



Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen

 Ergebnisse aus drei Untersuchungsphasen



Baden-Württemberg

Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen

 Ergebnisse aus drei Untersuchungsphasen

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de Referat 22 – Boden, Altlasten Christian Bierreth, Peter Dreher, Thomas Nöltner, Helena Salowsky, Ann-Kathrin Seeger
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 22 – Boden, Altlasten Christian Bierreth, Peter Dreher, Thomas Nöltner, Helena Salowsky, Ann-Kathrin Seeger
BEZUG	https://pd.lubw.de/10215
STAND	Juli 2021
SATZ UND BARRIEREFREIHEIT	Satzweiss.com Print Web Software GmbH Mainzer Straße 116 66121 Saarbrücken
AUFLAGE	1. Auflage
TITELBILD	Beprobungen von Bodendauerbeobachtungsflächen; Bilder: Harry Hohl, LUBW
ABBILDUNGSNACHWEIS	siehe Abbildungsverzeichnis
ZITIERVORSCHLAG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2021): Sachstandsbericht: PFAS – in Böden von Bodendauerbeobachtungsflächen, 1. Auflage, Karlsruhe

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG		6
1	VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	7
2	MATERIAL UND METHODEN: BEPROBUNGEN 2016 – 2019, PHASEN 1 – 3	8
2.1	Standortauswahl	8
2.2	Probenahme	8
2.3	Probenaufbereitung, Analytik	9
2.4	Auswertung, Berechnung der Quotientensumme	9
3	PHASE 1: UNTERSUCHUNGEN AN RÜCKSTELLPROBEN AUS DER BODENPROBENBANK	11
3.1	Untersuchungsziel, Vorgehensweise	11
4	PHASE 2: ERWEITERUNG DES STANDORTKOLLEKTIVS, EINFLUSS DER PROBENTROCKNUNG, HISTORISCHE PROBEN	12
4.1	Untersuchungsziel, Vorgehensweise	12
4.2	Ergebnisse	13
4.2.1	Feststoffgehalte	13
4.2.2	Wässrige Eluate – Vergleich feldfrisch/trocken	13
4.2.3	Historische Proben	15
5	PHASE 3: ERWEITERUNG DES STANDORTKOLLEKTIVS, HORIZONT- UND TIEFENVERTEILUNG, WEITERE HISTORISCHE PROBEN	16
5.1	Untersuchungsziel, Vorgehensweise	16
5.2	Hauptnutzungsarten, Bodenhorizonte	16
5.3	Ergebnisse	17
5.3.1	Feststoffgehalte	17
5.3.2	Wässrige Eluate – Tiefenverteilung	17
5.3.3	Historische Proben	18
6	WEITERE UNTERSUCHUNGEN	20
6.1	Lysimeter Büchig	20
6.2	Pflanzenscreening Kraichgau	21
7	DISKUSSION/ZUSAMMENFASSEND E BETRACHTUNG	23
8	RELEVANZ FÜR DIE PRAXIS	25
9	LITERATUR UND QUELLEN	26
10	ABBILDUNGEN UND TABELLEN	27
10.1	Abbildungsverzeichnis	27
10.2	Tabellenverzeichnis	27

Zusammenfassung

Untersuchungen an unbelasteten Bodendauerbeobachtungsflächen in Baden-Württemberg zeigen, dass PFAS in Oberböden mehr oder weniger flächendeckend in sehr geringen Konzentrationen in wässrigen Eluaten nachgewiesen werden können. In den Bodeneluaten sind häufig PFOA, PFOS und kurzkettige Perfluorcarbonsäuren in geringen Konzentrationen analytisch bestimmbar. Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die Gehalte in den Bodeneluaten ab. Die Feststoffgehalte der Einzelsubstanzen liegen bei Acker- und Grünlandböden dabei in der Regel unter der analytischen Bestimmungsgrenze von 1 µg/kg, bei Waldböden und deren organischen Auflagen auch darüber. Nur selten sind in Böden ohne spezifischen PFAS-Eintrag Feststoffgehalte bei PFOA und/oder PFOS mit Gehalten um 1 µg/kg bestimmbar.

Die eingesetzten Elutionsverfahren (Säulenperkolationsverfahren, 2:1-Schüttelverfahren) sind bisher nicht für die Bestimmung von PFAS validiert. Unterschiedliche Untersuchungs- und Probenaufbereitungsmethoden haben Einfluss auf die bestimmbaren PFAS-Gehalte in Böden der untersuchten Bodendauerbeobachtungsflächen.

Nach den per Erlass vom 21. August 2018 in Baden-Württemberg eingeführten Beurteilungsmaßstäben wird bei ca. 25 % der untersuchten Bodendauerbeobachtungsflächen die Schwelle zur Prüfung, ob eine schädliche Bodenveränderung vorliegt, erreicht bzw. leicht überschritten.

1 Veranlassung und Zielstellung

In den letzten Jahren zeigten sich vermehrt Hinweise auf das Vorkommen von PFAS in Böden und anderen Umweltmedien fernab von spezifischen Eintragsbelastungen. Um zu prüfen, ob auch in bisher als unbelastet eingestufte Böden in Baden-Württemberg („Hintergrund-Böden“) Spuren von perfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) nachweisbar sind, werden seit 2016 landesweit Messflächen von Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) der LUBW auf PFAS untersucht. In bisher drei Beprobungs- und Untersuchungsphasen wurde das Probenkollektiv stetig vergrößert und es wurden verschiedene, insbesondere methodische Zusatzfragestellungen untersucht. Die Kenntnis der PFAS-Gehalte in Böden von Hintergrundstandorten ist von Interesse für die Abgrenzung von belasteten und unbelasteten Böden in bekannten Schadensfallgebieten, sowie für künftige regulatorische Festlegungen. Die entnommenen Proben verteilen sich auf die Hauptnutzungsarten Acker, Grünland und Wald, wobei auf diesen Flächen in der Regel die oberen Mineralbodenhorizonte, bei Waldflächen zusätzlich die organischen Humusaufgaben untersucht wurden.

Untersuchungen in 2016 erbrachten erstmals einen Überblick über die Größenordnung verbreiteter PFAS-Gehalte in Hintergrundböden, führten darüber hinaus jedoch zu weiteren Fragestellungen, die in anknüpfenden Untersuchungsphasen (2016 – 2019) geklärt wurden. Wesentliche Motivation der Fortführung und Erweiterung der ersten Untersuchungen an Hintergrundböden waren folgende Fragestellungen:

1. Da in der ersten Phase (Untersuchungen 2016) luftgetrocknete Rückstellproben von BDF aus der Bodenprobenbank der LUBW analysiert wurden, wurde zur Erweiterung des Standortkollektivs in der 2. Phase (Untersuchungen 2017) die Analytik von feldfrischen Proben mit getrockneten Aliquoten verglichen.
2. Von BDF mit unterschiedlichen Bodennutzungen wurden Proben aus verschiedenen Bodenhorizonten entnommen und auf PFAS untersucht (Phase 3, Untersuchungen 2018/2019). Damit sollte geklärt werden, ob an Hintergrundstandorten bereits eine Tiefenverlagerung der PFAS aus den oberen in die darunterliegenden Bodenhorizonte erfolgt war.
3. Zur Beurteilung der längerfristigen Entwicklung von PFAS-Gehalten in Böden konnten einige historische Proben (Rückstellproben der Universität Hohenheim) von Flächen verschiedener Nutzungsarten, die bereits von 1968 bis Mitte der 1970er-Jahre entnommen wurden, in die Untersuchungen einbezogen und mit aktuellen Proben verglichen werden.
4. Weitere Ergebnisse lieferte das Screening von Nutzpflanzen auf PFAS von Hintergrundstandorten.

Aktuell liegen Ergebnisse von insgesamt 106 Standorten vor. Hier ist von Böden ohne spezifische PFAS-Belastung auszugehen. Darunter befinden sich 51 BDF-Standorte. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse dar und nimmt eine Einstufung der Befunde nach den gültigen Bewertungsrichtlinien vor. Es werden die Ergebnisse von drei Untersuchungsphasen bis Ende 2020 zusammengefasst. Bei Vorliegen neuer Daten wird der Sachstandsbericht entsprechend fortgeschrieben.

2 Material und Methoden: Beprobungen 2016 – 2019, Phasen 1 – 3

2.1 Standortauswahl

Bei der Probenauswahl in der ersten Untersuchungsphase an Hintergrundböden (2016) wurde auf getrocknete Rückstellproben von BDF des Landes Baden-Württemberg zurückgegriffen. Dabei wurden einerseits verschiedene Bodennutzungen (Acker, Grünland, Wald) berücksichtigt, andererseits sollte die Probenauswahl repräsentativ für die unterschiedlichen Bodenformen des Landes sein. Auch bei den nachfolgenden Beprobungskampagnen 2017 (Phase 2) und 2018/2019 (Phase 3) wurde so bei der Standortauswahl vorgegangen.

2.2 Probenahme

Die Entnahme der feldfrischen Bodenproben erfolgte von langjährig beprobten BDF der LUBW. Sie werden von einer eingemessenen und durch im Boden versenkte Magnetite markierten Fläche von 400 m² (20 × 20 m) entnommen. Die Probenahme erfolgt i. d. R. mit dem Split-Tube-Bohrer

nach bodenkundlich angesprochenen Bodenhorizonten. Von der Fläche werden 20 rastermäßig verteilte Einstiche zu einer oder mehreren Mischproben (MP) vereint. Die Kennzeichnung erfolgt immer nach Anzahl der Mischproben z. B. MP 1 (bei einer Mischprobe) und dem beprobten Bodenhorizont z. B. 1 (oberster) Horizont MP 1/1 oder 2 (darunter folgender) Horizont MP 1/2. Bei Waldböden wurde zusätzlich die organische Auflage beprobt.

Die Proben werden vor Ort gewogen, der Skelettanteil (Steingehalt) wird visuell geschätzt. Die Probenahmemenge wird ggf. vor Ort reduziert (Riffelteiler, Kreuz in Kunststoffwanne (PE)). Die Bodenproben werden vor Ort in PE-Kunststoffwannen mit Nitrilhandschuhen grob manuell homogenisiert und danach in 1 L Braunglasflaschen mit alukaschiertem Deckel abgefüllt, gewogen, beschriftet und bei Lufttemperatur bis zum Ende der Probenahme gelagert.



Abbildung 2.1: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Ackerfläche, (Foto LUBW 2018)



Abbildung 2.3: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Waldfläche, (Foto LUBW 2016)



Abbildung 2.2: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Grünlandfläche, (Foto LUBW 2018)



Abbildung 2.4: Beprobung der Waldauflage einer Bodendauerbeobachtungs-Waldfläche, (Foto LUBW 2016)

Für von der Universität Hohenheim zur Verfügung gestellte „historische“, d. h. in den End-1960er bis 1970er Jahren entnommene Bodenproben lagen über die Art der Bewirtschaftung, Düngung, Pflanzenschutzmaßnahmen etc. keine detaillierten Informationen vor. Das Material selbst wurde im Probenlager der Universität über die gesamte Aufbewahrungszeit in Kunststoffbeuteln gelagert.

