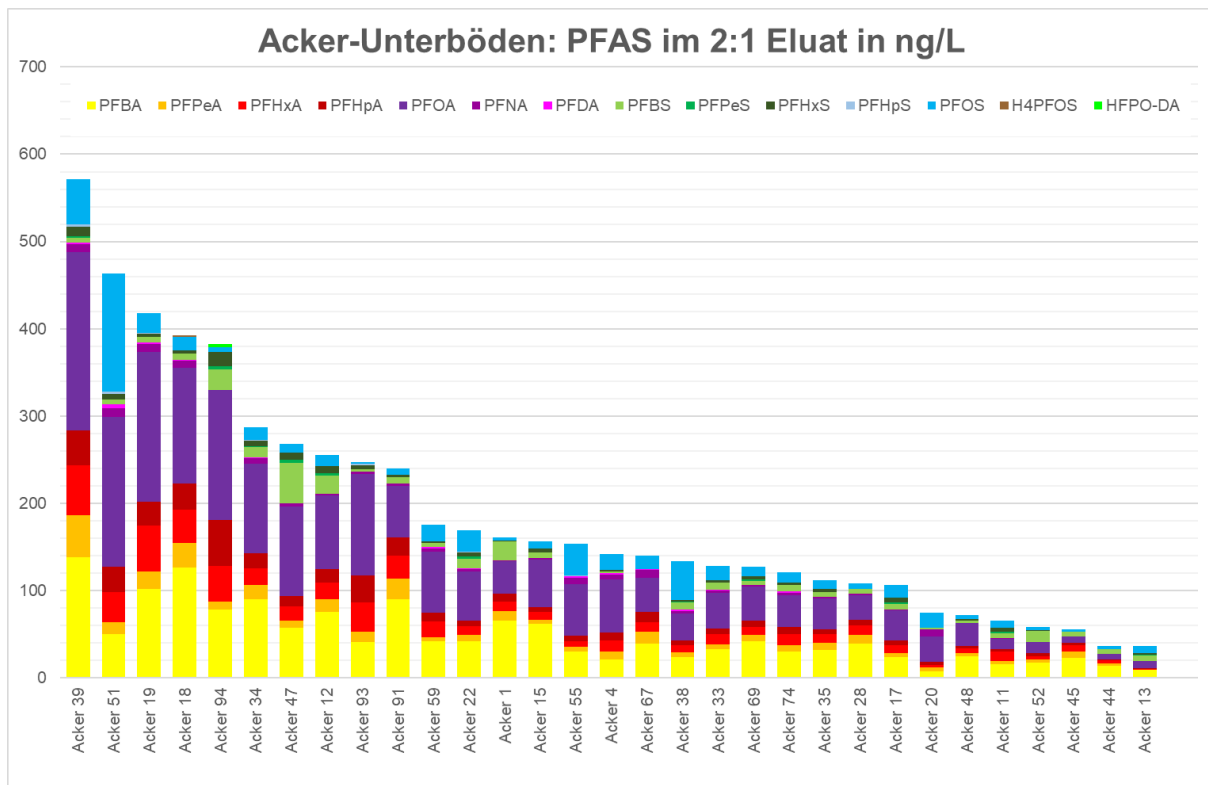


Abbildung 13: PFAS-Gehalte (ng/L) in Acker-Unterböden im 2:1 Eluat

4.3 Böden unter Waldnutzung

Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen der Oberböden unter Waldnutzung sind in Abbildung 14 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass ein Teil der Bodenproben mit einem Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1 eluiert wurde und ein anderer Teil der Bodenproben mit einem Wasser-Feststoffverhältnis von 10:1 untersucht wurde. Grund dafür ist, dass bei diesen Bodenproben die Befürchtung bestand, dass eine Elution im W/F-Verhältnis 2:1 dazu führen könnte, dass zu wenig Wasser für die Analytik der wässrigen Phase zurückbleiben würde. Dementsprechend sind die Konzentrationen und die Verteilung der Einzelsubstanzen nicht direkt miteinander vergleichbar. Im 2:1-Eluat der Oberböden waren in der Summe zwischen 270 und 997 ng/L PFAS nachweisbar in den 10:1-Eluaten zwischen 267 und 632 ng/L. Dominierend sind hier insbesondere die Carbonsäuren bis PFOA. Auffällig ist der relativ hohe Anteil PFBS in der 10:1-Eluatprobe des Standortes Wald 4. Der Nachweis der zwei neueren Ersatzprodukte HFPO-DA (Gen X) und DONA (ADONA) erfolgte in fast allen Oberboden-Eluaten. HFPO-DA ist im 2:1-Eluat in 7 von 8 Bodenproben in Konzentrationen bis 10 ng/L und im 10:1-Eluat in 4 von 4 Bodenproben bis 2,1 ng/L nachgewiesen worden.

Im 2:1-Eluat der Unterböden (Abbildung 15) waren in der Summe zwischen 62 und 621 ng/L PFAS nachweisbar. Dominierend sind hier ebenfalls insbesondere die Carbonsäuren bis PFOA, allerdings sind auch kürzerkettige Sulfonsäuren nachweisbar. Der Ersatzstoff HFPO-DA ist auch in 9 von 13 Unterböden in Konzentrationen bis 6 ng/L nachweisbar.

Im 10:1-Eluat der Auflagen (Abbildung 16) waren in der Summe zwischen 25 und 950 ng/L PFAS nachweisbar. Hauptsächlich sind hier ebenfalls die Carbonsäuren bis PFOA detektierbar. Auffällig ist der hohe Anteil von PFBS in den Auflagen des Waldstandortes 4. Der Ersatzstoff HFPO-DA ist in 3 von 18 Auflagen in Konzentrationen bis 1 ng/L nachweisbar.

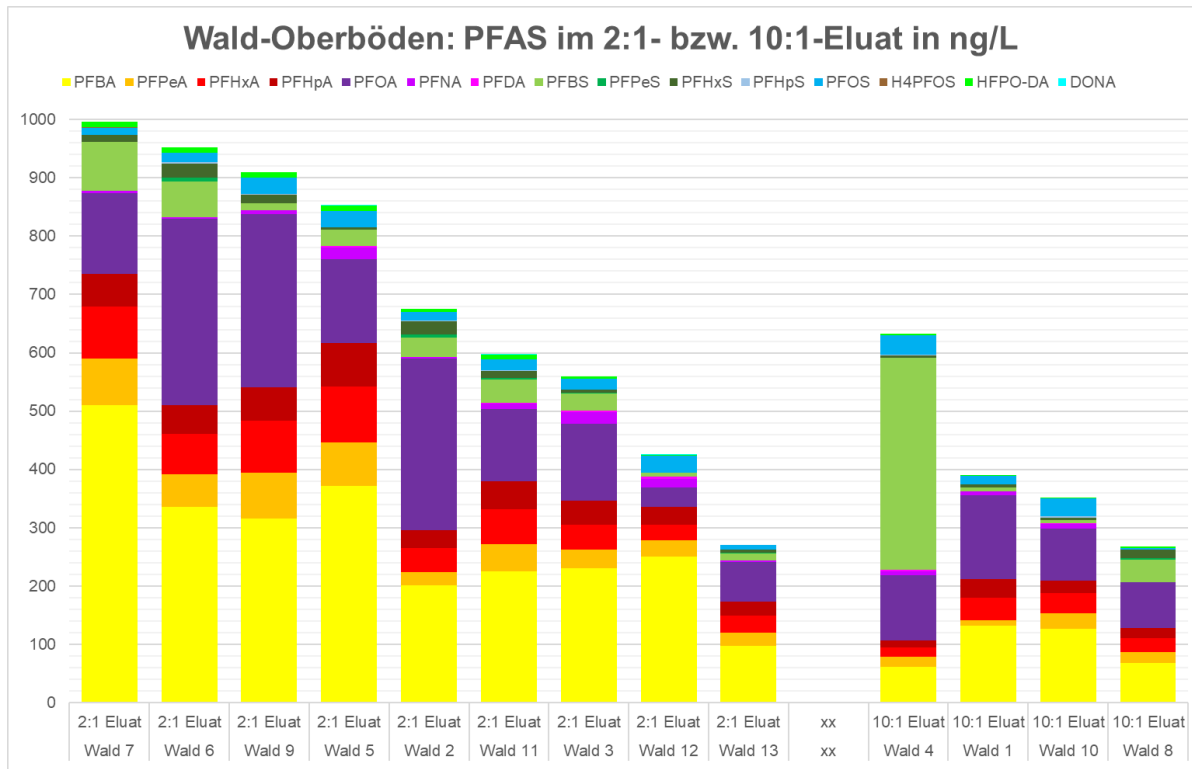


Abbildung 14: PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Oberböden im 2:1 bzw. 10:1 Eluat

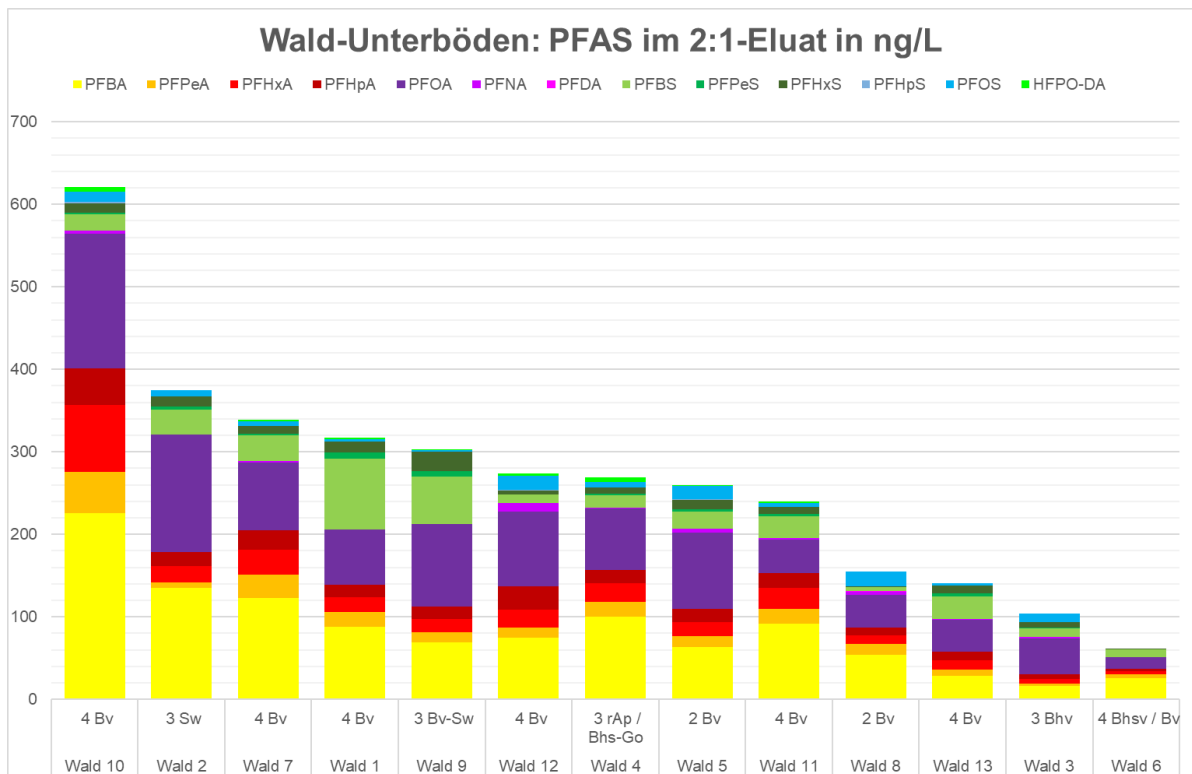


Abbildung 15: PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Unterböden im 2:1 Eluat

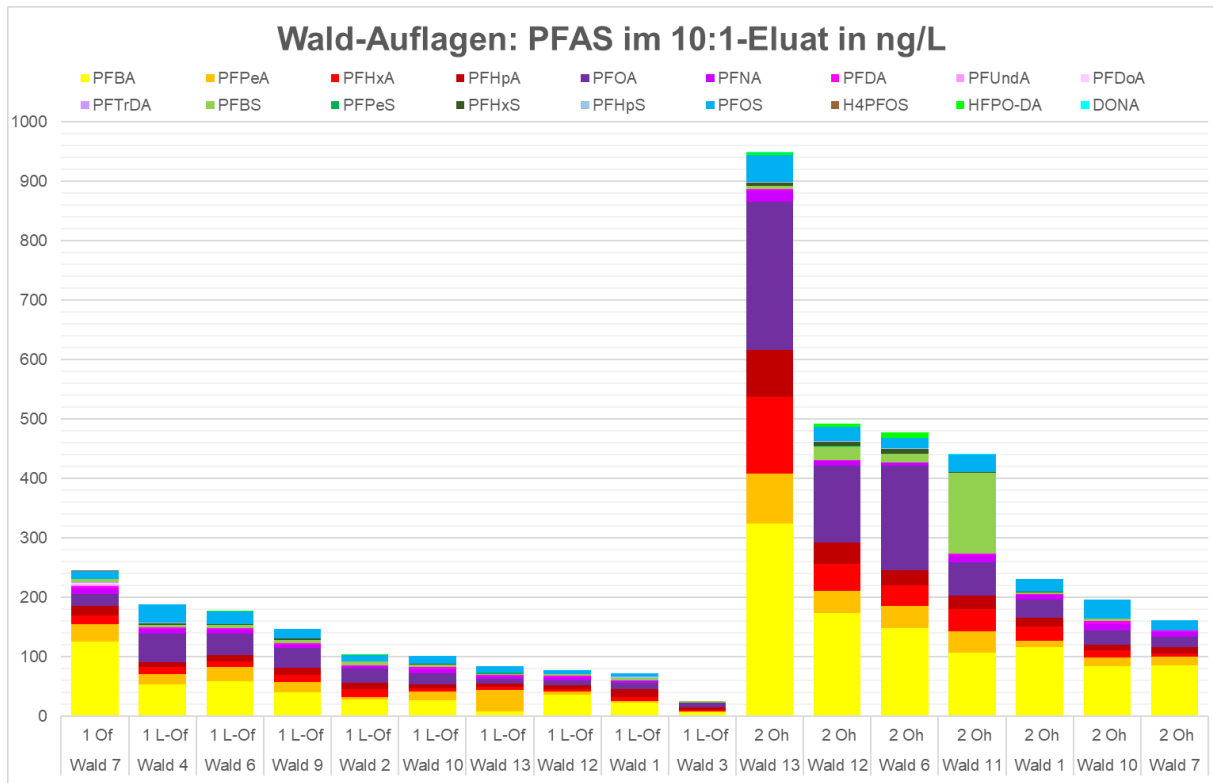


Abbildung 16: PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Auflagen (L-Of und Oh) im 10:1 Eluat

5 Untersuchungsergebnisse zum Vorkommen weiterer PFAS in Böden

Ergänzend zum Standarduntersuchungsprogramm (siehe Kapitel 2) wurden an ausgewählten Bodenproben zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. In Stichproben sollte das Vorkommen verschiedener weiterer PFAS (siehe Kapitel 5.1), ultrakurzkettiger PFAS (siehe Kapitel 5.2) und Vorläufersubstanzen (siehe Kapitel 5.3) geprüft werden.