2.3 Probenaufbereitung, Analytik

Die Aufbereitung getrockneter Bodenproben erfolgt bei Raumtemperatur in offenen Kunststoffwannen (PE). Nach der Trocknung wird die Probe von Hand gemörsert und auf < 2 mm gesiebt. Bodenskelett und pflanzliche Bestandteile werden aussortiert, gewogen und separat in Kunststoffbeutel abgefüllt.

Feldfrische Bodenproben werden vor Ort homogenisiert, mit dem Teilkreuz separiert und in Braunglasflaschen abgefüllt.

Die Proben werden nach Anlieferung an die LUBW in Tiefkühlschränken bei -18°C eingefroren. Die eingefrorenen Proben werden dann zur Analytik überbracht und dort weiterverarbeitet. Die Effekte der unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden sind in LUBW 2021 beschrieben.

Die Bestimmung der PFAS-Feststoffgehalte der homogenisierten Bodenproben erfolgte nach DIN 38414-14. Die Herstellung der wässrigen Schütteluatete erfolgte gemäß DIN 19529 [2015] mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F-Verhältnis) von 2:1. Die eingesetzten Elutionsverfahren (DIN 19528, Säulenperkolationsverfahren [2009] und DIN 19529, 2:1-Schüttelverfahren [2015]) sind bisher nicht für die Bestimmung von PFAS validiert. Normgerecht wer-



Abbildung 2.5: Entnahme eines Bohrkerns aus dem Split-Tube-Bohrer, (Foto LUBW 2018)

den die Eluate mit unveränderten, d. h. feldfrischen Proben hergestellt. Bei getrockneten Rückstellproben ist dies nicht möglich. Um mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Probenvorbereitung auf die Analysergebnisse festzustellen, wurden einige frisch entnommene Proben aliquotiert und feldfrisch sowie luftgetrocknet für die Analyse aufbereitet. Die analytischen Bestimmungsgrenzen lagen bei 1 µg/kg je PFAS-Einzelstoff für die Feststoff- und bei 0,001 µg/l für die Eluatproben. Alle chemisch-analytischen Untersuchungen der Bodenproben sowie der Wasser- und Pflanzenproben im Rahmen weiterer Untersuchungen einschließlich erforderliche Probenvorbereitungen erfolgten am TZW: Technologiezentrum Wasser des DVGW in Karlsruhe.

2.4 Auswertung, Berechnung der Quotientensumme

Zur Bewertung der Ergebnisse der Feststoff- und Eluatanalysen wurden sowohl die gemessenen Konzentrationen der PFAS Einzelstoffe, die Summe der Konzentrationen der 20 analysierten PFAS (Tabelle 2.1) sowie die Quotientensumme herangezogen, die mit Erlass des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg vom 21. August 2018 zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers durch per- und polyfluorierte Chemikalien eingeführt wurde.

Tabelle 2.1: Analysierte PFAS

Perfluorbutanoat	(PFBA)
Perfluorpentanoat	(PFPA)
Perfluorhexanoat	(PFHxA)
Perfluorheptanoat	(PFHpA)
Perfluoroktanoat	(PFOA)
Perfluorononanoat	(PFNA)
Perfluordekanoat	(PFDA)
Perfluorundekanoat	(PFUnA)
Perfluordodekanoat	(PFDoA)
Perfluorbutansulfonat	(PFBS)
Perfluorpentansulfonat	(PFPeS)
Perfluorhexansulfonat	(PFHxS)
Perfluorheptansulfonat	(PFHpS)
Perfluoroktansulfonat	(PFOS)
Perfluordekansulfonat	(PFDS)
Perfluoroktansulfonamid	(PFOSA)
7H-Dodekafluorheptanoat	(HPFHpA)
2H,2H-Perfluordekanoat	(H2PFDA)
2H,2H,3H,3H-Perfluorundekanoat	(H4PFUnA)
1H,1H,2H,2H-Perfluoroktansulfonat	(H4PFOS)

Unterschreitet die Quotientensumme den Wert von 1, ist für ein Grund- oder Sickerwasser keine Gefährdung zu besorgen.

Die Quotientensumme ist ein Bewertungsindex, der sich als Summe aller Quotienten aus gemessener Konzentration und stoffspezifischen Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS-Werten) ergibt. In Anlehnung an die Technischen Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 402 [BAuA, 2010], wird für jede analysierte Konzentration der Quotient aus diesem Wert und dem jeweiligen GFS-Wert gebildet. Die GFS-Werte (Tabelle 2.2) sind humantoxikologisch begründet und entsprechen den Leitwerten, die durch das Umweltbundesamt für sieben PFAS festgelegt wurden. Bei Einhaltung der Leitwerte im

Trinkwasser wird davon ausgegangen, dass auch bei lebenslanger Aufnahme kein gesundheitliches Risiko besteht.

Für sieben weitere PFAS, für die die toxikologische Datenbasis nicht ausreichend ist, um Leitwerte festzulegen, wurden durch das Umweltbundesamt gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) festgelegt. Die GOW wurden in Baden-Württemberg als vorläufige GFS-Werte übernommen. In die Berechnung der Quotientensumme gehen nur die PFAS ein, für welche ein GFS-Wert festgelegt wurde. PFAS, für die nur vorläufige GFS-Werte festgelegt wurden, werden bei der Berechnung der Quotientensumme nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.2: Geringfügigkeitsschwellen- (GFS) und gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) für PFAS [LAWA, 2017]

Nr.	PFAS	GFS-Wert in µg/L	GOW in µg/L
1	PFBA Perfluorbutansäure	10,0	
2	PFPeA Perfluorpentansäure		3,0
3	PFHxA Perfluorhexansäure	6	
4	PFHpA Perfluorheptansäure		0,3
5	PFOA Perfluoroktansäure	0,1	
6	PFNA Perfluornonansäure	0,06	
7	PFDeA Perfluordecansäure		0,1
8	PFBS Perfluorbutansulfonsäure	6	
9	PFHxS Perfluorhexansulfonsäure	0,1	
10	PFHpS Perfluorheptansulfonsäure		0,3
11	PFOS Perfluoroktansulfonsäure	0,1	
12	H4PFOS 6:2 Fluortelomersulfonsäure		0,1
13	PFOSA Perfluoroktansulfonamid		0,1
	weitere per- und polyfluorierte Substanzen, z. B. GenX, ADONA, u. a.		jeweils 1,0



3 Phase 1: Untersuchungen an Rückstellproben aus der Bodenprobenbank

3.1 Untersuchungsziel, Vorgehensweise

Bei der ersten Untersuchung in 2016 wurde ausschließlich auf getrocknete Rückstellproben der Bodenprobenbank der LUBW zurückgegriffen, weil damals kurzfristig ein erster Überblick über mögliche PFAS-Gehalte in Böden an Hintergrundstandorten gewonnen werden sollte [LUBW 2016]. Seither werden landesweit Messflächen von Bodendauerbeobachtungsflächen der LUBW auf PFAS untersucht. Die Untersuchung von 28 luftgetrockneten Rückstellproben von Acker-, Grünland- und Wald-BDF ergab bei den Feststoffgehalten folgende Differenzierung: Waldböden, insbesondere die organischen Auflagehorizonte enthielten durchgängig PFAS bis maximal 8 µg/kg in der Summe, hauptsächlich PFOS, untergeordnet auch PFOA und H4PFOS. An einigen Acker- und Grünlandstandorten wurden sehr geringe Gehalte in Höhe der analytischen Bestimmungsgrenze (1 µg/kg) oder darunter für die Einzelsubstanz PFOS, an einigen Waldstandorten zusätzlich auch für PFOA nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der ersten Phase sind in LUBW [2016] ausführlich beschrieben. Ein zusammenfassendes Ergebnis der Eluatuntersuchungen zeigt Abbildung 3.1. Die höchste Konzentration einer Einzelsubstanz ergab sich bei PFBA mit 0,47 µg/l. Die Konzentrationen der weiteren 19 PFAS lagen zwischen < 0,001 µg/l und 0,19 µg/l. Auch im Median der Werte liegen die Eluatkonzentrationen von PFBA als Einzelsubstanz deutlich über den Konzentrationen weiterer PFAS. Die PFAS-Summe im Eluat lag im Mittel bei 0,2 µg/l in den Ackerböden, bei 0,3 µg/l in den Grünlandböden und bei 0,6 µg/l in den Waldböden.

In den Eluaten wurden vor allem kurzkettenige PFAS sowie PFOA und PFNA nachgewiesen. PFBA als Einzelstoff führt aufgrund des höheren Geringfügigkeitsschwellenwertes (Tabelle 2.2) zu keiner Bewertungsrelevanz. Bei Bildung der Quotientensumme tragen in den Eluaten der Böden insbesondere die Gehalte an PFOA zum Ergebnis maßgeblich bei, z. T. auch die von PFOS und PFNA.

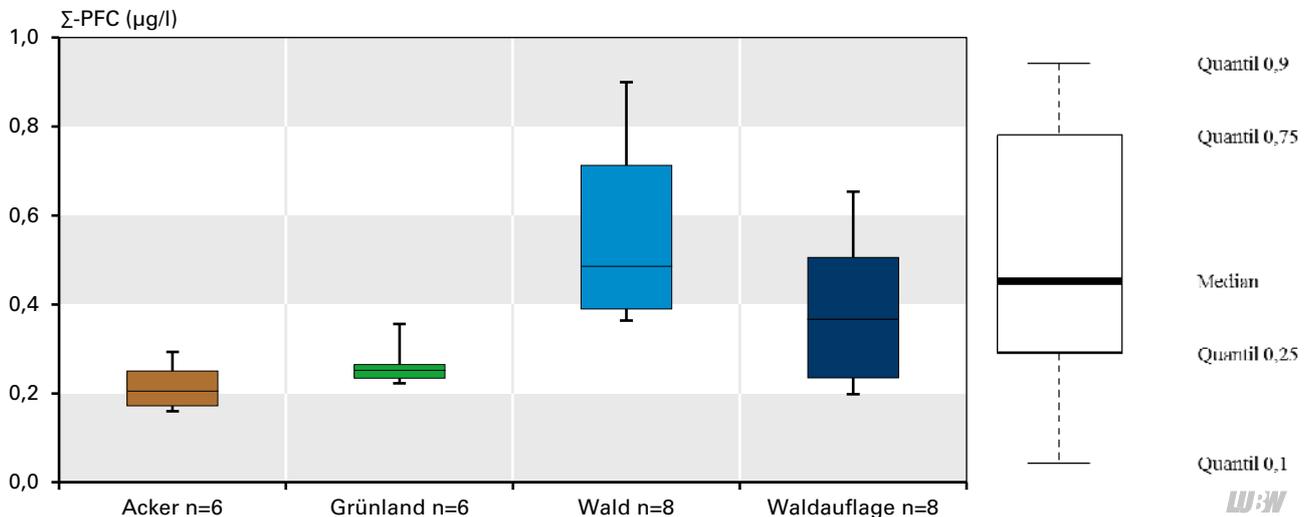


Abbildung 3.1: PFAS Summenkonzentrationen im Eluat der Proben der ersten Untersuchungsphase (LUBW 2016)

4 Phase 2: Erweiterung des Standortkollektivs, Einfluss der Probentrocknung, Historische Proben

4.1 Untersuchungsziel, Vorgehensweise

Zur Verifizierung der Erkenntnisse über die ubiquitäre Nachweisbarkeit von PFAS in Böden von BDF und Klärung weiterer Fragen aus den Untersuchungen der ersten Phase wurden durch die LUBW weitere Untersuchungen veranlasst. Da in der ersten Phase die kurzfristig verfügbaren luftgetrockneten Rückstellproben von BDF aus der Bodenprobenbank der LUBW analysiert wurden, sind weitere Untersuchungen mit folgenden Zielen durchgeführt worden:

- Erweiterung des BDF-Standortkollektivs (alle Bodennutzungen)
- Klärung ob unterschiedliche Probenvorbereitungen (feldfrisch bzw. getrocknet für die Analytik vorbereitete Proben) zu unterschiedlichen Ergebnissen führen

- Klärung ob unterschiedliche Probennahmezeitpunkte bei identischer Probenvorbereitung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen
- Untersuchung „historischer“, d. h. zwischen 1968 bis Mitte der 1970er-Jahre entnommener Bodenproben auf PFAS.