5.1 Untersuchungen auf weitere PFAS

Eine Stichprobe von 17 Oberbodenproben (9 Acker-, 6 Grünland- und 2 Waldstandorte) wurde auf den in Tabelle 3 dargestellten, erweiterten PFAS-Untersuchungsumfang im Feststoff untersucht. Hierbei lagen alle Messungen auf die Einzelverbindungen 6:2 diPAP, 8:2 diPAP, 6:6-PFPiA, 6:8-PFPiA, 8:8-PFPiA, PFUnDS, PFDoDS und PFTrDS unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,5 µg/kg (siehe Anhang 6).

5.2 Untersuchungen auf ultrakurzkettige PFAS

Um exemplarisch das Vorhandensein von ultrakurzkettigen PFAS im Feststoff zu testen, wurden 32 ausgewählte Bodenproben auf Trifluoressigsäure (TFA) und Perfluorpropansäure (PFPrA) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 17 dargestellt. In allen untersuchten Oberbodenproben wurde TFA nachgewiesen, in 23 von 32 Oberböden wurden PFPrA-Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg nachgewiesen. Unter Ackernutzung wurden in den Oberböden TFA-Konzentrationen von 0,2 bis 4,5 µg/kg nachgewiesen, unter Grünlandnutzung zwischen 0,6 und 4,5 µg/kg und unter Waldnutzung zwischen 5,1 und 30,0 µg/kg. PFPrA war in den Oberböden unter Ackernutzung in Konzentrationen von kleiner der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/kg bis 0,4 µg/kg, unter Grünlandnutzung von kleiner der Bestimmungsgrenze bis 1,2 µg/kg und unter Waldnutzung von 0,5 bis 3,9 µg/kg messbar.

Zusätzlich wurden acht ausgewählte 2:1-Eluate auf TFA und PFPrA untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 18 dargestellt. In allen untersuchten Eluaten konnten TFA und PFPrA oberhalb der Bestimmungsgrenze von 50 bzw. 10 ng/L nachgewiesen werden. In den Eluaten der Oberböden wurden TFA-Konzentrationen von 440 bis 3.900 ng/L und PFPrA-Konzentrationen von 34 bis 280 ng/L nachgewiesen.

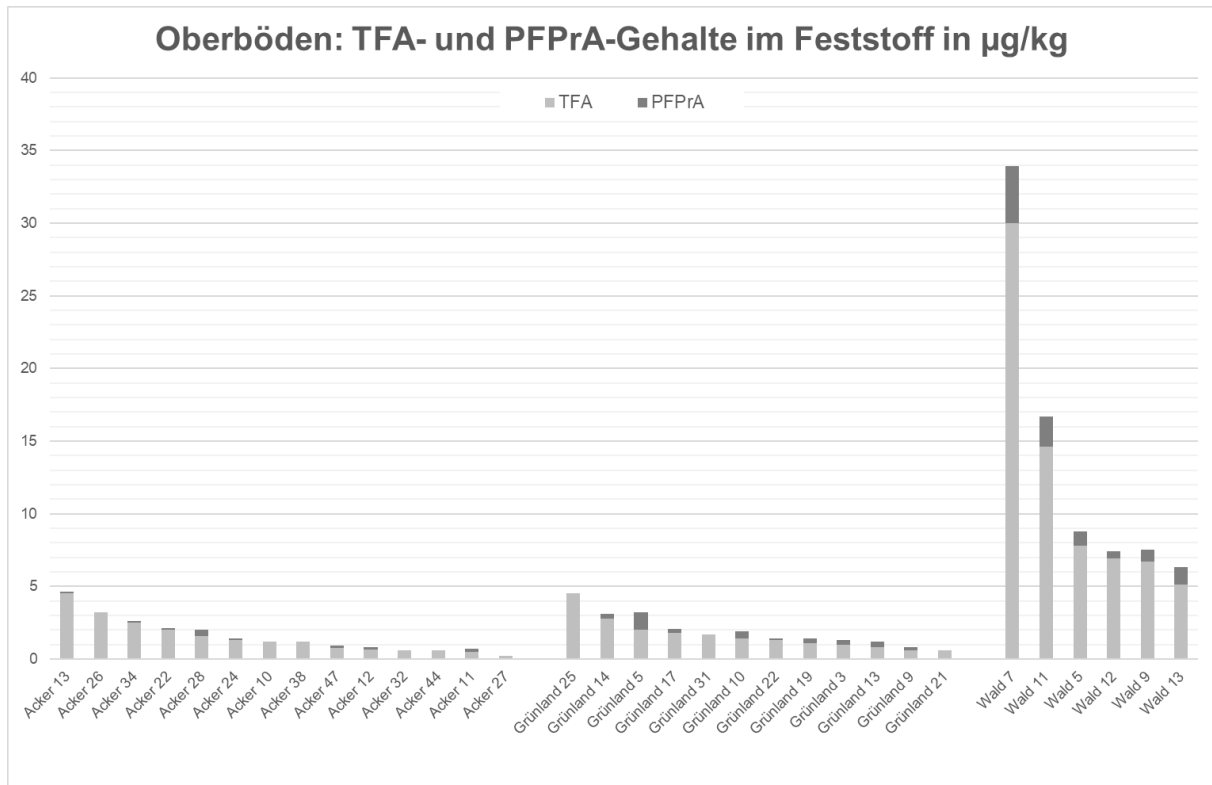


Abbildung 17: TFA- und PFPrA-Gehalte (µg/kg) von Oberbodenproben im Feststoff

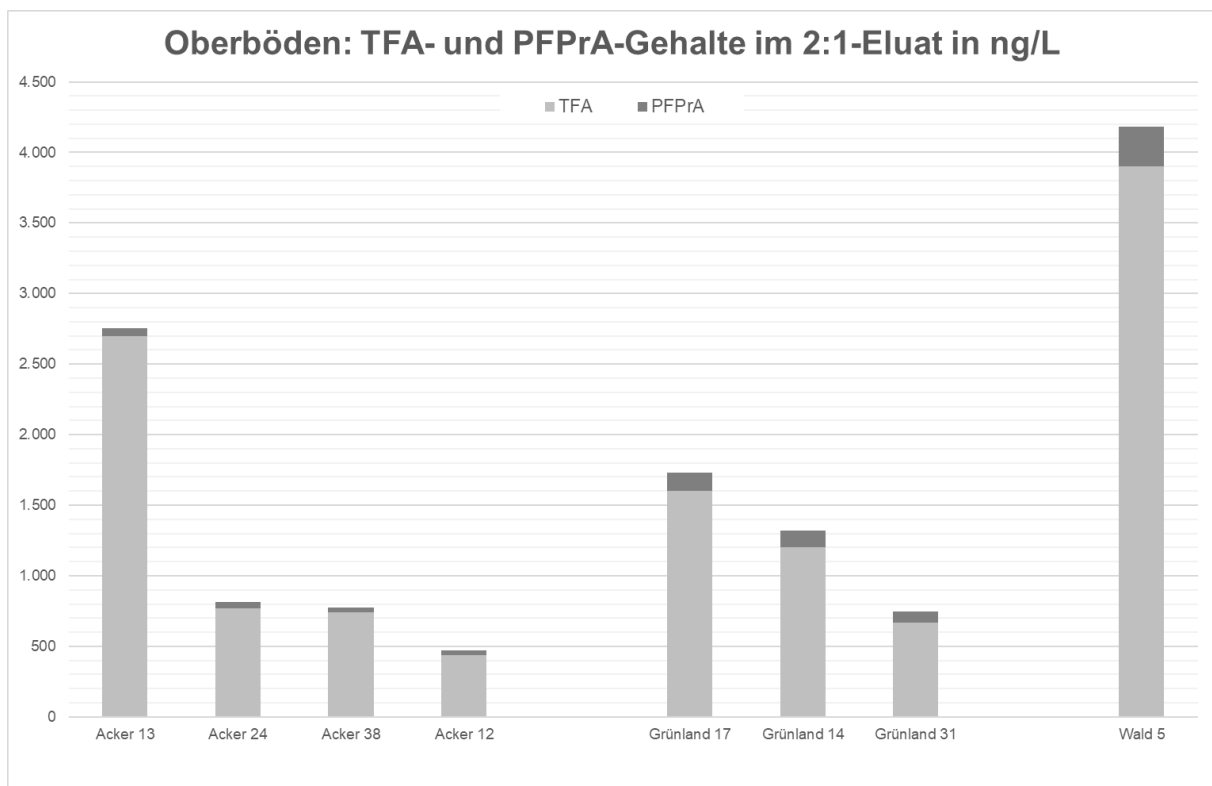


Abbildung 18: TFA- und PFPrA-Gehalte (ng/L) im 2:1 Eluat von verschiedenen Oberböden

5.3 Untersuchungen auf Vorläufersubstanzen mittels TOP-Assay

Es gibt verschiedene Verfahren um zu untersuchen, ob in Bodenproben oder Bodeneluaten polyfluorierte Verbindungen (sogenannte Vorläuferverbindungen oder Precursor) vorhanden sind. Neben dem AOF, in welchem adsorbierbare organische Fluorverbindungen gemessen werden, ist der TOP-Assay (Total Oxidizable Precursor) mittlerweile etabliert. Im TOP-Assay-Verfahren werden unbekannte Vorläuferverbindungen zu bekannten perfluorierten Carbonsäuren chemisch oxidiert (Methodik siehe Kapitel 2). Ein Vergleich der messbaren perfluorierten Carbonsäuren in der unbehandelten und behandelten Probe zeigt die vorhandene Menge an Vorläuferverbindungen an. Es ist zu beachten, dass es PFAS gibt, die nicht oxidiert werden können und dem TOP-Assay-Verfahren nicht zugänglich sind. Dementsprechend werden diese Verbindungen nicht als Precursor (Vorläufer), sondern Non-Precursor-Verbindungen bezeichnet (Beispiel: HFPO-DA bzw. Gen X). Der TOP-Assay kann auf Methanolextrakte der Feststoffproben oder auf wässrige Eluate von Bodenproben angewendet werden. Folglich können, je nach vorherigem Extraktionsschritt, im Eluat nur Hinweise auf bereits wasserlösliche Vorläufer gefunden werden, während bei der Extraktion mit Methanol auch methanollösliche Vorläufer detektierbar sind (HELD & REINHARD 2020).

Um Hinweise auf wasserlösliche Vorläufersubstanzen zu ermitteln, wurde für acht exemplarisch ausgesuchte Bodenproben das 2:1 Eluat mittels TOP-Assay untersucht. Der Vergleich (Abbildung 19) der Ergebnisse von vier Acker-, drei Grünland- und einem Waldstandort zeigten keine Hinweise auf wasserlösliche Vorläufersubstanzen in den Bodeneluaten, da die Fluormengen in den Eluaten nach dem TOP-Assay in ähnlich hoch sind wie vor dem TOP-Assay. Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass die ultrakurzkettigen Carbonsäuren TFA und PFPrA nach der Oxidation aufgrund von Matrixstörungen nicht untersucht werden konnten und somit nicht auszuschließen ist, dass sich diese Einzelverbindungen gebildet haben.