Neben 13 BDF-Flächen mit den Bodennutzungen Acker, Grünland und Wald (Abbildung 4.1) wurden drei „historische“ Rückstellproben von Ackerstandorten (getrocknet) untersucht, die in den Jahren 1969 – 1970 von der Universität Hohenheim zu Studienzwecken entnommen wurden.

Insgesamt liegen Analysenergebnisse von 13 feldfrischen und 13 getrockneten Proben vor. Es handelt sich um 21 Oberbodenproben und 5 Auflagenhorizonte von Waldböden. Von einem Waldstandort lagen nur getrocknete Proben vor.

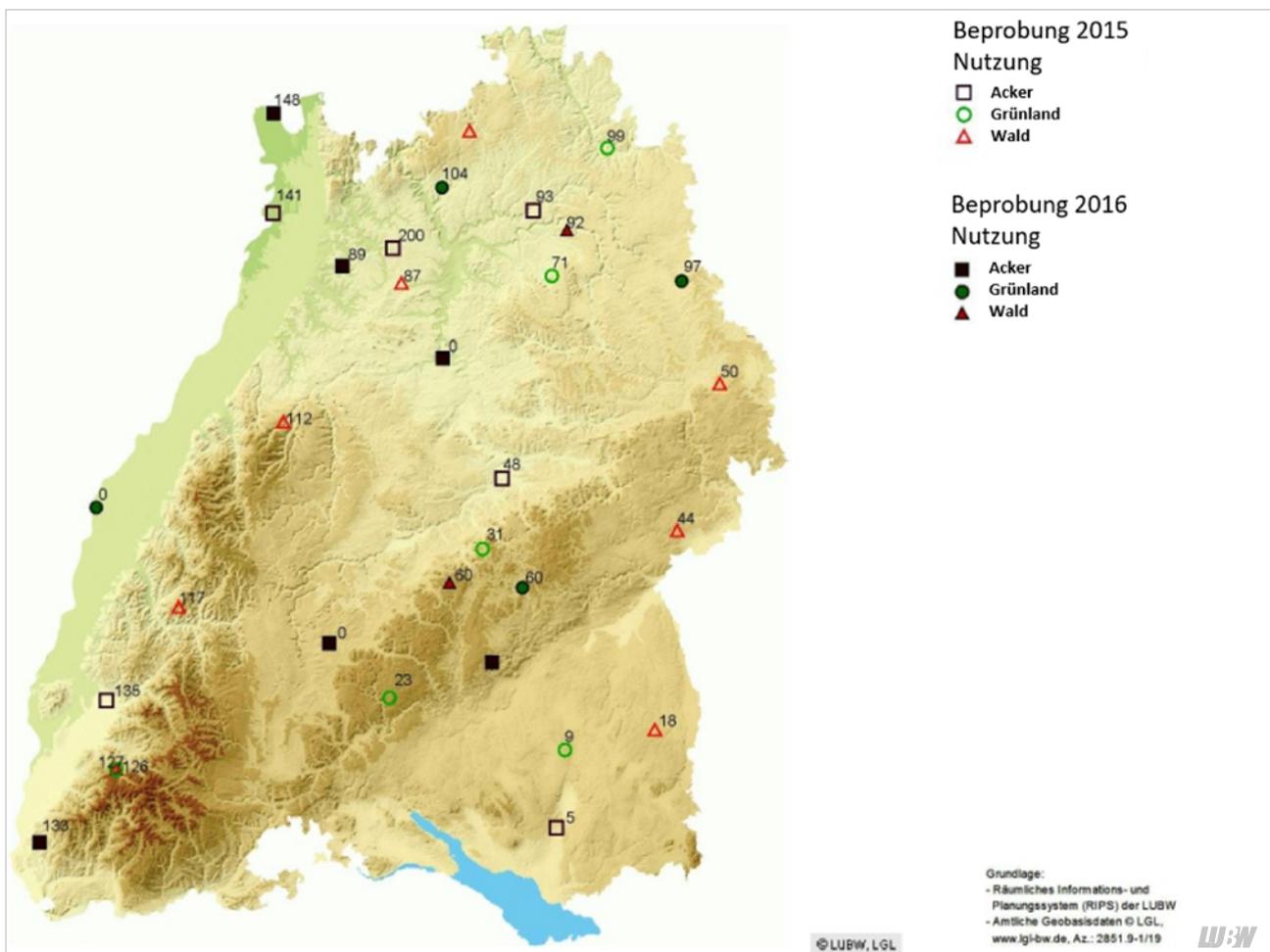


Abbildung 4.1: Probenahmestandorte Untersuchungsphasen 1 und 2

4.2 Ergebnisse

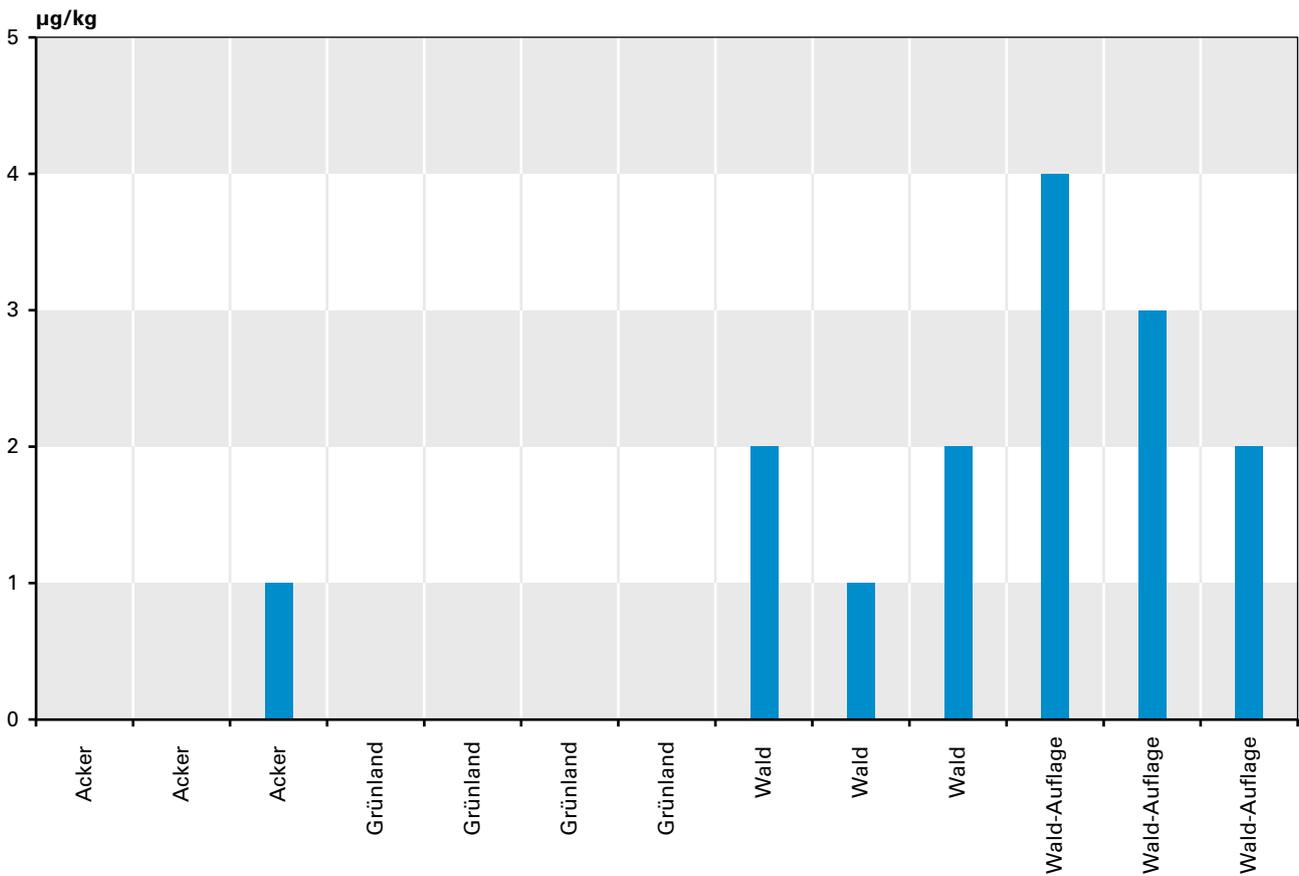
4.2.1 Feststoffgehalte

Die Feststoffgehalte der Acker- und Grünlandstandorte lagen mit der Ausnahme eines Ackerstandorts (PFOS 1 µg/kg) unterhalb der Bestimmungsgrenze. Bei allen Bodenproben der Waldstandorte wurden PFAS nachgewiesen, mit einer Ausnahme ausschließlich PFOS im Bereich der einfachen und doppelten Bestimmungsgrenze, bei den Waldauflagen auch darüber (Abbildung 4.2). Bei einem Waldboden wurde PFOA im Bereich der Bestimmungsgrenze nachgewiesen.

4.2.2 Wässrige Eluate –

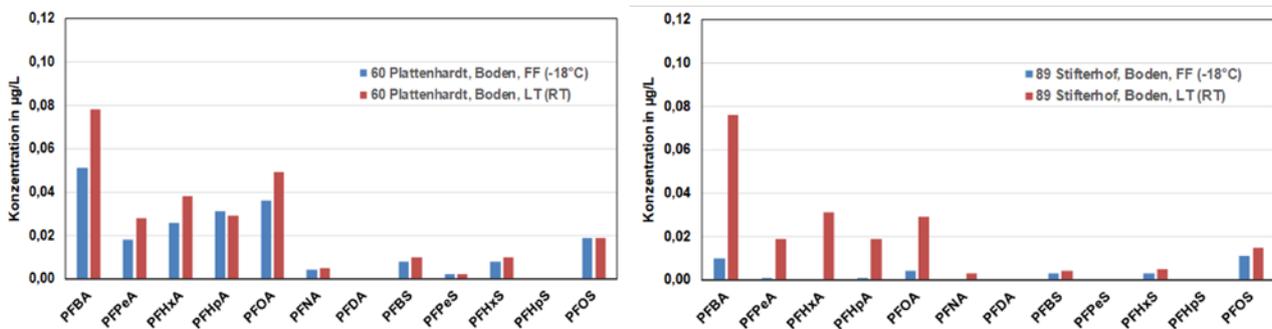
Vergleich feldfrisch/trocken

Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen zeigen, dass in allen Proben PFAS nachgewiesen wurden, auch in denjenigen, in denen in Feststoffuntersuchungen keine PFAS bestimmbar waren. Bei den getrockneten Proben wurden höhere PFAS-Summenkonzentrationen bestimmt als bei den vom gleichen Standort gezogenen feldfrischen Proben (Abbildung 4.3). Dieser Effekt zeigte sich auch bei den Waldauflagen. Bei den Einzelverbindungen dominieren die kurzkettigen Carbonsäuren, sowie PFOA.



LUBW

Abbildung 4.2: Summe der PFAS-Feststoffgehalte in Böden der Bodendauerbeobachtungsflächen, Phase 2



LUBW

Abbildung 4.3: Vergleich der Eluatkonzentrationen an zwei Standorten mit unterschiedlicher Probenaufbereitung feldfrisch (FF)/trocken (LT) [LUBW 2021]

Das Stoffverteilungsmuster ist trotz unterschiedlicher Probenaufbereitung bei den untersuchten Standorten ähnlich wie die prozentuale Verteilung der untersuchten PFAS zeigt (Abbildung 4.4).

Ein Ackerstandort im Norden Mannheims (BDF Mannheim-Sandtorf), an den eine großflächige, mutmaßlich durch Kompostgaben verursachte PFAS-Belastung angrenzt, zeigte etwas höhere PFAS-Konzentrationen. Um

Prozentuale Verteilung

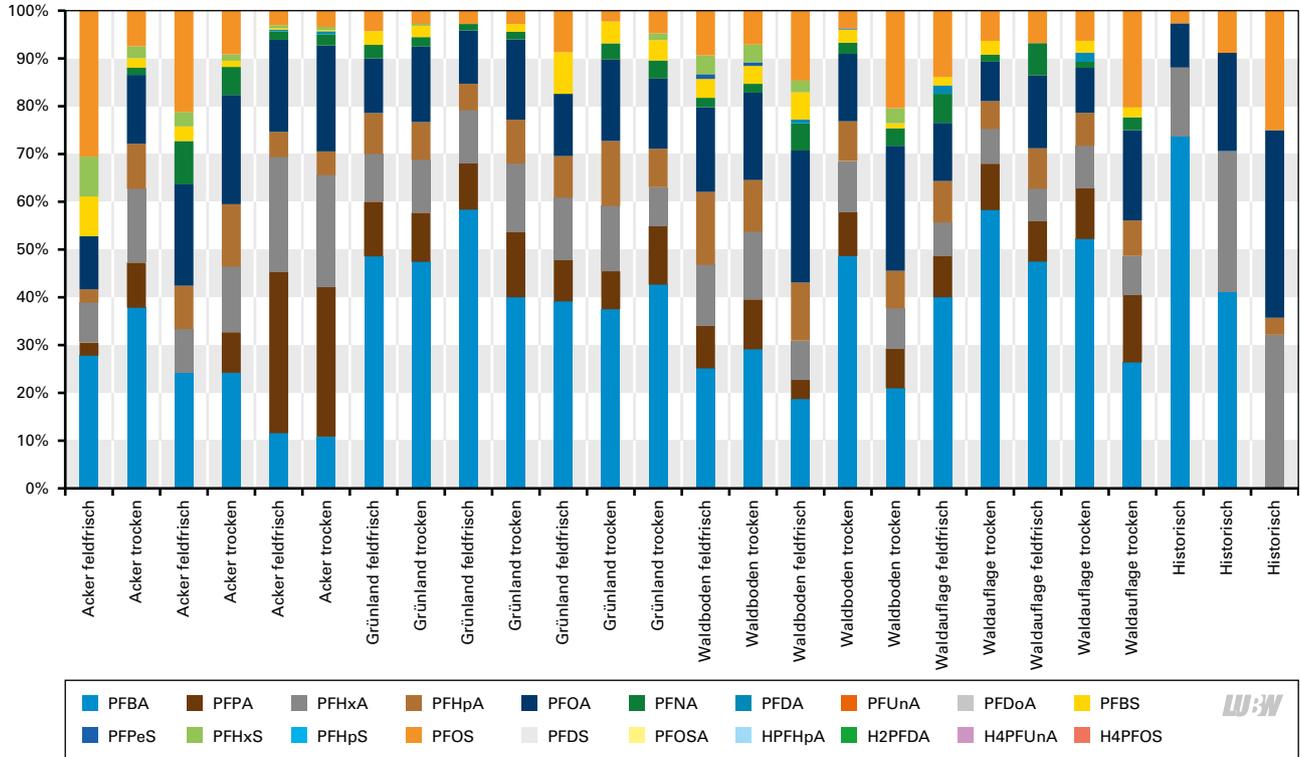


Abbildung 4.4: Prozentuale Verteilung der PFAS-Konzentrationen im Eluat bei unterschiedlicher Probenaufbereitung

Mannheim Sandtorf BDF 148

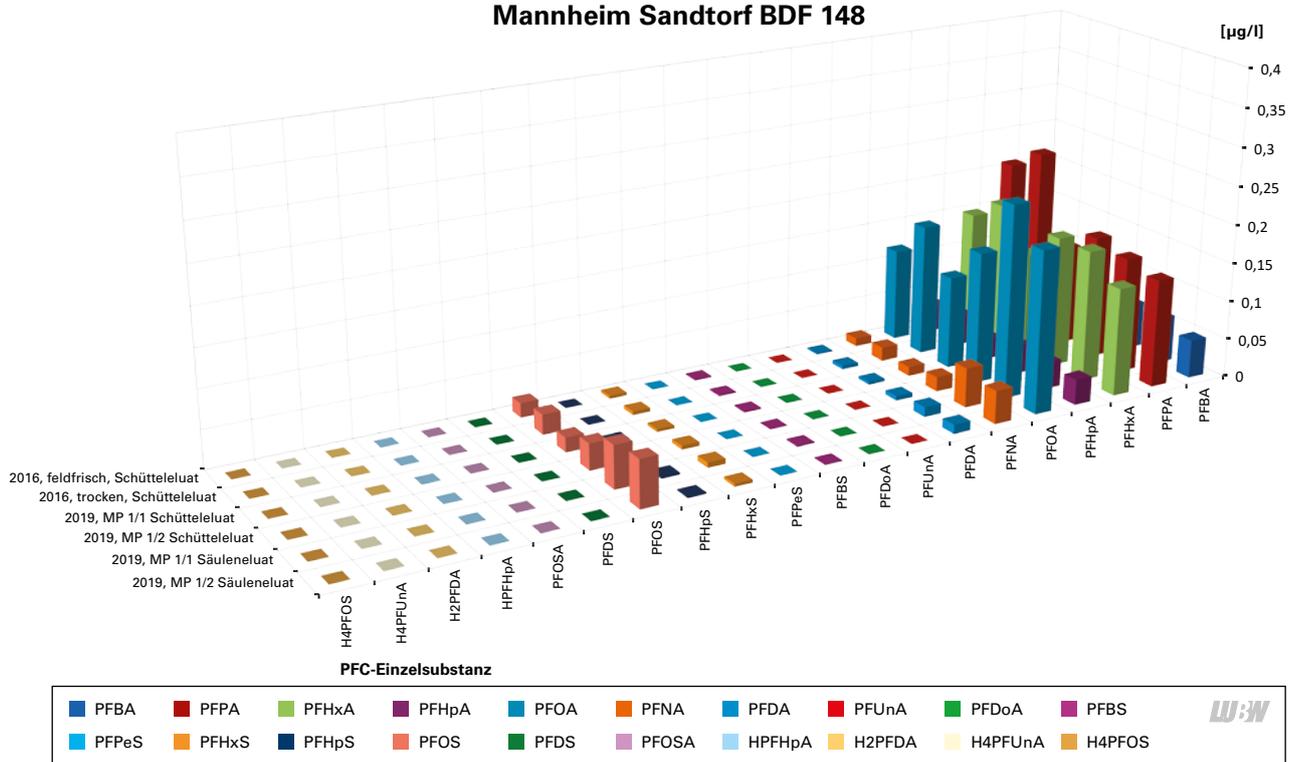


Abbildung 4.5: Beprobungen der Bodendauerbeobachtungsfläche Mannheim-Sandtorf in den Jahren 2016 und 2019

auszuschließen, dass Probenahme- und/oder Laborfehler zu den höheren PFAS-Gehalten bei dieser BDF geführt hatten, wurde die Probenahme 2019 wiederholt. Die Analytik erfolgte an feldfrischen Proben. Die Ergebnisse der damaligen und der erneuten Beprobung liefern vergleichbare Konzentrationen bei gleichem Stoffmuster der PFAS (Abbildung 4.5).

Die QS von 1 wurde bei zwei Standorten überschritten und bei einem Standort nahezu erreicht. Eine deutliche Überschreitung ist am Standort Mannheim-Sandtorf für beide Probenaufbereitungen (feldfrisch, trocken) und Probenahmetermine festzustellen. Eine weitere knappe Über-

schreitung der QS wurde bei der nur getrocknet vorliegenden Probe eines Waldstandortes (Intensiv-BDF Forst, LK Karlsruhe) festgestellt (Abbildung 4.6).

4.2.3 Historische Proben

Bei den „historischen“ Bodenproben der Universität Hohenheim lagen die Gehalte im Feststoff für alle PFAS-Verbindungen unter der analytischen Bestimmungsgrenze. Im 2:1 Schütteleluat wurden kurzkettige Carbonsäuren (PFBA, PFHxA, PFHpA), PFOA und etwas oberhalb der Bestimmungsgrenze PFOS nachgewiesen. Die Summe der PFAS variierten von 0,028 bis 0,076 µg/l. Die Quotientensumme lag zwischen 0,097 und 0,182.