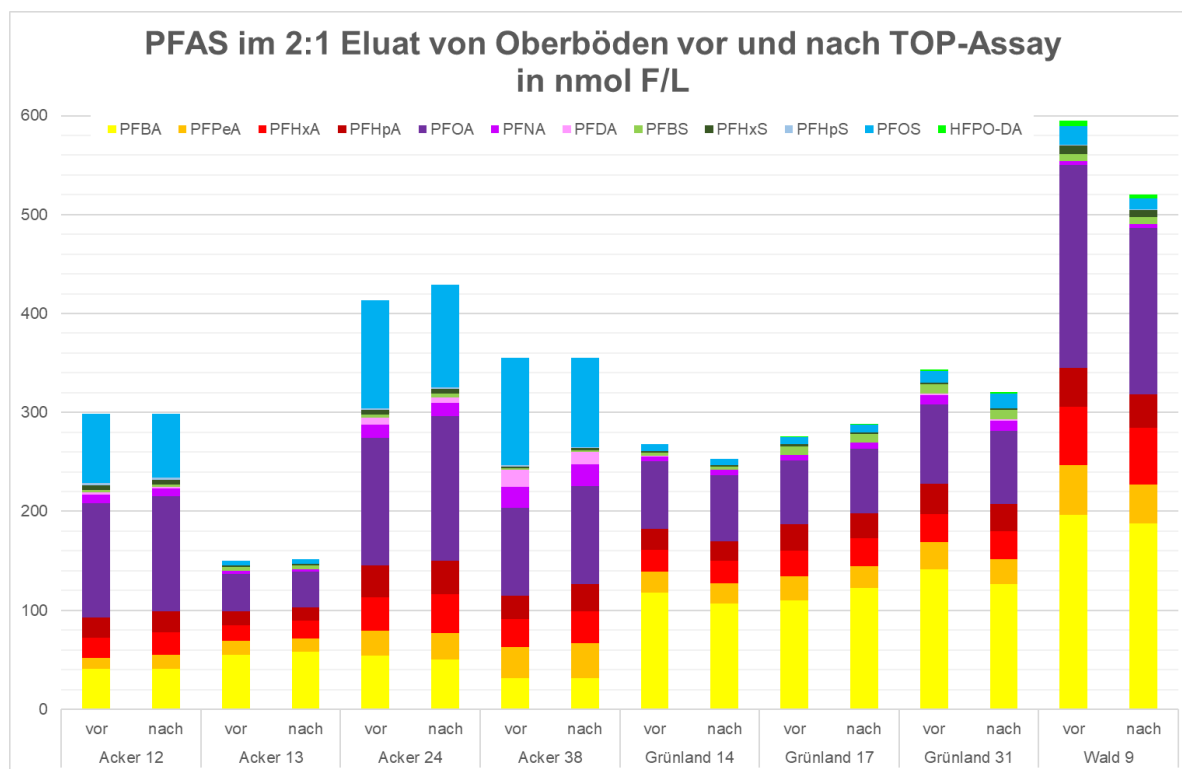


Abbildung 19: PFAS (nmol F/L) im 2:1 Eluat ausgesuchter Oberböden vor und nach TOP-Assay

Um Hinweise auf wasserunlösliche Vorläufersubstanzen zu ermitteln, wurde für 32 exemplarisch ausgesuchten Bodenproben auch der Methanolextrakt der Feststoffproben mittels TOP-Assay untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung der 14 Acker-, 12 Grünland- und sechs Waldstandorte sind in Abbildung 20 dargestellt. Im methanolischen Extrakt der Feststoffproben konnten auch nach der Oxidation die ultrakurzkettigen Carbonsäuren TFA und PFPrA gemessen werden, so dass hier ein vollständigerer Vergleich vor und nach Oxidation möglich ist.

Durch die Untersuchungen lassen sich in fast allen Bodenproben Hinweise auf wasserunlösliche Vorläufersubstanzen nachweisen, da die Fluormengen nach der Oxidation in den meisten Fällen höher waren als vor der Oxidation. Durch die Oxidation entstanden Carbonsäuren wie PFBA, PFPeA, PFHxA und PFOA, aber auch ultrakurzkettige PFAS wie TFA und PFPrA. In den Ackerflächen 12 und 34 wurden verhältnismäßig große Mengen TFA nach der Oxidation gemessen, was auf größere Mengen an TFA-Vorläufern in diesen Bodenproben hinweisen könnte.

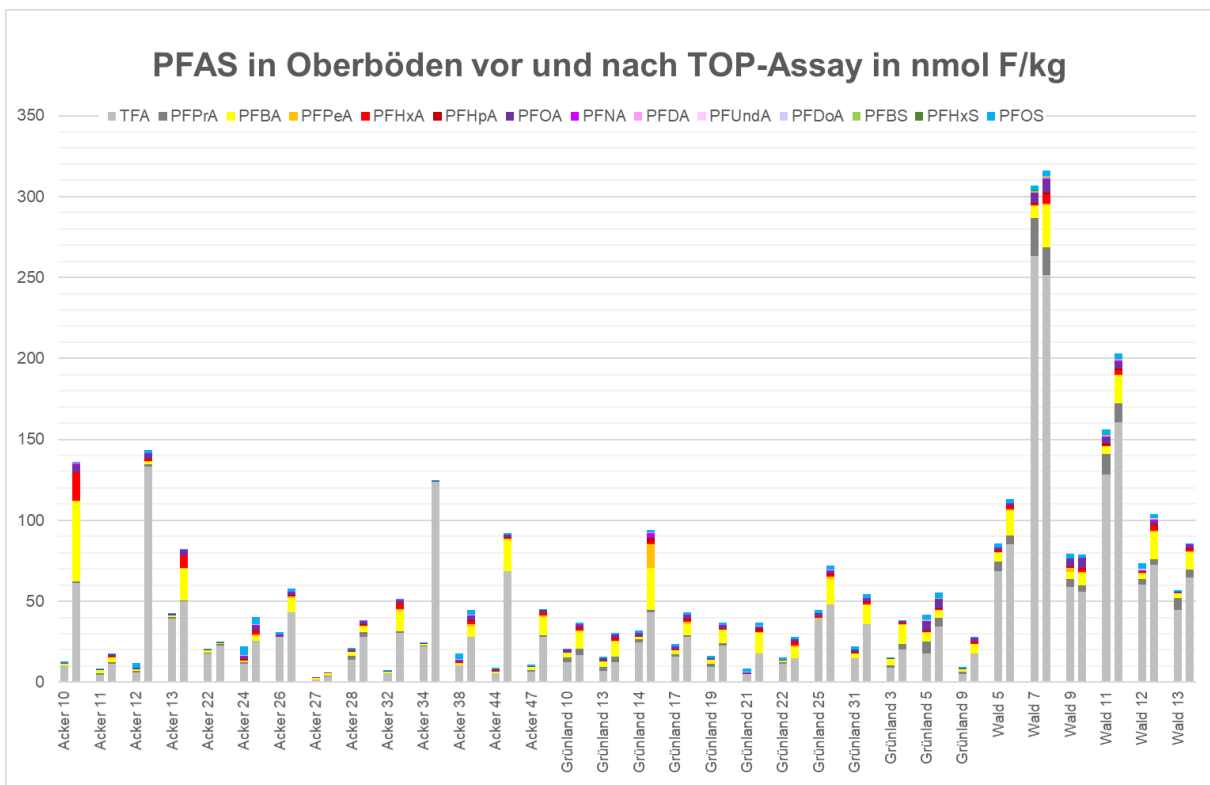


Abbildung 20: PFAS (nmol F/kg) im Methanolextrakt ausgesuchter Oberböden vor und nach TOP-Assay

6 Hintergrundwerte von PFAS

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen (Methodik siehe Kapitel 2.4) der Hintergrundwerte für PFAS im Feststoff und 2:1 Eluat der Böden ländlicher Gebiete in NRW unter Grünland- und Ackernutzung differenziert nach Ober- und Unterboden beschrieben. In den folgenden Tabellen werden neben den Ergebnissen der Hintergrundwerteberechnungen die Gesamtprobenanzahl (n) und die Anzahl der bereinigten Ausreißer (A.) dargestellt.

6.1 PFAS-Hintergrundwerte im Feststoff

Hintergrundwerte für PFAS im Feststoff konnten für die drei Einzelsubstanzen PFBA, PFOA und PFOS abgeleitet werden (Tabelle 5 und Abbildung 21). Für alle anderen Einzelsubstanzen lagen zu wenige Befunde oberhalb der Bestimmungsgrenze vor.

Tabelle 5: Hintergrundwerte für PFAS-Feststoffgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Einzelparameter

Nutzung	n =	PFBA [$\mu\text{g}/\text{kg}$]			PFOA [$\mu\text{g}/\text{kg}$]			PFOS [$\mu\text{g}/\text{kg}$]		
		50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.
Grünland Oberböden	68	0,23	0,62	1	0,33	0,62	2	0,46	0,91	3
Acker Oberboden	107	< 0,10	0,30	1	0,26	0,42	1	0,28	0,73	12
Grünland Unterboden	27	0,12	0,36	0	0,25	0,57	0	0,31	0,48	3
Acker Unterboden	41	*			< 0,10	0,41	0	< 0,10	0,61	2

* nicht genügend Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze zur Berechnung (alle Werte sind Ausreißer)

Für die Oberböden unter Grünlandnutzung (0-10 cm) wurde im 90. Perzentil für PFOS mit 0,91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ der höchste Hintergrundwert berechnet, gefolgt von PFOA mit 0,62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ und PFBA mit ebenfalls 0,62 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Für die Oberböden unter Ackernutzung (0-30 cm) wurde im 90. Perzentil ebenfalls für PFOS mit 0,73 $\mu\text{g}/\text{kg}$ der höchste Hintergrundwert berechnet, gefolgt von PFOA mit 0,42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ und PFBA von 0,30 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

Erwartungsgemäß sind die Hintergrundwerte in den Unterböden unter den jeweiligen Nutzungsarten niedriger als in den Oberböden (Tabelle 5 und Abbildung 21). Beispielweise wurde für PFOS im 90. Perzentil unter Grünlandnutzung im Oberboden (0-10 cm) ein Hintergrundwert von 0,91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ abgeleitet, während bei gleicher Nutzungsart im Unterboden (10-30 cm) ein Hintergrundwert 0,48 $\mu\text{g}/\text{kg}$ abgeleitet wurde.

Teilweise lag das 50. Perzentil der abgeleiteten Hintergrundwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (PFBA in Oberböden unter Ackernutzung 0-30 cm, PFOA und PFOS in Unterböden unter Ackernutzung 30-60 cm). Für PFBA in Unterböden (30-60 cm) unter

Ackernutzung konnte gar kein Hintergrundwert abgeleitet werden, da nicht genügend Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze zur Berechnung der Perzentile im Rahmen der Ausreißerbereinigung vorlagen und dementsprechend alle Werte als Ausreißer definiert wurden.

Für jeden der betrachteten Einzelparameter waren die Hintergrundwerte unter Grünlandnutzung höher als unter Ackernutzung. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die gewählten Probenahmetiefen nutzungsbedingt deutlich voneinander abweichen (siehe Kapitel 2). Durch das Unterpflügen und dementsprechende Durchmischen der Bodenschichten bis 30 cm unter Ackernutzung findet eine Verdünnung der mutmaßlich von oben durch Niederschlag und Staub eingetragenen Schadstoffe statt während sie im Grünland durch den fehlenden Umbruch in 0-10 cm Bodentiefe konzentrierter vorkommen.

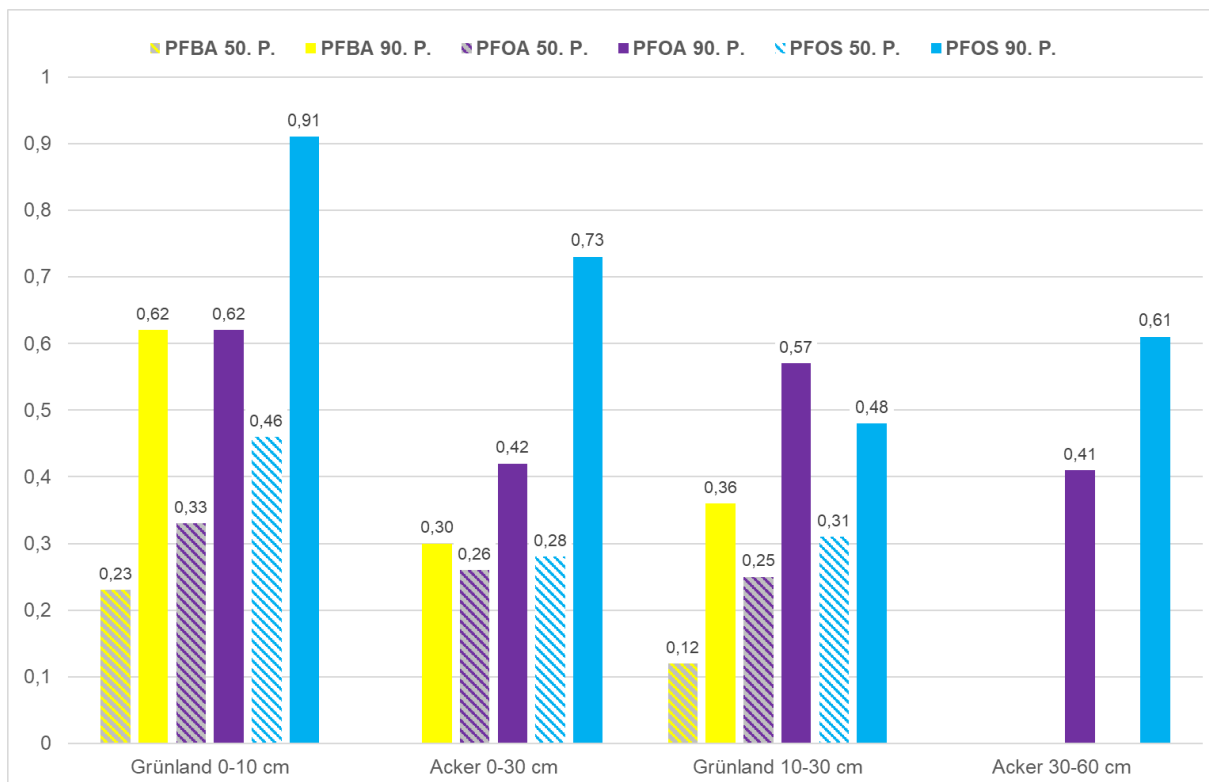


Abbildung 21: Hintergrundwerte (50. und 90. Perzentil) für PFAS-Feststoffgehalte in ländlichen Böden NRWs für verschiedene Einzelparameter

6.2 PFAS-Hintergrundwerte im 2:1 Eluat

Im diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen der Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW unter Grünland- und Ackernutzung differenziert nach Ober- und Unterboden beschrieben. In den folgenden Tabellen werden neben den Ergebnissen der Hintergrundwerteberechnungen die Gesamtprobenanzahl (n) und die Anzahl der bereinigten Ausreißer (A.) dargestellt.