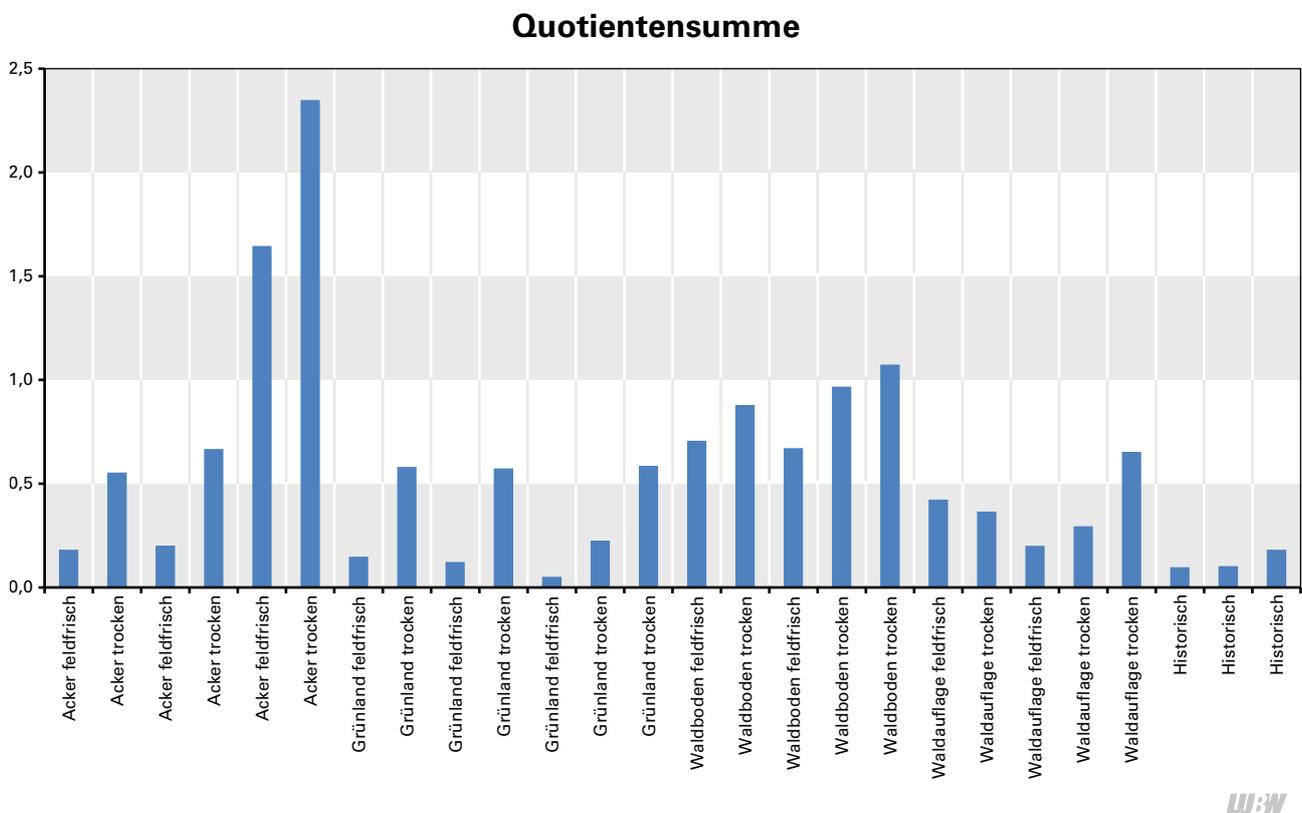


Abbildung 4.6: Quotientensummen an Bodenproben der Bodendauerbeobachtungsflächen, Phase 2



5 Phase 3: Erweiterung des Standortkollektivs, Horizont- und Tiefenverteilung, weitere historische Proben

5.1 Untersuchungsziel, Vorgehensweise

Nachdem aus den Untersuchungsphasen 1 und 2 Hinweise auf ubiquitär nachweisbare PFAS in Eluaten von Oberböden bestätigt wurden, sollte in einer weiteren Phase eine mögliche Tiefenverlagerung von PFAS im Boden untersucht werden. Hierzu wurden von weiteren BDF mit unterschiedlichen Bodennutzungen Proben aus verschiedenen Bodenhorizonten entnommen und auf PFAS untersucht.

5.2 Hauptnutzungsarten, Bodenhorizonte

2018 und 2019 wurden von 16 BDF (6 Acker-, 8 Grünland-, 2 Waldstandorte) horizontweise Bodenproben entnommen. Bei der Auswahl wurden die verschiedenen Hauptnutzungsarten berücksichtigt. Es wurden 6 Ackerstandorte (feldfrisch), 8 Grünlandstandorte (feldfrisch), 2 Waldstandorte, jeweils Boden und Auflage (feldfrisch) beprobt (Abbildung 5.1). Die Beprobungstiefe richtete sich nach den

bodenkundlichen Gegebenheiten und der vor Ort mit gängigen Probennahmewerkzeugen (Kapitel 2.2) möglichen Durchführbarkeit.

Von allen Standorten wurden Proben der humosen Oberbodenhorizonte entnommen. An einigen Standorten war die Beprobung des darunterliegenden Unterbodenhorizontes z. T. auch des 2. Unterbodenhorizontes möglich (Abbildung 5.1). Von 2 (steinreichen) Standorten konnten keine feldfrischen Unterbodenhorizonte gewonnen werden. Von diesen Standorten wurden für die Analytik getrocknete Rückstellproben verwendet. Insgesamt liegen Analyseergebnisse von 31 feldfrischen und 6 getrockneten Proben vor. Dabei handelt es sich um 20 Oberboden-, 17 Unterboden- (an zwei Standorten wurden jeweils zwei Unterbodenhorizonte beprobt) und 2 Auflagenhorizonte der Waldböden (Abbildung 5.2).

Beprobungstiefen der Bodenhorizonte

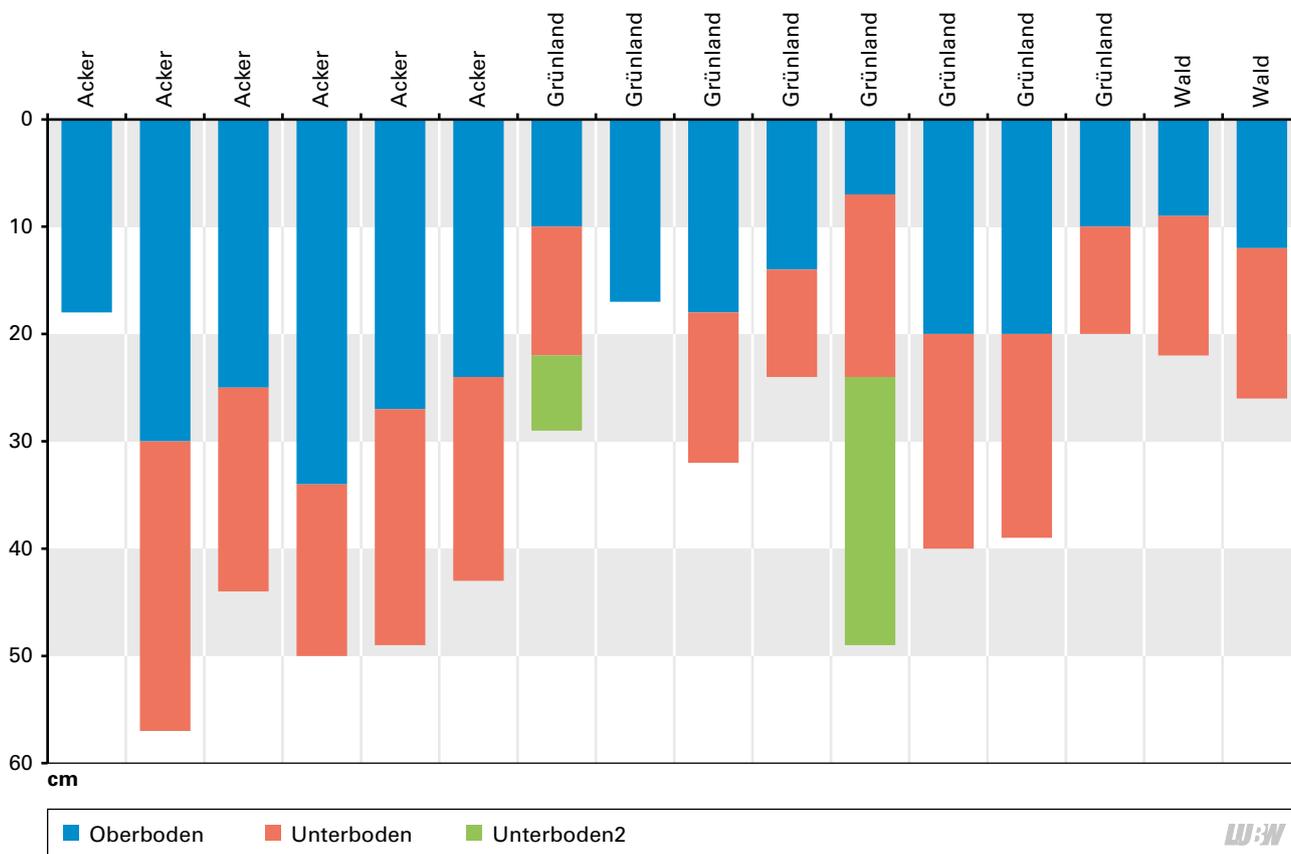


Abbildung 5.1: Beprobungstiefen der Bodenhorizonte; die unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten sind farblich gekennzeichnet

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Feststoffgehalte

An drei Ackerstandorten wurde PFOS mit 2 – 5 µg/kg, an zwei Ackerstandorten PFOA mit 1 – 2 µg/kg und an einem Ackerstandort PFHpA mit 1 µg/kg nachgewiesen. An einem Grünlandstandort wurden PFOS und PFOA mit jeweils 1 µg/kg (analytische Bestimmungsgrenze) gemessen. In der Humusaufgabe eines Waldstandorts lag der PFOS-Gehalt in der Waldhumus-Auflage bei 1 µg/kg, im humushaltigen Mineraloberboden bei 2 µg/kg.

5.3.2 Wässrige Eluate – Tiefenverteilung

Die Herstellung der wässrigen Schütteleuate erfolgte normgerecht von feldfrischen Proben. An einem Standort (Trocheltfingen mit drei Wiederholungen) war die Probenahme des Unterbodens nicht möglich. Hier erfolgte die Eluatherstellung mit getrockneten Rückstellproben aus der

Bodenprobenbank. Die analytische Bestimmungsgrenze der Einzelverbindungen lag bei 0,001 µg/l.

An 4 Acker-, 7 Grünland- und 2 Waldstandorten waren PFAS im humosen Oberboden nachweisbar. An 3 Acker-, 5 Grünland- und 2 Waldstandorten war dies, meist in geringeren Konzentrationen, auch im darunter folgenden Unterbodenhorizont der Fall. An einem Grünlandstandort waren PFAS noch im nächst tieferen zweiten Unterbodenhorizont nachweisbar. Unter den Einzelverbindungen dominieren kurzkettige Carbonsäuren, sowie PFOA und PFOS. Häufig waren auch PFBS und PFHxS nachweisbar. Die Eluate der Oberböden wiesen geringe PFAS-Summenkonzentrationen auf, vergleichbar mit den Ergebnissen der Phase 2. Die Eluatkonzentrationen der Unterböden sind mit wenigen Ausnahmen geringer als die der Oberböden (Abbildung 5.3).