Hintergrundwerte für PFAS im Eluat konnten für die sechs Carbonsäuren PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA und PFNA (Tabelle 6 und Abbildung 22) und drei Sulfonsäuren PFBS, PFHxS und PFOS (Tabelle 7 und Abbildung 22) abgeleitet werden. Für alle anderen Einzelparameter lagen zu wenige Befunde oberhalb der Bestimmungsgrenze vor.

Für die Oberböden unter Grünlandnutzung (0-10 cm) wurden im 90. Perzentil die höchsten Hintergrundwerte für PFBA mit 288 ng/L berechnet, gefolgt von PFOA mit 118 ng/L sowie PFHxA mit 44 ng/L und PFPeA und PFHpA mit 42 ng/L. Für die langkettige Carbonsäure PFNA (9 ng/L) und die Sulfonsäuren PFBS (18 ng/L), PFHxS (3 ng/L) und PFOS (16 ng/L) wurden vermutlich u.a. aufgrund ihrer besseren Sorptionseigenschaften und dementsprechend schlechteren Eluierbarkeit gegenüber den kürzerkettigen Carbonsäuren deutlich niedrigere Hintergrundwerte im Eluat berechnet. Für die Oberböden unter Ackernutzung (0-30 cm) wurden ähnliche, jedoch tendenziell etwas niedrigere Werte errechnet.

Für die Unterböden wurden teilweise etwas niedrigere Werte und teilweise etwas höhere Hintergrundwerte im 2:1 Eluat als in den Oberböden gleicher Nutzungsart abgeleitet. Beispielsweise für PFOA wurde unter Ackernutzung im Oberboden (0-30 cm) ein Eluatwert von 113 ng/L berechnet, während für die Unterböden (30-60 cm) ein Eluatwert von 168 ng/L berechnet wurde. Gleiches gilt für die Sulfonsäure PFOS unter Ackernutzung (Oberboden: 19 ng/L, Unterboden: 35 ng/L) und unter Grünlandnutzung (Oberboden: 16 ng/L, Unterboden: 28 ng/L) sowie die Sulfonsäuren PFBS und PFHxS unter Acker- und Grünlandnutzung. Dies könnte auf eine schlechtere Sorption von PFOS und PFOA in den Unterböden hinweisen. Es ist bekannt, dass insbesondere PFOS stark an organischer Substanz sorbiert, welche im Unterboden üblicherweise in geringeren Mengen als im Oberboden vorhanden ist. Einschränkend ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die für die Berechnung der Hintergrundwerte verwendete Probenanzahl für die Unterböden deutlich geringer war als für die Oberböden.

Tabelle 6: Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Carbonsäuren in ng/L

Nutzung	n=	PFBA			PFPeA			PFHxA		
		50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.
Grünland Oberboden	67	145	288	0	24	42	2	24	44	2
Acker Oberboden	95	75	126	2	16	29	0	24	38	1
Grünland Unterboden	27	86	165	1	20	31	0	22	34	0
Acker Unterboden	31	39	100	0	7	22	0	12	40	0
Nutzung	n=	PFHpA			PFOA			PFNA		
		50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.
Grünland Oberboden	67	24	42	0	65	118	0	7	9	4
Acker Oberboden	95	20	29	1	77	113	1	6	9	2
Grünland Unterboden	27	17	28	0	94	124	0	5	12	0
Acker Unterboden	31	8	31	0	40	168	0	3	9	0

Tabelle 7: Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Sulfonsäuren in ng/L

Nutzung	n=	PFBS			PFHxS			PFOS		
		50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.
Grünland Oberboden	67	8	18	0	2	3	0	8	16	1
Acker Oberboden	95	4	7	0	2	3	3	11	19	9
Grünland Unterboden	27	6	14	1	2	6	0	13	28	1
Acker Unterboden	31	6	12	4	3	9	0	12	35	1

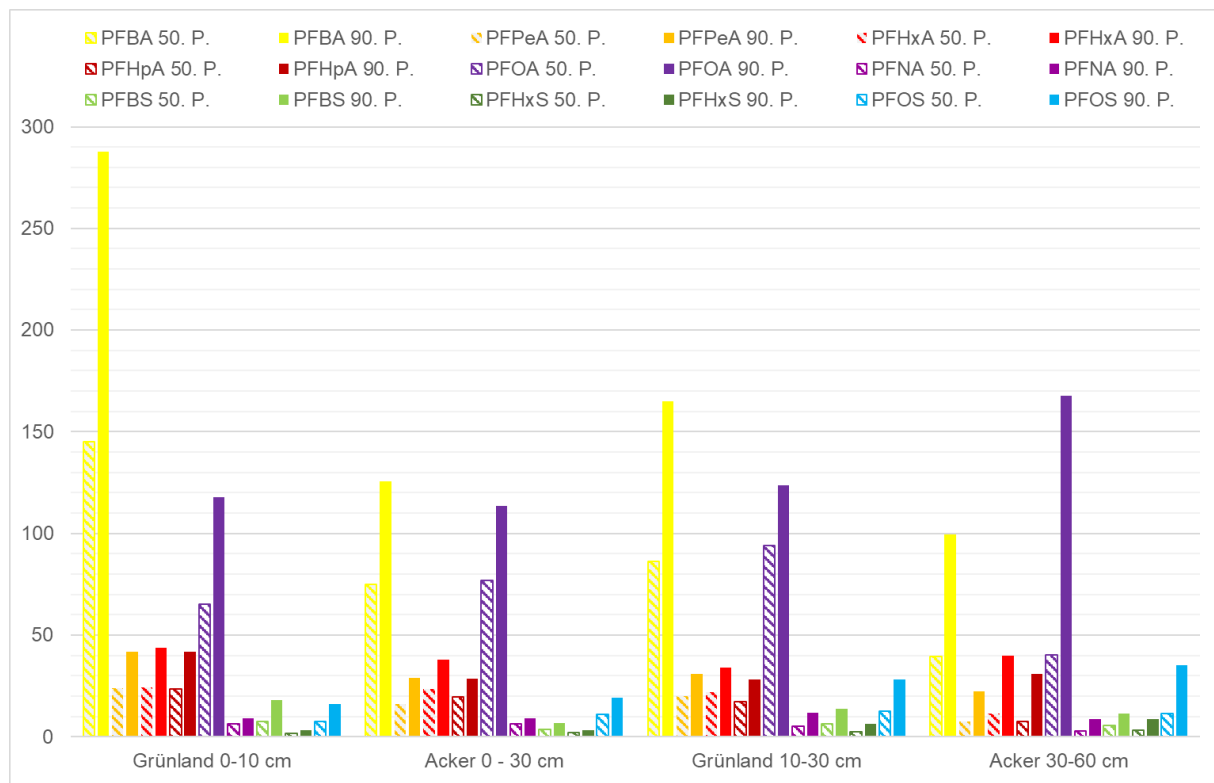


Abbildung 22: Grafische Darstellung der Hintergrundwerte (50. und 90. Perzentil) für PFAS-Eluatgehalte in ländlichen Böden NRWs für verschiedene Einzelparameter

Die Ergebnisse der Berechnungen zu Hintergrundwerten für PFAS im Eluat in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Summenparameter sind in Tabelle 8 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass für die Ableitung der Hintergrundwerte von Summenparametern zunächst all solche Werte, die unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 1 ng/L) lagen, durch den Wert der halben Bestimmungsgrenze (0,5 ng/L) ersetzt wurden. In den meisten Fällen lagen jedoch Gehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze vor.

Tabelle 8: Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in ng/L in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Summenparameter

Nutzungsart	n=	Summe EFSA-4			Summe GFS-7			Summe GFS-/GOW-13		
		50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.	50. P.	90. P.	A.
Grünland Oberboden	67	82	145	0	254	470	0	309	552	0
Acker Oberboden	95	99	148	4	209	308	1	252	363	1
Grünland Unterboden	27	117	171	0	223	392	1	267	457	0
Acker Unterboden	31	69	200	0	122	361	0	144	414	0

Für die Oberböden unter Grünlandnutzung (0-10 cm) wurde im 90. Perzentil ein Hintergrund-Summenwert für die Summe EFSA-4 (vier EFSA-PFAS: PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS) von 145 ng/L, für Oberböden unter Ackernutzung (0-30 cm) von 148 ng/L berechnet. Für die Summe 7 (sieben PFAS, zu denen GFS-Werte vorliegen: PFBA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) wurde ein Hintergrund-Summenwert im 90. Perzentil unter Grünlandnutzung von 470 ng/L und unter Ackernutzung von 308 ng/L abgeleitet. Für die Summe 13 (7-GFS-PFAS: PFBA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS und die 6-GOW-PFAS: PFPeA, PFHpA, PFDA, PFHpS, H4PFOS, PFOSA) wurde ein Hintergrund-Summenwert im 90. Perzentil unter Grünlandnutzung von 552 ng/L und unter Ackernutzung von 363 ng/L abgeleitet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Projektes war der Frage nachzugehen, ob und in welcher Größenordnung diffuse, ubiquitäre PFAS-Einträge in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen vorliegen. Mit dem vorliegenden Bericht konnte für Nordrhein-Westfalen belegt werden, dass PFAS-Hintergrundgehalte in allen Ober- und Unterböden unter verschiedenen Nutzungsarten (Grünland, Acker und Wald) nachweisbar sind. Das Spektrum und die Konzentration der vorgefundenen PFAS-Einzelsubstanzen sind vergleichbar. Der ubiquitäre Eintrag der PFAS muss demnach über atmosphärische Deposition erfolgt sein.

Durch die Absenkung der Bestimmungsgrenze bei PFAS-Feststoffuntersuchungen um den Faktor 100 auf 0,1 µg/kg gegenüber der in der DIN 38414-14 vorgeschriebenen Bestimmungsgrenze von 10 µg/kg konnten in nahezu allen untersuchten Oberbodenproben PFAS erstmals flächendeckend in allen ländlichen Gebieten in NRW im Feststoff nachgewiesen werden. Die Einzelsubstanzen PFOS, PFOA und PFBA konnten im Feststoff am häufigsten und in den höchsten Konzentrationen gemessen werden. Für diese drei Einzelsubstanzen konnten Hintergrundwerte im Feststoff für Acker- und Grünlandnutzung abgeleitet werden. Die vorgefundenen Einzelsubstanzen und das Niveau der PFAS-Konzentration im Feststoff der Oberböden ist mit den Studienergebnissen aus den Niederlanden (WINTERSEN 2020), Flandern (VRANCKEN 2022), Schweden (SÖRENGÅRD et al. 2022) und Vermont (ZHU et al. 2022) vergleichbar.

Im 2:1 Eluat konnten sowohl in den Oberböden als auch in den Unterböden in allen Bodenproben PFAS oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen werden. Auch in den Eluaten wurde ein immer wiederkehrendes PFAS-Verteilungsmuster aus perfluorierten Carbonsäuren von C4 bis C9 sowie den perfluorierten Sulfonsäuren PFBS, PFHxS und PFOS erkennbar, welches als charakteristisch für Hintergrundbelastungen anzusehen ist. Im Eluat ist die Bestimmungsgrenze für PFAS-Untersuchungen deutlich niedriger (0,001 µg/L) als im Feststoff, daher können im Eluat mehr Einzelsubstanzen detektiert werden. Jedoch treten im Eluat verstärkt die wasserlöslichen PFAS hervor, wie die kurzkettige Carbonsäure PFBA, während die langkettige Sulfonsäure PFOS aufgrund ihrer guten Sorptionseigenschaften am Boden deutlich unterrepräsentiert ist. Hintergrundwerte im 2:1 Eluat der Böden unter Acker- und Grünlandnutzung konnten für sechs perfluorierte Carbonsäuren (PFBA, PFPeA, PFHxS, PFHpA, PFOA und PFNA) und drei perfluorierte Sulfonsäuren (PFBS, PFHxS, PFOS) abgeleitet werden.

Über die beschriebenen perfluorierten Tenside hinaus wurde an ausgewählten Stichproben das Vorkommen von Vorläuferverbindungen über den TOP-Assay des Methanolextraktes nachgewiesen. Vorläuferverbindungen haben das Potenzial über die Zeit zu einer weiteren Erhöhung der weiter oben beschriebenen perfluorierten Tenside zu führen. Das Vorhandensein der ultrakurzkettigen PFAS TFA und PFPrA konnte ebenfalls über Stichproben belegt werden.

Für andere Schadstoffe, wie bspw. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe ist bekannt, dass die Hintergrundwerte des urbanen Raumes höher liegen als die des ländlichen Raumes (LANUV 2015). Der Frage, ob dies auch für die Schadstoffgruppe der PFAS gilt, wird in einem bereits laufenden Folgeprojekt nachgegangen.

8 Literatur

- BBODSCHV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BUND/LÄNDER ARBEITSGRUPPE PFAS (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung. Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials.
https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf
- 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.
<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naw/wdc-beuth:din21:369194124>
- DIN 19747:2009-07: Untersuchung von Feststoffen - Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen.
<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naw/wdc-beuth:din21:118510306>
- DIN 38407-42:2011:03: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest- Flüssig-Extraktion.
<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naw/wdc-beuth:din21:137282966>
- DIN 38414-14:2011-08: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS).
<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naw/wdc-beuth:din21:142612398>
- HELD, T.; REINHARD, M. (2020): Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen. UBA-Abschlussbericht 3717 76 231 0. TEXTE 137/2020. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-13_texte_137-2020_handbuch_pfas.pdf
- LABO – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. 4. überarbeitete und ergänzte Auflage.
https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf
- LANGE, F. T.; SCHEURER, C.; BORHO, W.; SEEGER, A.-K.; DREHER, P.; NÖLT, T. (2022): Air-drying of soil samples. A crucial step in the determination of leachable concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances. Chemosphere, Volume 269, 128745.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565352032943X?via%3Dihub>

- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2015): Hintergrundwerte für Schadstoffgehalte in Böden. Aktualisierung der Werte und Karten für Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 66. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/fabe66.pdf
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2023): Fälle mit PFAS-Belastungen im Boden und Grundwasser in Nordrhein-Westfalen (Stand: Februar 2023). https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/uploads/2023_Bericht_PFAS_Bestandsaufnahme_final.pdf
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2021): Sachstandsbericht: PFAS - in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen. Ergebnisse aus drei Untersuchungsphasen. Karlsruhe. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10215>
- MUNV - MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2022): Erlass zur Bekanntgabe des Leitfadens zur PFAS-Bewertung (Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS 2022) für die Anwendung im Verwaltungsvollzug vom 04.03.2022. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/uploads/20220304_Erlass_Einf%C3%BChrung_PFAS-Leitfaden.pdf
- SÖRENGÅRD, M.; KIKUCHI, J.; WIBERG, K.; AHRENS, L. (2022): Spatial distribution and load of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden. Chemosphere, Volume 295, 133944. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522004374>
- VRANCKEN, K. (2022): Proposal Standards Framework PFAS. Adjustment of the PFAS Standards Framework. Assessment values of soil remediation and free use. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1669745290/PFAS_-_Voorstel_normenkader_opdrachthouder_EN_-_9.11.2022_vkbzlj.pdf
- WINTERSEN, A.; SPIJKER, J.; VAN BREEMEN, P.; VAN WIJNEN, H. (2020): Achtergrondwaarden perfluoroalkylstoffen (PFAS) in de Nederlandse landbodem. RIVM-briefrapport 2020-0100. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Bilthoven. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0100.pdf>
- ZHU, W.; KHAN, K.; ROAKES, H.; MAKER, E.; UNDERWOOD, K. L.; ZEMBA, S.; BADIREDDY, A. R. (2022): Vermont-wide assessment of anthropogenic background concentrations of perfluoroalkyl substances in surface soils. Journal of Hazardous Materials, Volume 438, 129479. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422012729>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Standorte der Bodenuntersuchungen auf PFAS in ländlichen Gebieten in NRW	7
Abbildung 2:	Schurf auf einer Ackerfläche © LANUV NRW / Oberhäuser	8
Abbildung 3:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Grünland-Oberböden im Feststoff.....	15
Abbildung 4:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Grünland-Unterböden im Feststoff.....	15
Abbildung 5:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Acker-Oberböden im Feststoff	16
Abbildung 6:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Acker-Unterböden im Feststoff	17
Abbildung 7:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Wald-Oberböden im Feststoff	18
Abbildung 8:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Wald-Unterböden im Feststoff	18
Abbildung 9:	PFAS-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in Wald-Auflagen (L-Of und Oh) im Feststoff	19
Abbildung 10:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Grünland-Oberböden im 2:1 Eluat	21
Abbildung 11:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Grünland-Unterböden im 2:1 Eluat	21
Abbildung 12:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Acker-Oberböden im 2:1 Eluat	22
Abbildung 13:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Acker-Unterböden im 2:1 Eluat.....	23
Abbildung 14:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Oberböden im 2:1 bzw. 10:1 Eluat	24
Abbildung 15:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Unterböden im 2:1 Eluat.....	24
Abbildung 16:	PFAS-Gehalte (ng/L) in Wald-Auflagen (L-Of und Oh) im 10:1 Eluat	25
Abbildung 17:	TFA- und PFPrA-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) von Oberbodenproben im Feststoff	27
Abbildung 18:	TFA- und PFPrA-Gehalte (ng/L) im 2:1 Eluat von verschiedenen Oberböden.....	27
Abbildung 19:	PFAS ($\text{nmol F}/\text{L}$) im 2:1 Eluat ausgesuchter Oberböden vor und nach TOP-Assay	28
Abbildung 20:	PFAS ($\text{nmol F}/\text{kg}$) im Methanolextrakt ausgesuchter Oberböden vor und nach TOP-Assay	29
Abbildung 21:	Hintergrundwerte (50. und 90. Perzentil) für PFAS-Feststoffgehalte in ländlichen Böden NRW für verschiedene Einzelparameter.....	31
Abbildung 22:	Grafische Darstellung der Hintergrundwerte (50. und 90. Perzentil) für PFAS-Eluatgehalte in ländlichen Böden NRW für verschiedene Einzelparameter.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Anzahl der entnommenen Bodenproben und der daraus erstellten Eluatproben	9
Tabelle 2:	Liste der untersuchten PFAS-Einzelstoffe mit Angabe der CAS-Nummer (Standarduntersuchungsumfang des Projektes)	10
Tabelle 3:	Erweiterter Untersuchungsumfang des Projektes mit Angabe der CAS-Nummer.....	11
Tabelle 4:	Für die Hintergrundwerte bei der Summenbildung berücksichtigte Einzelverbindungen	13
Tabelle 5:	Hintergrundwerte für PFAS-Feststoffgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Einzelparameter	30
Tabelle 6:	Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Carbonsäuren in ng/L.....	32
Tabelle 7:	Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Sulfonsäuren in ng/L	33
Tabelle 8:	Hintergrundwerte für PFAS-Eluatgehalte in ng/L in Böden ländlicher Gebiete in NRW für verschiedene Summenparameter	34

Anhang

Anhang 1: Auswertung Verhältnis PFAS im Feststoff zu PFAS in Lösung

Um die Verhältnisse von PFAS-Einzelsubstanzen im Feststoff zu PFAS-Einzelsubstanzen in Lösung darzustellen und Aussagen über die Löslichkeiten der PFAS-Einzelsubstanzen treffen zu können, wurden alle Mineralboden-Datenpaare (Ober- und Unterböden ohne Wald-Auflagen) der PFAS-Feststoff- und Eluatgehalte oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenzen gemeinsam ausgewertet.

Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung A1 dargestellt. Dabei wird sichtbar, dass mit abnehmender Kettenlänge die Löslichkeit steigt. Diese Abhängigkeit ist sowohl bei den Carbonsäuren als auch bei den beiden Sulfonsäuren, für die Daten vorliegen, erkennbar (PFBS > PFOS). Detaillierte Darstellungen des Zusammenhanges zwischen PFAS-Gehalten im Feststoff und denen in Lösung finden sich für die Einzelsubstanzen in den folgenden Abbildungen A2 bis A10.

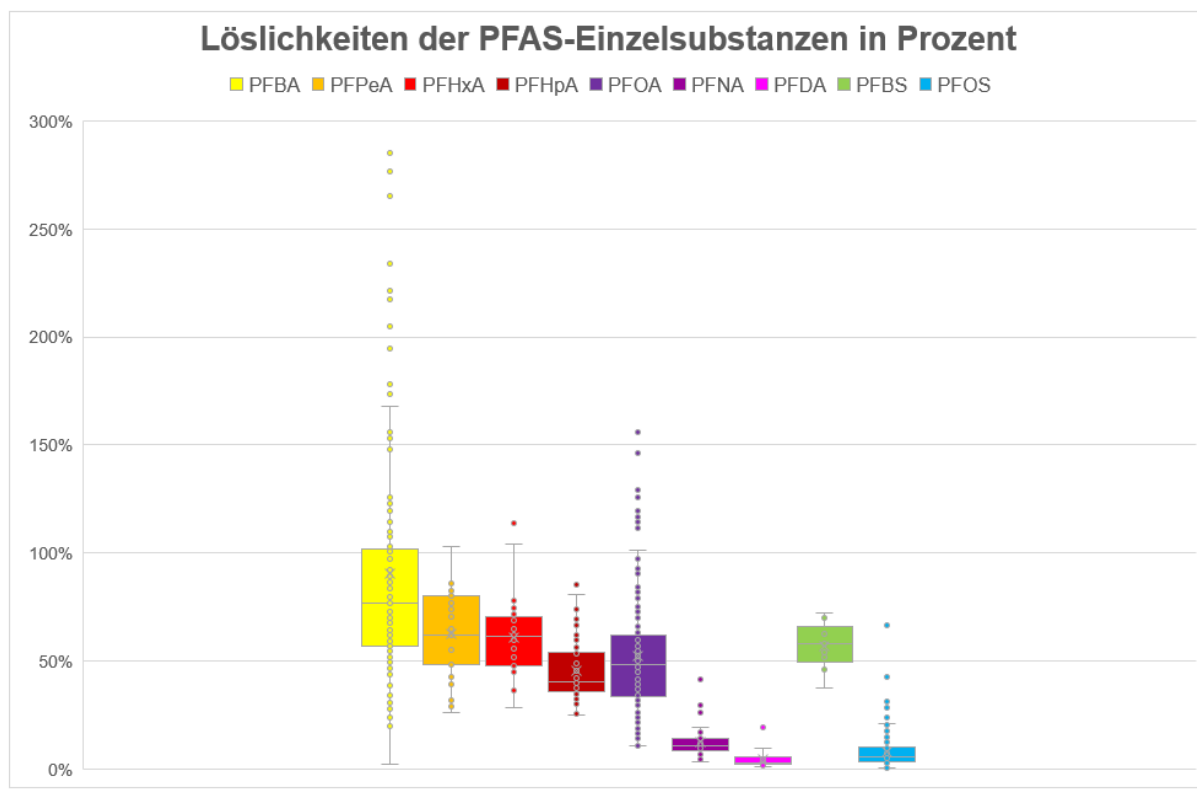


Abbildung A1: Löslichkeiten der PFAS in Mineralböden (Ober- und Unterböden) in Prozent