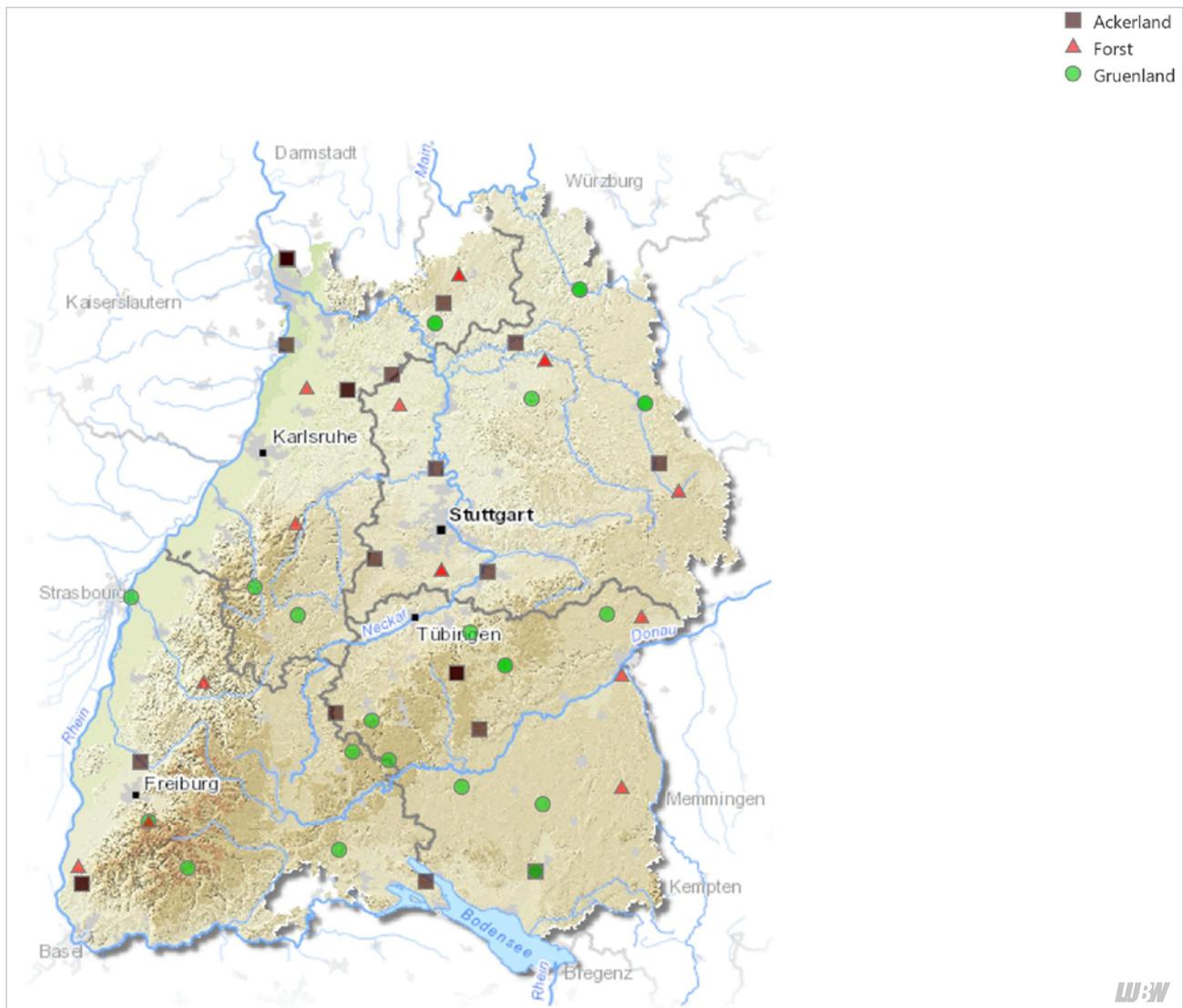


Abbildung 5.2: Probenahmestandorte während der Untersuchungsphasen 1, 2 und 3

Die QS von 1 wird in den Eluatproben dieser Beprobungskampagne an keinem Standort überschritten.

Eine Ausnahme bildet die Intensiv-BDF Trocheltfingen (Acker). Der Oberboden wurde geborgen und feldfrisch zur Analytik an das TZW übergeben. Vom Unterboden lagen nur getrocknete Rückstellproben aus der Bodenprobenbank der LUBW vor. Es zeigt sich, dass die Analytik bei allen drei Wiederholungen im 2:1 Schütteleuat bei den feldfrischen Oberboden-Proben signifikant niedrigere PFAS-Gehalte aufweisen als bei den getrockneten Proben (Abbildung 5.4). Eine Interpretation der Abbildung würde eine Verlagerung von PFAS in untere Bodenhorizonte andeuten, der Effekt ist allerdings auf die unterschiedliche Probenvorbereitung zurückzuführen. Es zeigt sich, dass die

Probenvorbereitung einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Der Standort wird wegen der nicht gegebenen Vergleichbarkeit bei der Probenaufbereitung nicht weiter betrachtet.

5.3.3 Historische Proben

Bei den historischen Proben wurde an einem Grünlandstandort PFOA im Feststoff mit 1 µg/kg und an einem Waldstandort mit 2 µg/kg gemessen. Im Eluat wurden in einer sehr niedrigen Größenordnung kurzkettinge Carbonsäuren (PFBA, PFHxA, PFHpA), PFOA sowie etwas oberhalb der Bestimmungsgrenze PFOS nachgewiesen. Die Summe der PFAS liegt zwischen 0,002 und 0,028 µg/l. Der Waldstandort hatte den von allen historischen Proben mit 0,002 µg/kg PFHpA niedrigsten PFAS-Gehalt im 2:1 Schütteleuat.

Vergleich Ober- und Unterboden PFC-Eluatsummen

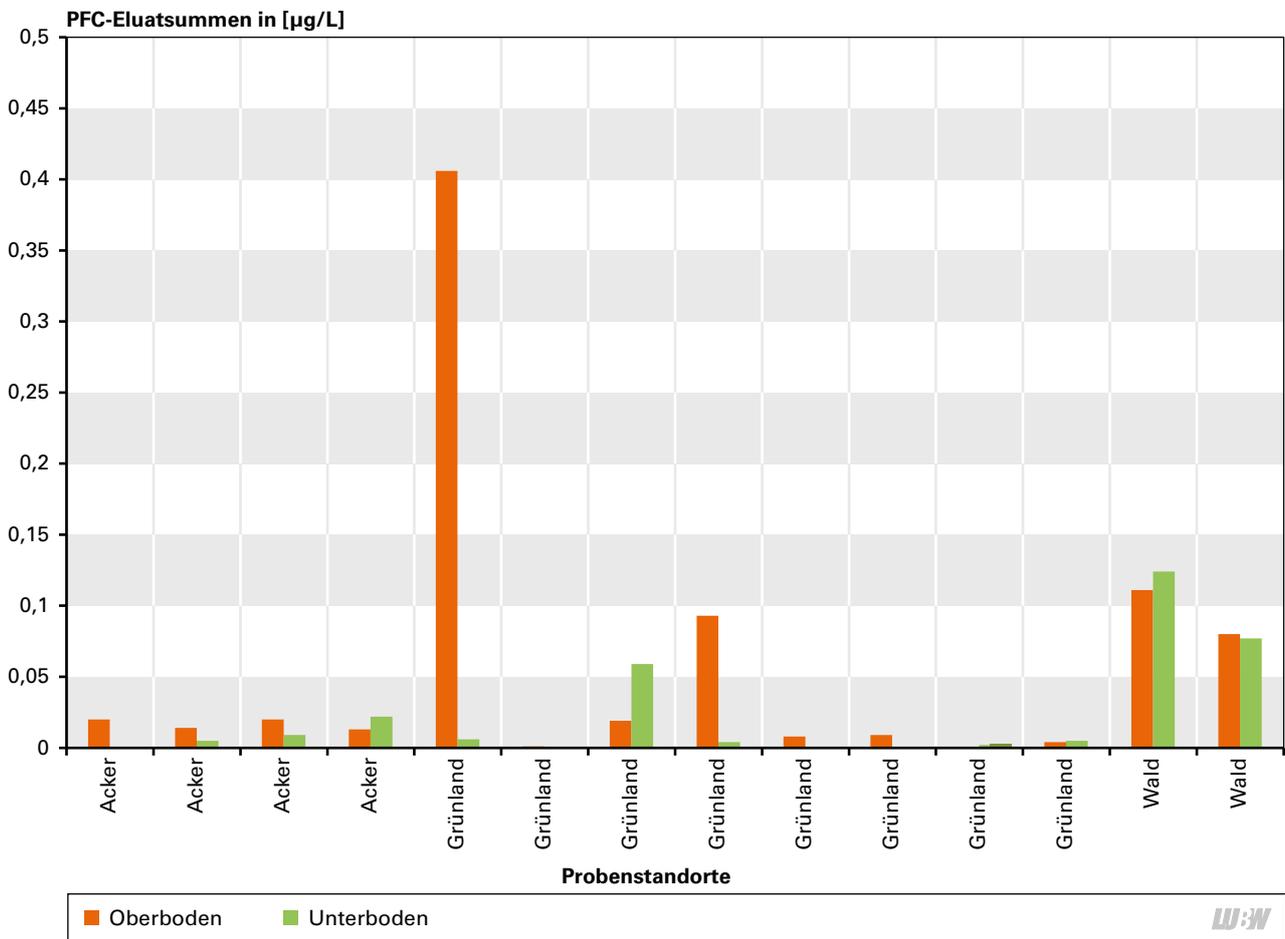


Abbildung 5.3: PFAS-Eluatsummen in Ober- und Unterböden

BDF Trochtelfingen

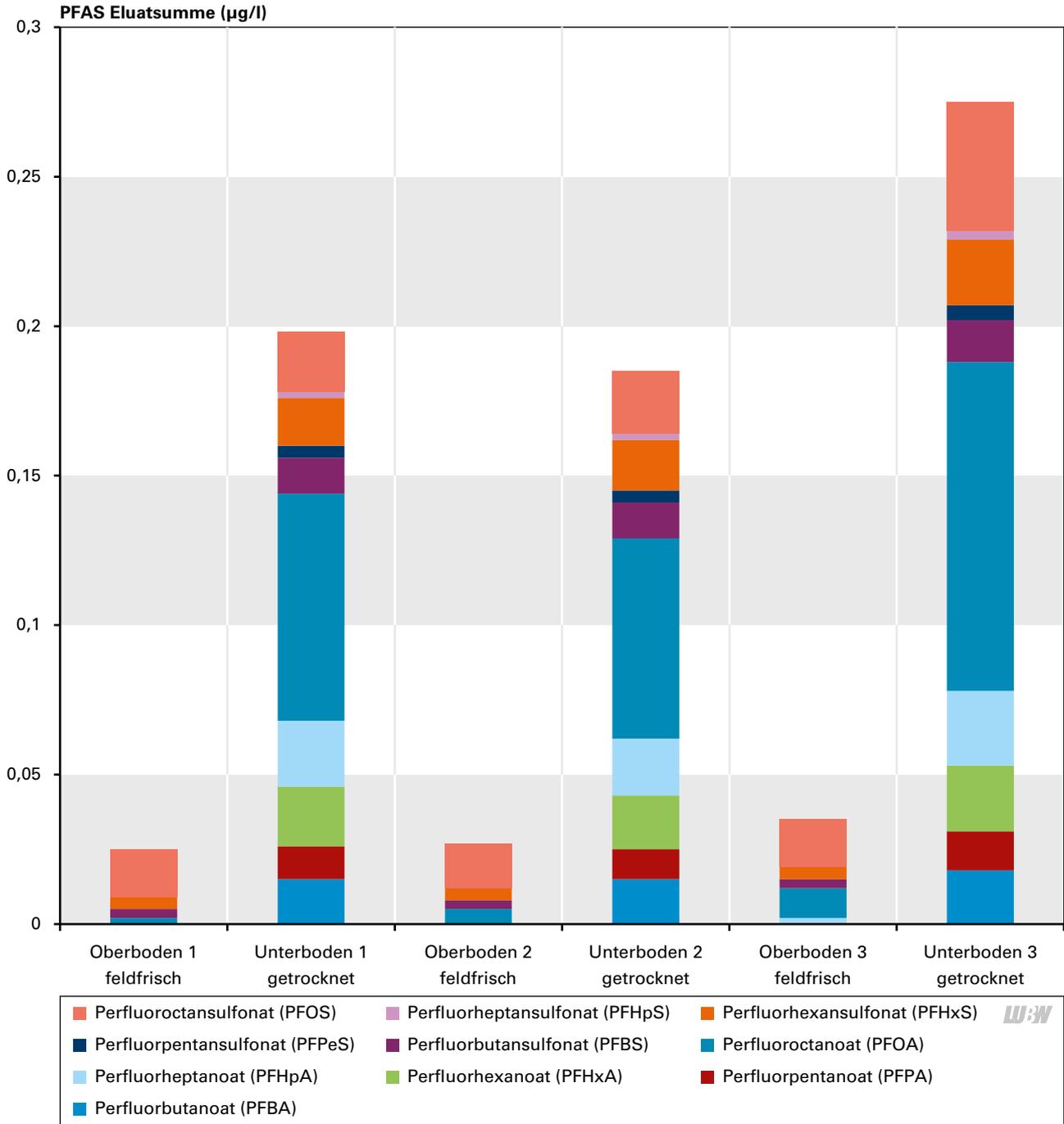


Abbildung 5.4: Einfluss der Probenaufbereitung im 2:1 Schüttel eluat. Die Eluate der feldfrischen Oberbodenproben weisen signifikant niedrigere PFAS-Gehalte auf als die Eluate der getrockneten Rückstellproben der Unterböden.