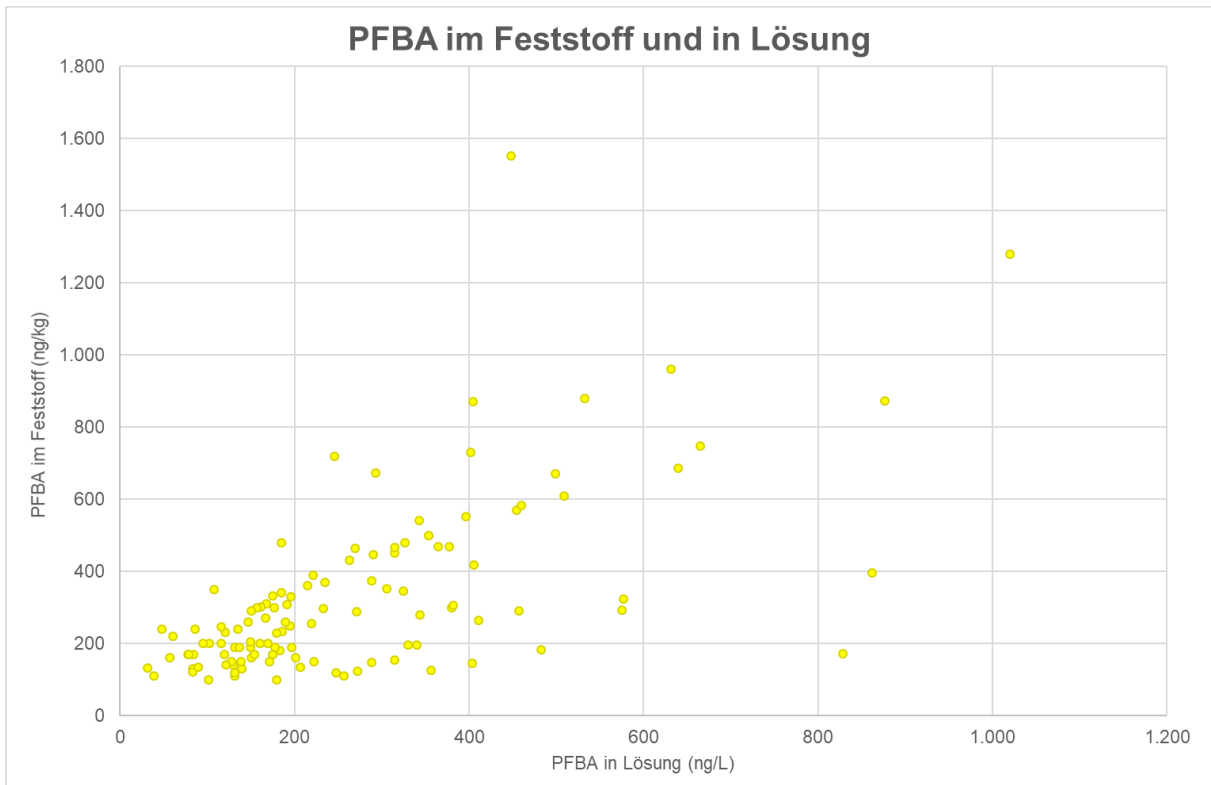


Abbildung A2: Verhältnis PFBA im Feststoff und in Lösung

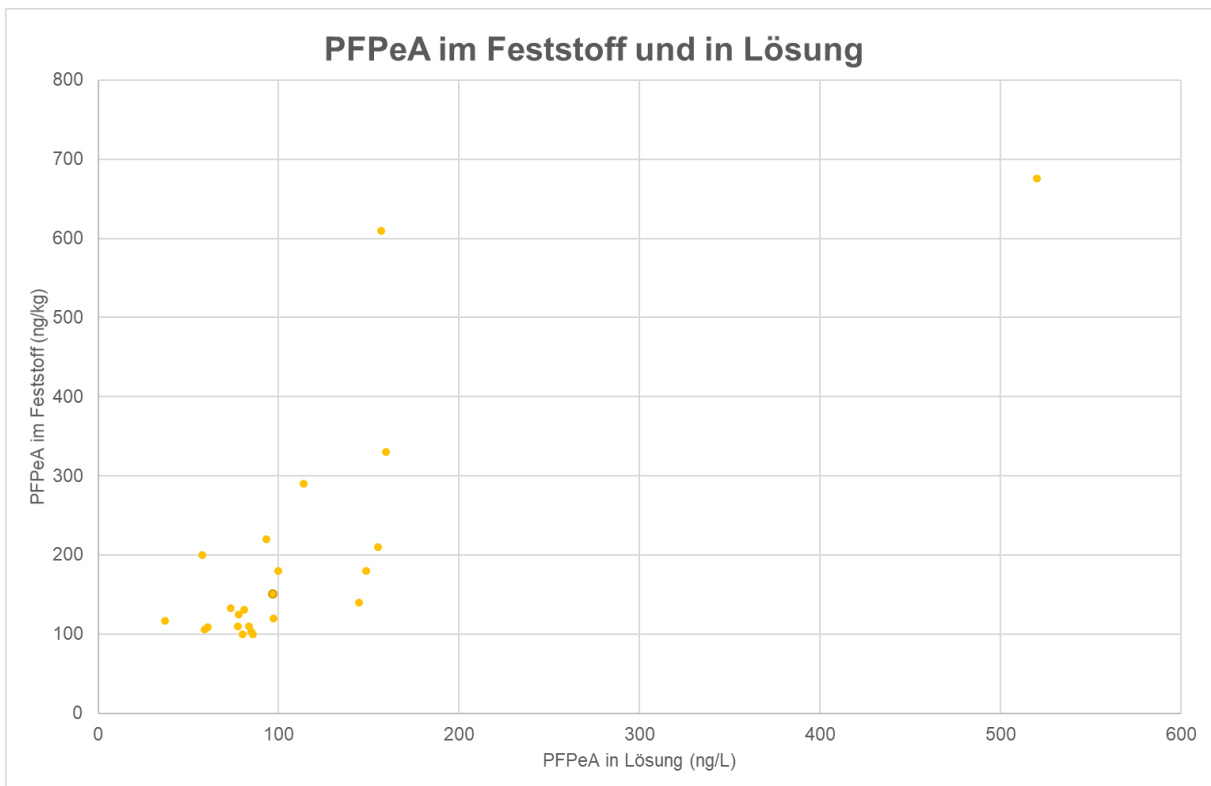


Abbildung A3: Verhältnis PFPeA im Feststoff und in Lösung

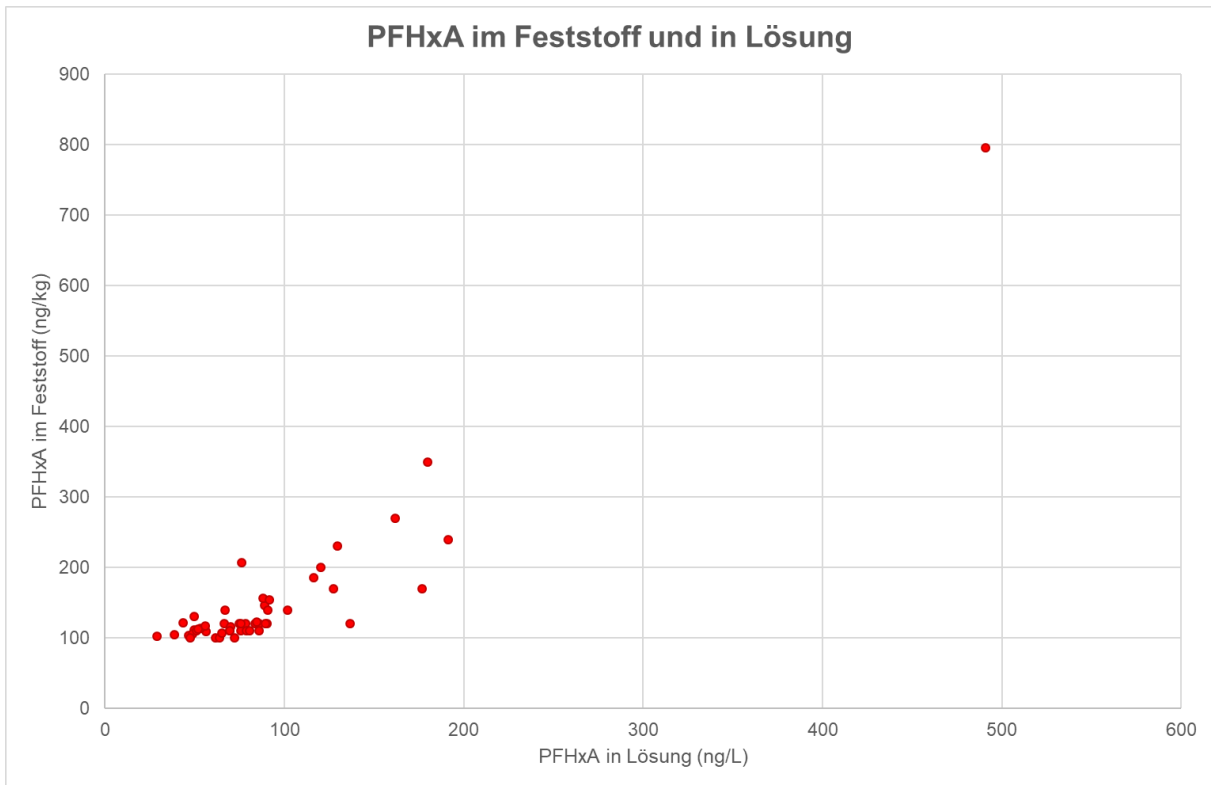


Abbildung A4: Verhältnis PFHxA im Feststoff und in Lösung

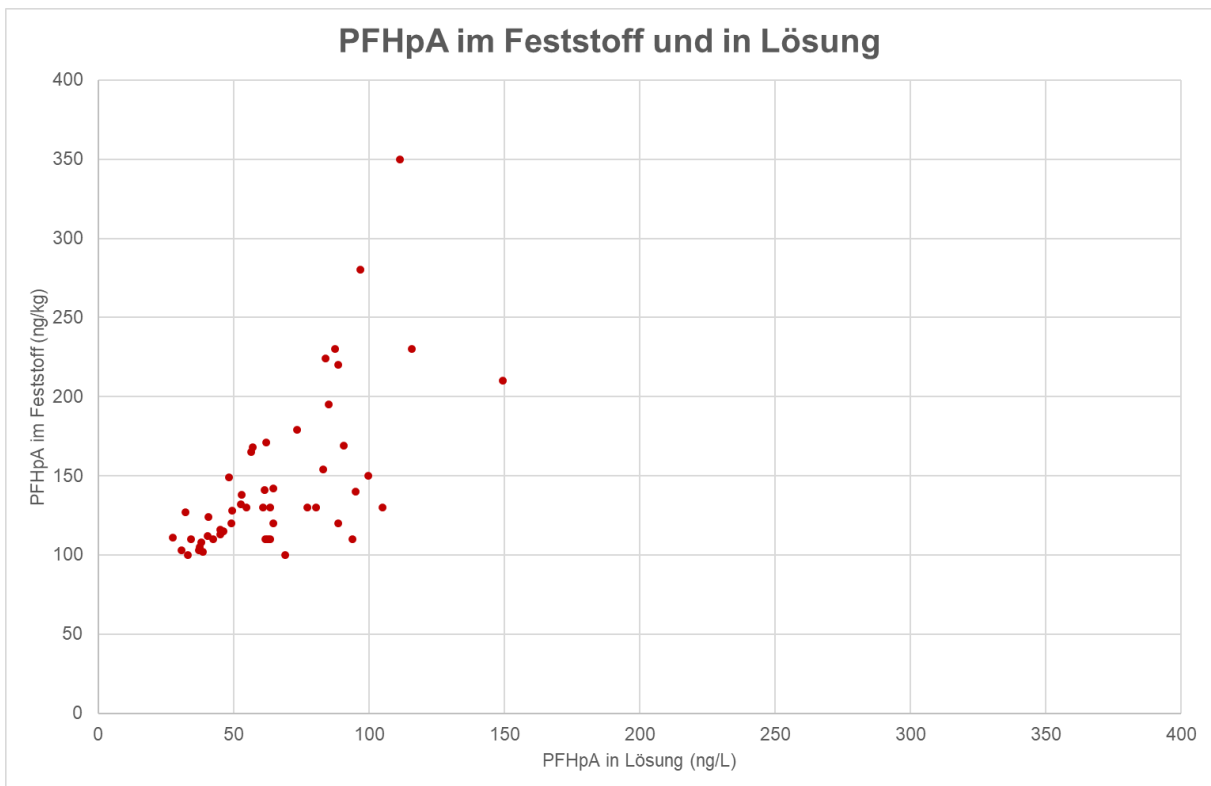


Abbildung A5: Verhältnis PFHpA im Feststoff und in Lösung

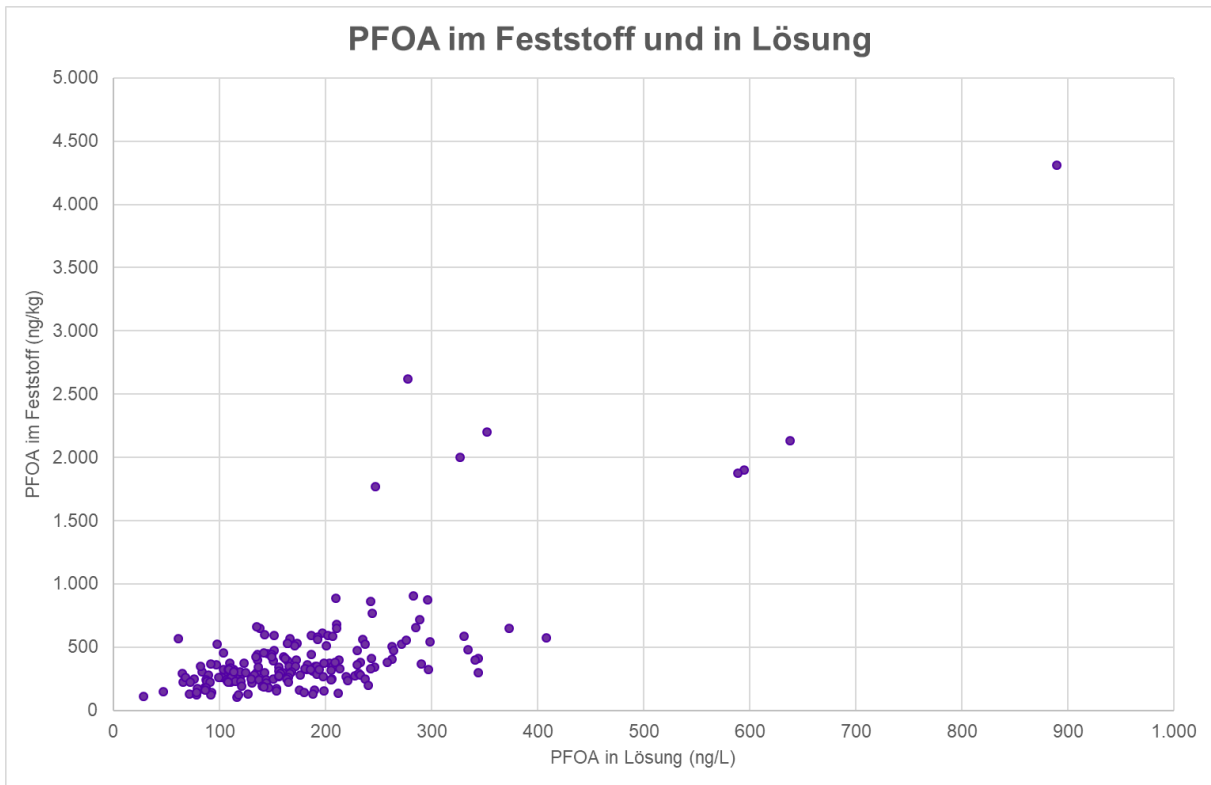


Abbildung A6: Verhältnis PFOA im Feststoff und in Lösung

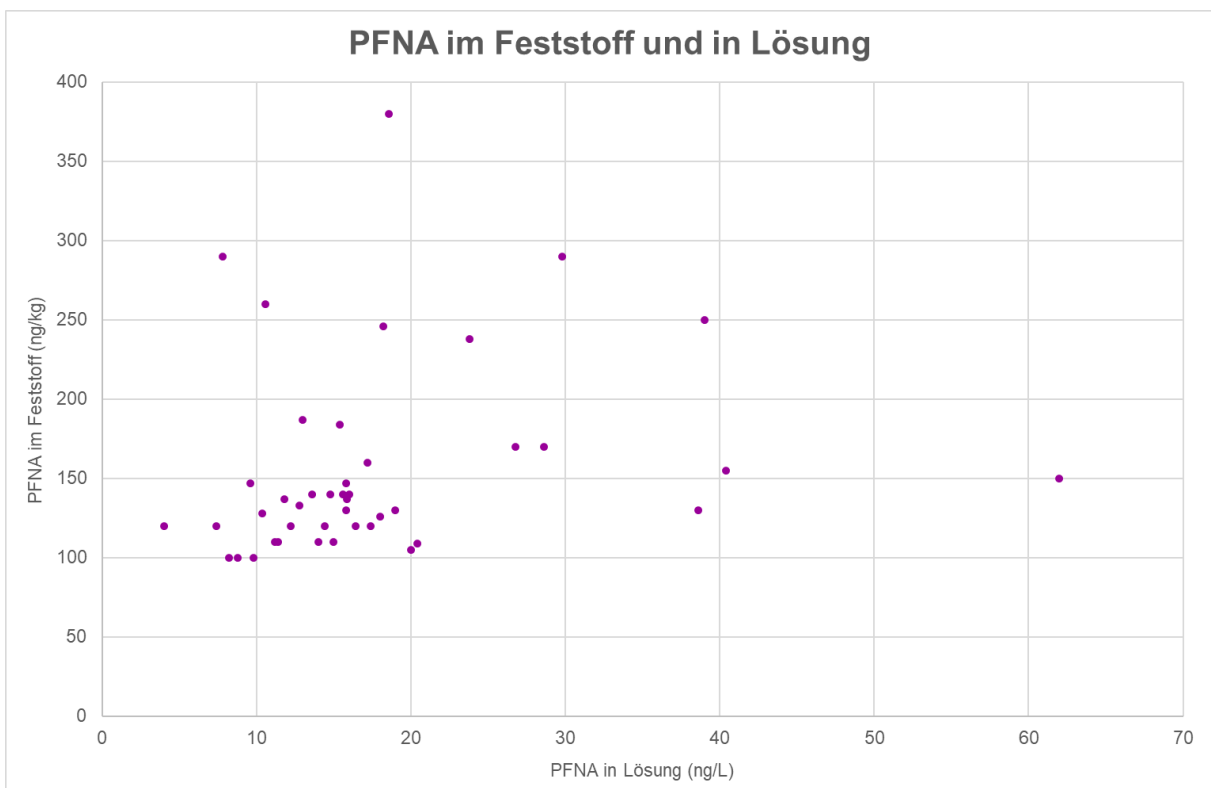


Abbildung A7: Verhältnis PFNA im Feststoff und in Lösung

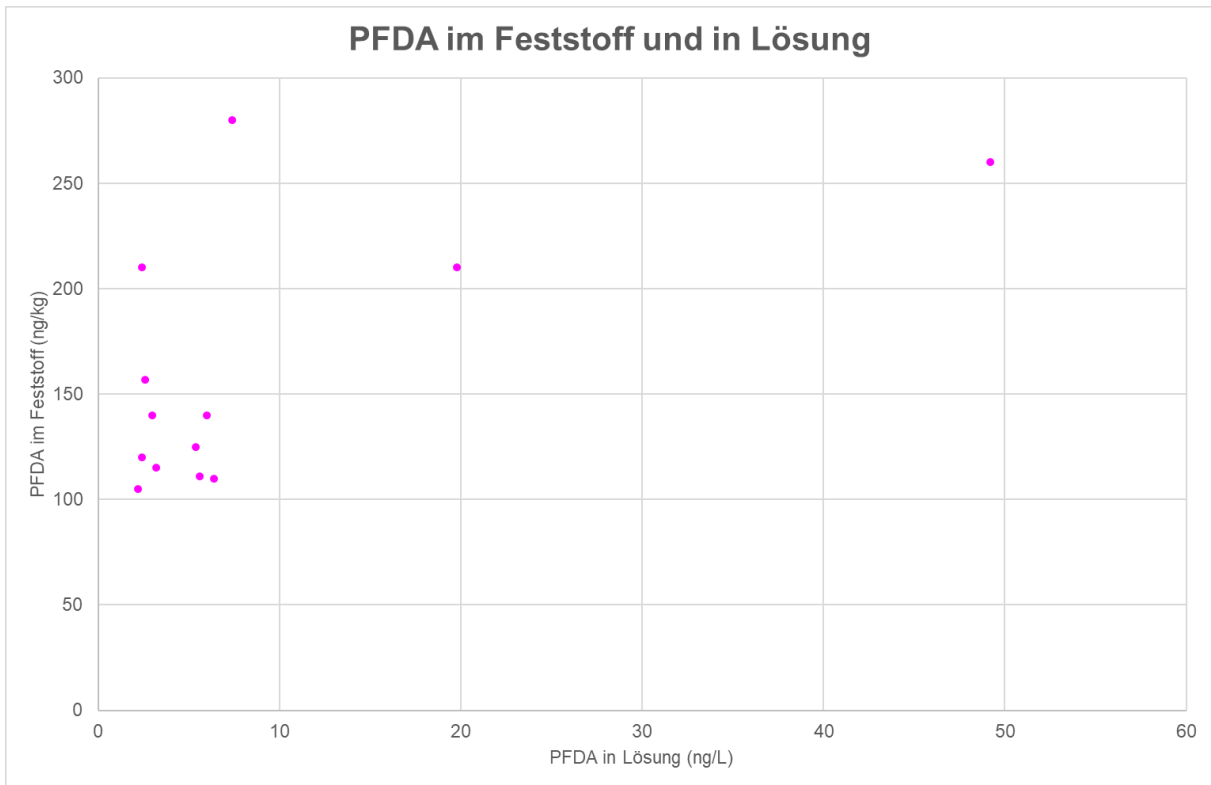


Abbildung A8: Verhältnis PFDA im Feststoff und in Lösung

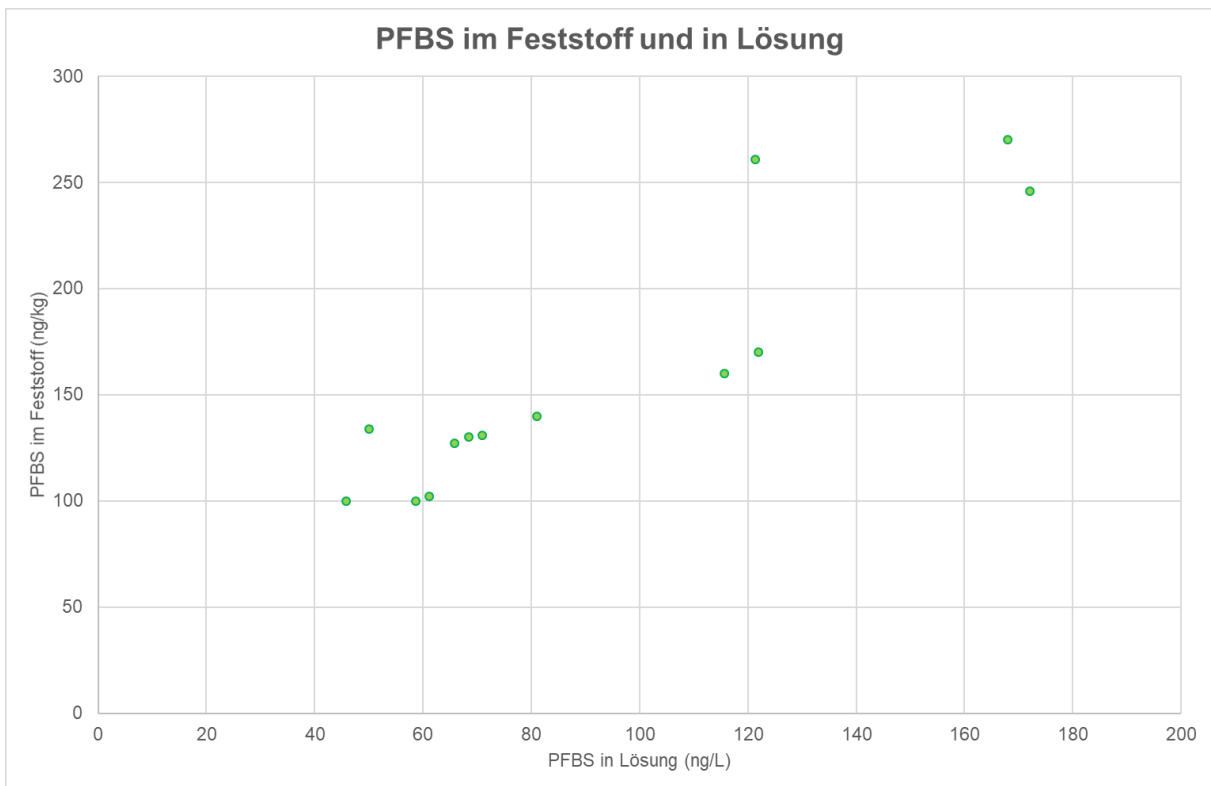


Abbildung A9: Verhältnis PFBS im Feststoff und in Lösung

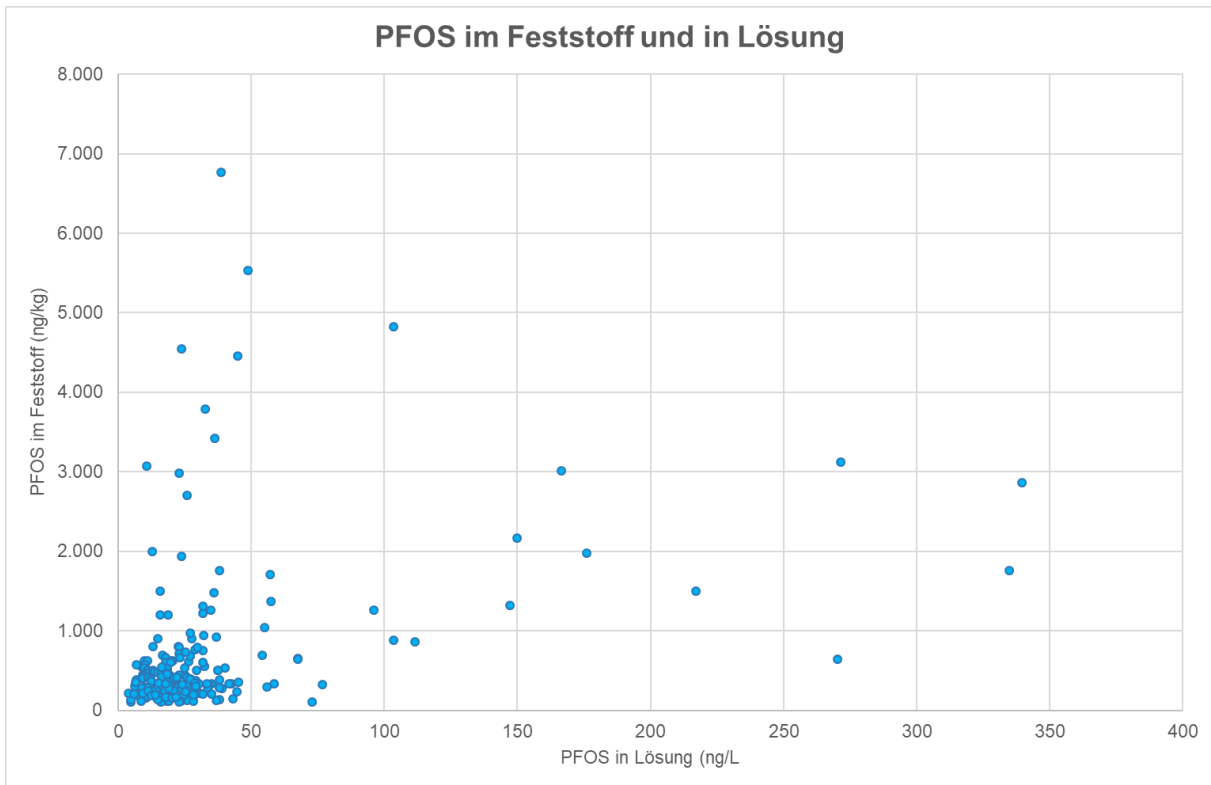


Abbildung A10: Verhältnis PFOS im Feststoff und in Lösung

Anhang 2: Auswertung Verwertung nach aktuellem Stand

Momentan werden Böden in Nordrhein-Westfalen auf Grundlage des Erlasses des MUNV vom 04.03.2022 aufgrund ihrer Eluatgehalte verschiedenen Verwertungsklassen zugeordnet (siehe Kapitel 1). Um eine Einschätzung der im Projekt untersuchten Bodenproben bezüglich einer Verwertung treffen zu können wurden die untersuchten Bodenproben aufgrund ihrer Eluatgehalte den verschiedenen Verwertungsklassen zugeordnet. Hierfür wurden die Eluatuntersuchungsergebnisse nach Ausreißerbereinigung (siehe Kapitel 2) genutzt.