6 Weitere Untersuchungen

6.1 Lysimeter Büchig

Das Lysimetermessnetz von Baden-Württemberg wird zur Abschätzung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung eingesetzt. Die LUBW hat den ortsnahen Lysimeter-Standort Blankenloch-Büchig (LK Karlsruhe) zur Fragestellung des Verlagerungsverhaltens von PFAS an mutmaßlich unbelasteten Hintergrundstandorten genutzt. Es wurden sowohl Bodenproben vom Umfeld des Standortes (Abbildung 6.1) als auch Wasserproben aus drei Standard-Lysimetern (Lysimeter 2, Lysimeter 3, Lysimeter 5) gezogen und auf PFAS analysiert. Fragestellung war, ob Stoffströme – hier PFAS – an diesem Standort mit Bodengehalten korrespondieren. Beim Lysimeterstandort Büchig liegen im Oberboden und z. T. im Unterboden gestörte Bodenverhältnisse vor, die vermutlich im Zuge der Errichtung des Lysimeters vor ca. 40 Jahren entstanden sind.

Die Probenahme im November 2019 im Umfeld der Lysimeter erfolgte horizontweise (0 – 30, 30 – 60, 60 – 90 cm). Die Proben wurden geteilt. Ein Teil wurde im 2:1 Schüt-

teleluat, der andere Teil im Säulen-Perkolationsverfahren untersucht. Aus drei Kleinlysimetern (Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen) [2018] am Standort wurden Wasserproben aus einem Vorlagegefäß entnommen. Im Vergleich der Ergebnisse der Lysimeterproben mit denen der Elutions- bzw. Perkolationsverfahren zeigten sich etwas andere Ergebnisse, als diejenigen des Elutionsprojekts [2019]



Abbildung 6.1: Standort Lysimeter Büchig, (Foto LUBW 2019)

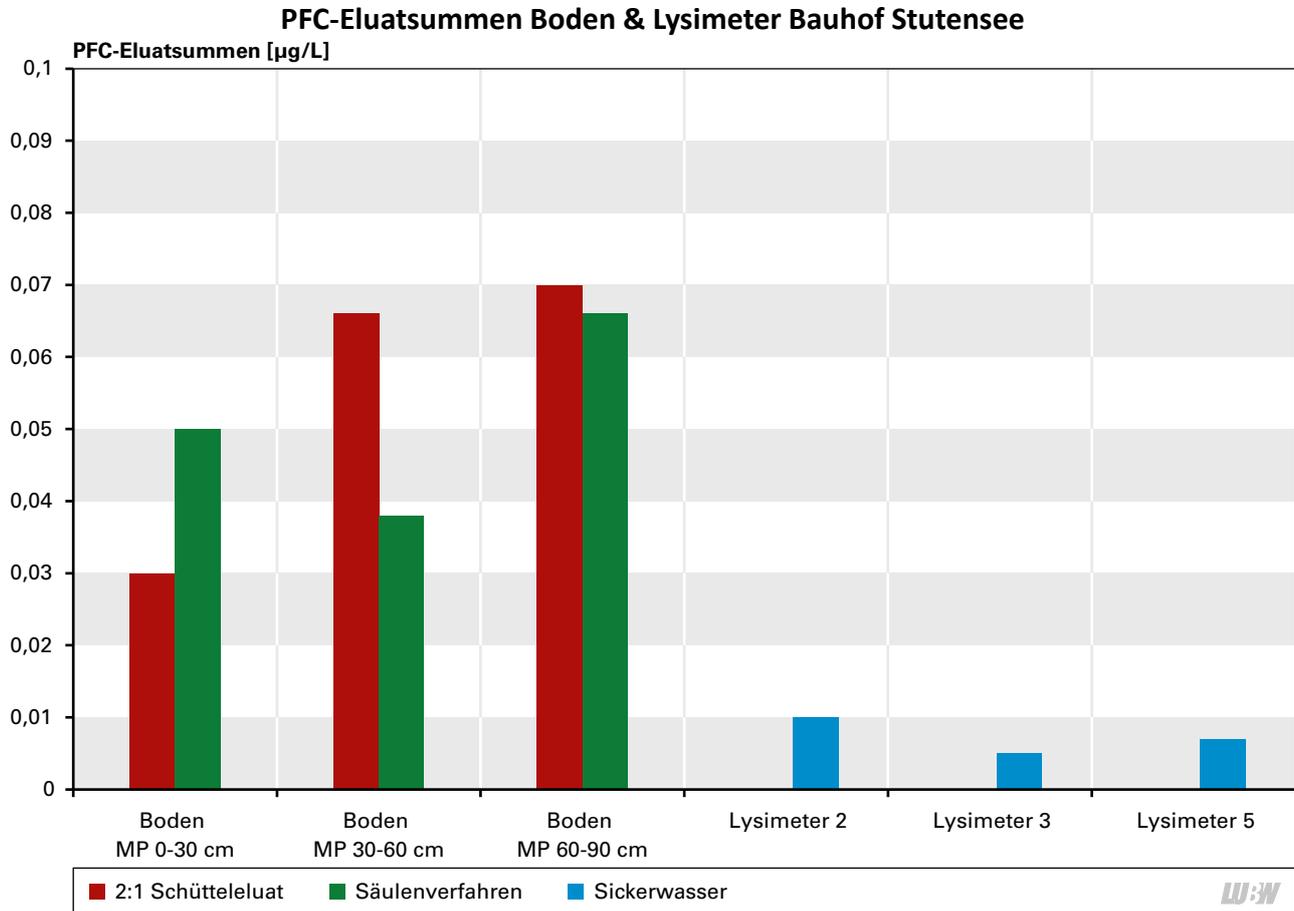


Abbildung 6.2: PFAS-Konzentrationen in Eluaten der Bodenproben und Sickerwasser der Lysimeter

der LUBW. Das 2:1 Schüttel eluat zeigt meist etwas höhere Konzentrationen als das Perkolationsverfahren (Abbildung 6.2).

Die Zusammensetzung der Einzelparameter entspricht den in den Hintergrundstandorten bei feldfrischer Probenaufbereitung vorgefundenen Parametern. In den Wasserproben der Lysimeter können PFAS in sehr niedriger Konzentration bis zu 10 ng/L nachgewiesen werden. Es liegen kurzkettige Carbonsäuren, PFOA, in einer Probe PFBS, jedoch kein PFOS vor.

6.2 Pflanzenscreening Kraichgau

In den Hochlastgebieten in Nord- und Mittelbaden werden von den örtlichen Behörden aus Gründen des Verbraucherschutzes Pflanzen von PFAS-Verdachtsflächen im sogenannten Vorerntemonitoring (VEM) untersucht, bevor sie zum Verzehr freigegeben werden. Das Ergebnis der Untersuchungen liegt erst mit zeitlicher Verzögerung vor, was für Landwirte und Gemüsebauer die Anbauplanung erschwert. Daher wurde auf Empfehlung der Landwirtschaftsverwaltung die Untersuchung von Pflanzen auf PFAS von Flächen, bei denen eine Verunreinigung mit PFAS nicht ausgeschlossen werden kann, zum Zeitpunkt der Probenahme jedoch noch nicht bekannt ist, durchgeführt.



Abbildung 6.3: Pflanzenscreening Kraichgau, (Foto LUBW 2019)

Die LUBW hat von zwei BDF im Kraichgau (Odenheim) und im Landkreis Rastatt (Aspichhof, Rittersbach) zur Orientierung ebenfalls Pflanzen (Mais und Weizen) beprobt und von diesen Hintergrund-Flächen Bodenproben entnommen (Abbildung 6.3, Abbildung 6.4).

Damit sollte der Frage nachgegangen werden, ob sich ubiquitär in geringen Konzentrationen im Boden vorhandene PFAS auch in anreichernden Nutzpflanzenteilen wiederfinden. Zur Probenvorbereitung wurden die Maispflanzen, an denen Boden anhaftete, gewaschen. Zur Kontrolle wurden auch die Pflanzen mit Bodenanhäufungen untersucht. Bei allen untersuchten Pflanzenproben waren im Feststoff (BG: 1 µg/kg) keine PFAS nachweisbar. Bei den zugehörigen Böden der Pflanzenstandorte waren im Feststoff ebenfalls keine PFAS nachweisbar. Bei allen beprobten Standorten wurden aus den entnommenen Bodenmaterialien Eluate sowohl nach dem 2:1 Schüttelverfahren als auch nach dem Säulen-Perkolationsverfahren hergestellt. Mit beiden Verfahren konnten PFAS an den beiden Standorten nachgewiesen werden. Das Perkolationsverfahren ergab bei den gleichen Bodenproben jeweils deutlich höhere PFAS-Konzentrationen (Abbildung 6.5).