Das Ergebnis der Auswertung ist in Tabelle A1 dargestellt. Die Oberböden unter Acker- und Grünlandnutzung konnten zu 82 % der VK1 und zu 18 % der VK2 zugeordnet werden. Die Unterböden unter Ackernutzung konnten zu 74 % der VK1 und zu 26 % der VK2 zugeteilt werden, während die Unterböden unter Grünlandnutzung nur zu 59 % der VK1 und zu 41 % der VK zugeordnet werden mussten. Keine Bodenprobe musste der VK3 zugeordnet werden.

Tabelle A1: Auswertung: Einteilung der Bodenproben in Verwertungsklassen

	Acker		Grünland	
Tiefe	0-30 cm	30-60 cm	0-10 cm	10-30 cm
VK1	82%	74%	82%	59%
VK2	18%	26%	18%	41%
VK3	0%	0%	0%	0%

Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in NRW – Anhang

Standort	Bezeichnung	ET von	ET bis	Horizont-Bez.	pH-CaCl ₂	C	N	C-org	Humus	CO ₃	CaCO ₃	< 0,002 T	< 0,0063 fU	< 0,020 mU	< 0,063 gU	Summe U	< 0,125 ffS	< 0,20 fS	< 0,63 mS	< 2,0 gS	Summe S	Bo.Art KA5	
Wald 3	UB	0,10	0,30	3 Bhv	4,4	0,67	0,05	0,67	1,16	n.b.	n.b.	20,0	6,0	19,4	52,5	77,9	1,3	0,3	0,3	0,2	2,1	Ut4	
Wald 4	AUF L/Of	0,04	0,00	1 L+Of	3,4	32,30	1,51	32,29	64,58	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 4	OB	0,00	0,05	2 Ahe	3,0	7,00	0,35	7,00	12,04	n.b.	n.b.	9,1	0,0	5,8	15,9	21,7	12,6	19,6	34,2	2,8	69,2	Sl3	
Wald 4	UB	0,10	0,30	3 rAp / Bhs-Go	3,4	2,29	0,09	2,29	3,94	n.b.	n.b.	12,6	0,0	0,0	15,0	15,0	8,6	18,6	42,1	3,2	72,5	Sl4	
Wald 5	OB	0,01	0,05	1 Ah	4,6	3,60	0,26	3,60	6,19	n.b.	n.b.	17,6	10,4	15,3	50,0	75,7	3,1	1,8	1,4	0,3	6,6	Ut4	
Wald 5	UB	0,12	0,25	2 Bv	4,1	1,34	0,10	1,34	2,30	n.b.	n.b.	26,8	9,5	12,9	45,0	67,4	2,9	1,3	0,9	0,7	5,8	Tu4	
Wald 6	AUF L/Of	0,05	0,01	1 L+Of	3,2	27,60	1,39	27,61	55,22	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 6	AUF Oh	0,01	0,00	2 Oh	2,9	20,90	0,91	20,89	41,79	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 6	OB	0,00	0,06	3 Aeh+Ahe	2,8	5,50	0,19	5,50	9,46	n.b.	n.b.	7,3	2,9	10,4	32,0	45,3	9,2	15,6	21,6	0,8	47,2	Su4	
Wald 6	UB	0,10	0,30	4 Bhsv / Bv	4,0	1,53	0,05	1,53	2,64	n.b.	n.b.	9,2	0,2	10,7	39,3	50,2	9,5	13,6	17,2	0,3	40,6	Uls	
Wald 7	AUF Of	0,03	0,01	1 Of	3,4	39,70	1,95	39,74	79,49	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 7	AUF Oh	0,01	0,00	2 Oh	3,1	17,60	0,90	17,56	35,12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 7	OB	0,00	0,07	3 Ah	3,2	11,40	0,54	11,44	19,67	n.b.	n.b.	21,9	14,3	18,3	13,3	45,9	6,6	2,9	6,3	16,3	32,1	Ls2	
Wald 7	UB	0,10	0,29	4 Bv	3,6	2,81	0,16	2,81	4,83	n.b.	n.b.	25,8	11,2	14,3	13,9	39,4	7,6	3,1	6,8	17,4	34,9	Lt2	
Wald 8	OB	0,00	0,04	1 Ah	3,5	15,00	0,68	15,03	25,86	n.b.	n.b.	11,5	3,4	12,1	20,1	35,6	8,5	12,1	27,7	4,6	52,9	Sl3	
Wald 8	UB	0,10	0,30	2 Bv	n.b.	0,75	0,04	0,75	1,29	n.b.	n.b.	4,2	3,6	2,0	21,7	27,3	9,7	15,6	39,1	4,0	68,4	Su3	
Wald 9	AUF L/Of	0,07	0,00	1 L / Of	3,8	39,40	1,79	39,37	78,74	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 9	OB	0,00	0,05	2 Aeh	3,1	5,29	0,19	5,29	9,10	n.b.	n.b.	9,6	5,3	18,4	62,0	85,7	2,9	0,6	0,7	0,4	4,6	Ut2	
Wald 9	UB	0,10	0,30	3 Bv-Sw	3,9	1,12	0,04	1,12	1,92	n.b.	n.b.	11,9	4,2	16,1	63,8	84,1	2,9	0,5	0,3	0,3	4,0	Ut2	
Wald 10	AUF L/Of	0,05	0,01	1 L-Of	4,0	24,20	1,10	24,21	48,42	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 10	AUF Oh	0,01	0,00	2 Oh	3,4	21,10	1,05	21,11	42,22	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 10	OB	0,00	0,08	3 Ah	3,2	19,90	0,84	19,87	39,73	n.b.	n.b.	20,6	12,8	30,2	9,2	52,2	5,9	1,7	6,6	12,8	27,0	Lu	
Wald 10	UB	0,10	0,28	4 Bv	3,3	7,36	0,29	7,36	12,66	n.b.	n.b.	25,4	13,8	17,4	10,0	41,2	2,5	1,1	4,2	25,7	33,5	Lt2	
Wald 11	AUF L/Of	0,04	0,01	1 L-Of	3,2	27,60	1,28	27,59	55,18	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 11	AUF Oh	0,01	0,00	2 Oh	3,0	26,10	1,16	26,12	52,24	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 11	OB	0,00	0,06	3 Ah	3,1	9,41	0,45	9,41	16,19	n.b.	n.b.	23,9	10,9	18,0	33,3	62,2	2,5	1,7	4,9	4,9	14,0	Lu	
Wald 11	UB	0,10	0,30	4 Bv	3,9	2,65	0,14	2,65	4,55	n.b.	n.b.	24,0	9,8	22,3	32,9	65,0	2,2	1,3	2,7	4,8	11,0	Ut4	
Wald 12	AUF L/Of	0,07	0,04	1 L-Of	4,8	32,40	1,38	32,37	64,75	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 12	AUF Oh	0,04	0,00	2 Oh	3,9	19,00	1,04	18,96	37,92	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 12	OB	0,00	0,06	3 Aeh	4,0	5,08	0,37	5,08	8,74	n.b.	n.b.	13,9	4,5	13,5	17,0	35,0	5,5	3,0	13,8	28,8	51,1	Sl4	
Wald 12	UB	0,10	0,29	4 Bv	4,0	1,45	0,15	1,45	2,49	n.b.	n.b.	12,2	6,0	9,6	12,4	28,0	4,4	3,2	17,1	35,0	59,7	Sl4	
Wald 13	AUF L/Of	0,07	0,04	1 L-Of	3,7	42,70	1,70	42,69	85,38	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 13	AUF Oh	0,04	0,01	2 Oh	2,9	36,30	1,74	36,33	72,65	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wald 13	OB	0,01	0,06	3 Aeh	3,2	4,94	0,21	4,94	8,49	n.b.	n.b.	15,4	6,3	16,4	36,2	58,9	12,8	9,5	2,2	1,2	25,7	Uls	
Wald 13	UB	0,12	0,27	4 Bv	3,9	1,42	0,07	1,42	2,43	n.b.	n.b.	17,9	1,8	13,6	38,4	53,8	14,7	9,8	3,0	0,8	28,3	Lu	

Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in NRW – Anhang

Standort	Horizont	Gehalt in µg/kg																									
		PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUndA	PFDoA	PFTTrDA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	H4PFHxS	H4PFOS	H4PFDS	HFPO-DA	DONA	FOSA	N-EtFOSA	FOSAA	N-Et-FOSAA
Wald 8	UB	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,27	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 9	AUF L/Of	0,19	0,58	< 0,1	0,21	0,75	0,48	0,70	0,44	0,38	0,23	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 9	OB	0,96	0,61	0,17	0,23	1,90	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,11	< 0,1	1,37	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 9	UB	0,19	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,37	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,16	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 10	AUF L/Of	< 0,1	0,22	0,20	< 0,1	0,56	0,55	0,59	0,36	0,21	0,20	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,56	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,12
Wald 10	AUF Oh	< 0,1	0,26	0,12	0,21	1,11	0,98	1,19	0,65	0,35	0,33	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	5,66	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,19
Wald 10	OB	< 0,1	0,41	0,47	0,34	3,11	0,63	0,47	0,25	< 0,1	0,13	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,78	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,23
Wald 10	UB	< 0,1	0,18	0,27	0,22	2,00	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,73	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 11	AUF L/Of	< 0,1	0,50	0,45	0,33	1,80	1,01	0,79	0,43	0,19	0,19	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	5,64	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,17
Wald 11	AUF Oh	< 0,1	0,68	0,15	0,22	0,93	0,68	0,90	0,55	0,29	0,24	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,85	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,22
Wald 11	OB	< 0,1	0,22	0,20	0,28	1,77	0,38	0,21	0,12	< 0,1	< 0,1	0,14	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,76	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 11	UB	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,35	0,12	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,21	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 12	AUF L/Of	0,40	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,13	0,29	0,38	0,34	0,24	0,24	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,07	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 12	AUF Oh	1,20	< 0,1	< 0,1	0,21	0,38	0,60	0,63	0,54	0,22	0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	3,49	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 12	OB	0,67	0,20	< 0,1	0,13	0,26	0,29	0,28	0,16	0,10	0,10	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,71	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 12	UB	0,29	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,33	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,33	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 13	AUF L/Of	< 0,1	1,28	0,34	< 0,1	0,11	0,23	0,48	0,40	0,17	0,33	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,56	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 13	AUF Oh	< 0,1	0,85	1,84	1,52	10,36	1,99	1,02	0,51	0,16	0,22	< 0,1	< 0,1	0,17	0,16	12,44	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 13	OB	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,66	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Wald 13	UB	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,14	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Anhang 6: Untersuchungen auf weitere PFAS in ausgewählten Oberbodenproben

Tabelle A5: PFAS-Gehalte in ausgewählten Oberbodenproben

Standort	6:2 diPAP (µg/kg)	8:2 diPAP (µg/kg)	6:6-PFPiA (µg/kg)	6:8-PFPiA (µg/kg)	8:8-PFPiA (µg/kg)	PFUnDS (µg/kg)	PFDoDS (µg/kg)	PFTTrDS (µg/kg)
Acker 10	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 12	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 13	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 24	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 32	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 34	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 38	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 44	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Acker 47	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 14	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 17	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 21	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 22	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 25	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Grünland 31	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Wald 9	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Wald 13	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A1: Löslichkeiten der PFAS in Mineralböden (Ober- und Unterböden) in Prozent	40
Abbildung A2: Verhältnis PFBA im Feststoff und in Lösung	41
Abbildung A3: Verhältnis PFPeA im Feststoff und in Lösung	41
Abbildung A4: Verhältnis PFHxA im Feststoff und in Lösung	42
Abbildung A5: Verhältnis PFHpA im Feststoff und in Lösung	42
Abbildung A6: Verhältnis PFOA im Feststoff und in Lösung	43
Abbildung A7: Verhältnis PFNA im Feststoff und in Lösung	43
Abbildung A8: Verhältnis PFDA im Feststoff und in Lösung	44
Abbildung A9: Verhältnis PFBS im Feststoff und in Lösung	44
Abbildung A10: Verhältnis PFOS im Feststoff und in Lösung	45

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A1: Auswertung: Einteilung der Bodenproben in Verwertungsklassen	46
Tabelle A2: Rohdaten der Begleitparameter	47
Tabelle A3: PFAS-Gehalte im Feststoff	52
Tabelle A4: PFAS-Gehalte im 2:1 Eluat	59
Tabelle A5: PFAS-Gehalte in ausgewählten Oberbodenproben	65

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Bearbeitung	Mareike Mersmann Dieser Bericht ist im Rahmen des Zielvereinbarungsprojektes „Hintergrundgehalte und -werte von PFAS in Böden ländlicher Gebiete in Nordrhein-Westfalen“ im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen entstanden. Beteiligt waren u.a. der Geologische Dienst NRW (Probenahme, Probenvorbereitung und Probencharakterisierung), das DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe (PFAS-Analytik) und die Unteren Bodenschutzbehörden des Landes NRW sowie die Landwirtschaftskammer NRW (Flächenbereitstellung).
Stand	Dezember 2023
Veröffentlichung	Februar 2024
Titelbild	LANUV/Oberhäuser
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de