Abbildung 6.4: Pflanzenscreening Kraichgau, (Foto LUBW 2019)

Vergleich 2:1 Schüttel eluat / Säulenperkolat

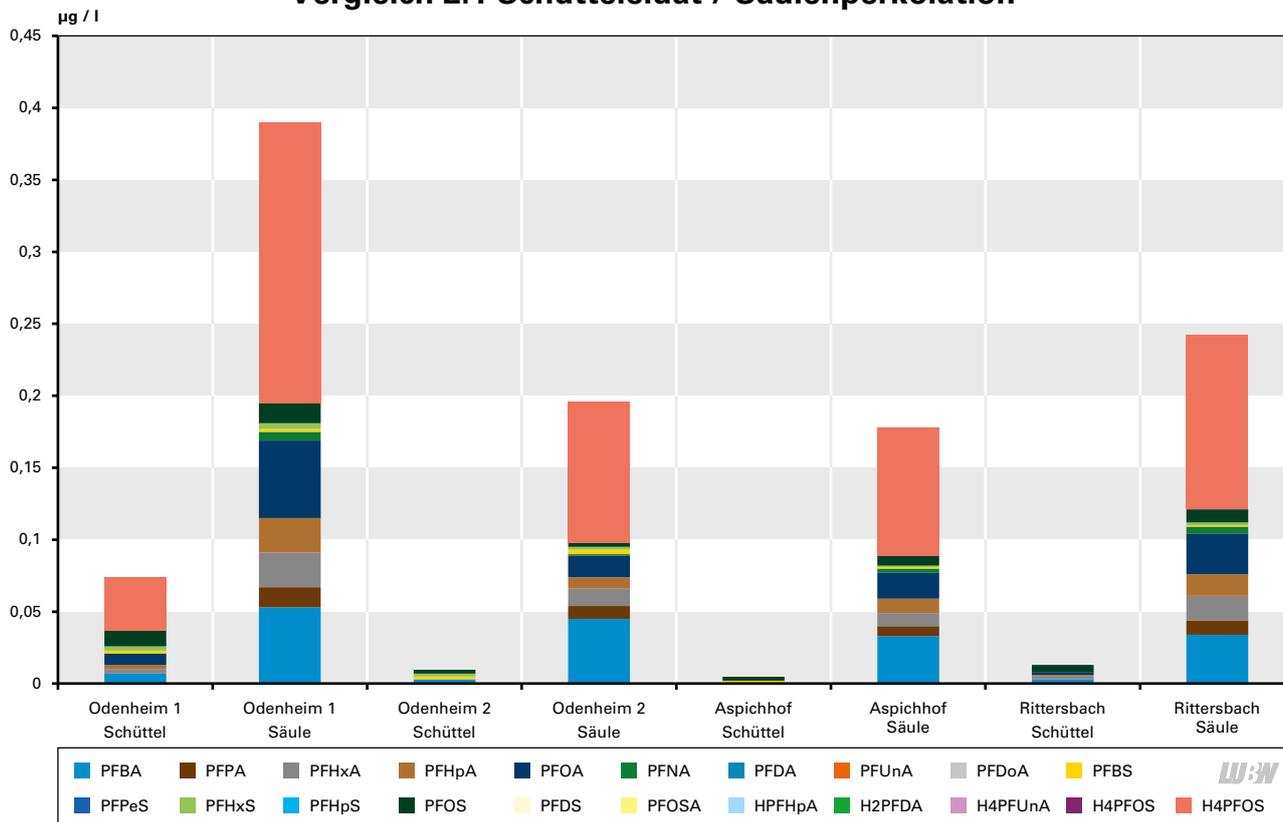


Abbildung 6.5: Vergleich PFAS-Konzentrationen bei verschiedenen Elutionsmethoden der Bodenproben

7 Diskussion/Zusammenfassende Betrachtung

Die Untersuchungen der LUBW für die geringer belasteten Böden der Hintergrundstandorte im landesweiten Bodenmessnetz belegen durchgängig bestimmbare, wenngleich sehr geringe Bodengehalte in Bodeneluat. In einzelnen Proben werden auch bei den Feststoffuntersuchungen Überschreitungen der Bestimmungsgrenze von 1 µg/kg nachgewiesen. Die nach aktuellem Stand der Technik noch zu hoch liegende Bestimmungsgrenze lässt eine flächendeckende Interpretation der Feststoffgehalte von BDF derzeit nicht zu.

Es zeigt sich in den 2:1 Schütteleluaten über alle 3 Phasen eine vergleichbare Verteilung der PFAS, unterschieden nach den Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald. Es dominieren kurzkettige Carbonsäuren und PFOA. In den historischen Proben sind ebenfalls kurzkettige Carbonsäuren

und PFOA nachweisbar, allerdings in deutlich niedrigeren Konzentrationen. Bei allen 3 Untersuchungsphasen lässt sich für das gesamte Probenkollektiv aus den BDF des Landes ableiten, dass bei den Ergebnissen große methodische Einflüsse erkennbar sind. Im 2:1-Schüttelverfahren zeigen Eluate der in den Jahren 2016 bis 2019 untersuchten Hintergrundböden unabhängig von den zuvor beschriebenen, gerichteten Unterschieden durch das Probenvorbereitungsverfahren i. d. R. Gehalte <0,5 µg/L (Abbildung 7.1).

Bei den Böden von Hintergrundstandorten zeigen auch die Ergebnisse für die summarische Belastung mit PFAS ein eindeutiges Bild (Abbildung 7.2): Für alle Proben wurden mit dem Säulenverfahren höhere Gesamtkonzentrationen erhalten als mit dem Schüttelverfahren [LUBW 2019].

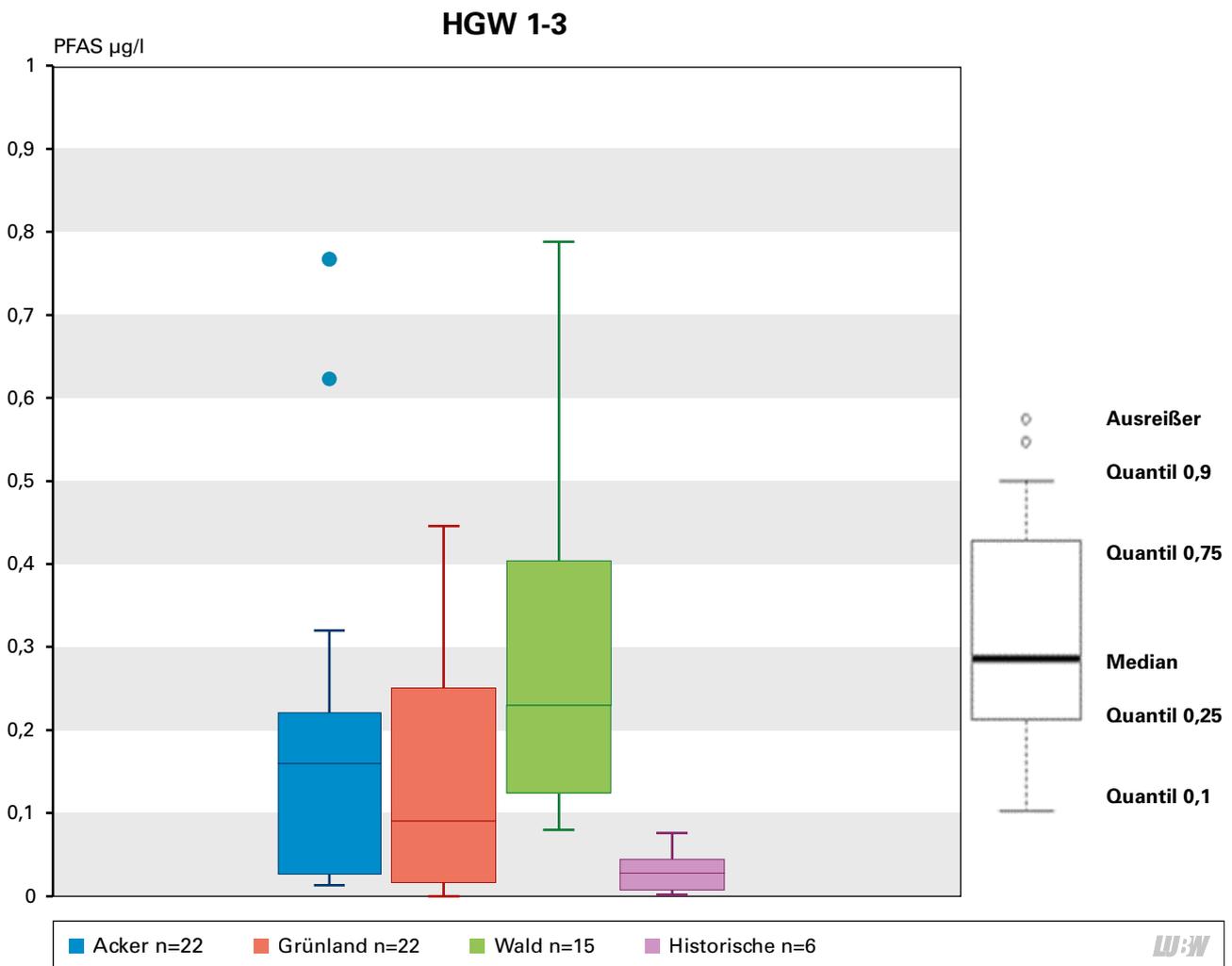


Abbildung 7.1: Summe PFAS im 2:1 Schütteleluat (mineralische Oberböden)

Auch aus Untersuchungen der Bundesanstalt für Materialforschung ergaben sich Hinweise, dass die Vergleichbarkeit von Schüttel- und Säulenperkolat für die Stoffklasse der PFAS nicht uneingeschränkt gegeben ist [KALBE 2018]. Vor diesem Hintergrund wurden im Auftrag der LUBW beim Technologiezentrum Wasser Ergebnisse systematischer Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Schüttel- und Säulenverfahren für die Stoffklasse der PFAS durchgeführt. In die Untersuchungen einbezogen wurden neben BDF auch Proben von bekannten belasteten Flächen. Aus den vorliegenden Untersuchungsdaten lassen sich derzeit keine Aussagen zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus Schüttel- und Säulenverfahren zur Ermittlung der Freisetzung der PFAS aus Bodenproben treffen. Bei höher belasteten Proben liefern beide Verfahren häufig vergleichbare Ergebnisse, teilweise ergab sich jedoch mit einem der beiden Verfahren eine signifikant höhere PFAS-Freisetzung. Insbesondere bei „Hintergrund-Böden“ führt das Säulenverfahren meist zu höheren Gehalten. Die bisher vorliegenden Daten erlauben es nicht, Zusammenhänge zwischen der Beschaffenheit der Böden, dem Belastungsprofil und den Ergebnissen der beiden Elutionsverfahren abzuleiten [LUBW 2021].

In LUBW [2021] sind alle methodischen Einflussfaktoren nochmals systematisch zusammengefasst. An wässrigen Boden-Eluaten zeigt sich deutlich, dass eine Trocknung der Bodenproben vor der Elution einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchungen hat, unabhängig von der Art der Trocknung, und z. T. bis zu ca. 10fach höhere PFAS-Konzentrationen im Eluat bestimmt werden als bei Proben, die feldfrisch untersucht werden [LUBW 2021].

Überschreitungen der QS von 1 sind vor allem bei den luftgetrockneten Proben aus den Phasen 1 und 2 vorzufinden. Bestätigt wird diese Einschätzung auch durch Untersuchungen, die im Zusammenhang mit Fragen der Kompost- und Klärschlammverwertung festgestellt wurden [LUBW 2017]. Auch an Proben der Waldstandorte der medienübergreifenden Umweltbeobachtung ist dies erkennbar [OSTERAUER 2018]. Ob bei den BDF des Landes ein Anteil an Vorläufersubstanzen der PFAS vorhanden ist, wurde bislang nicht untersucht. Auch die Frage, ob die Probenahme von gleichen Standorten nach einer Wartezeit von mehreren Jahren Unterschiede bei den PFAS-Gehalten und der -Zusammensetzung ergibt, wurde noch nicht eingehend untersucht.

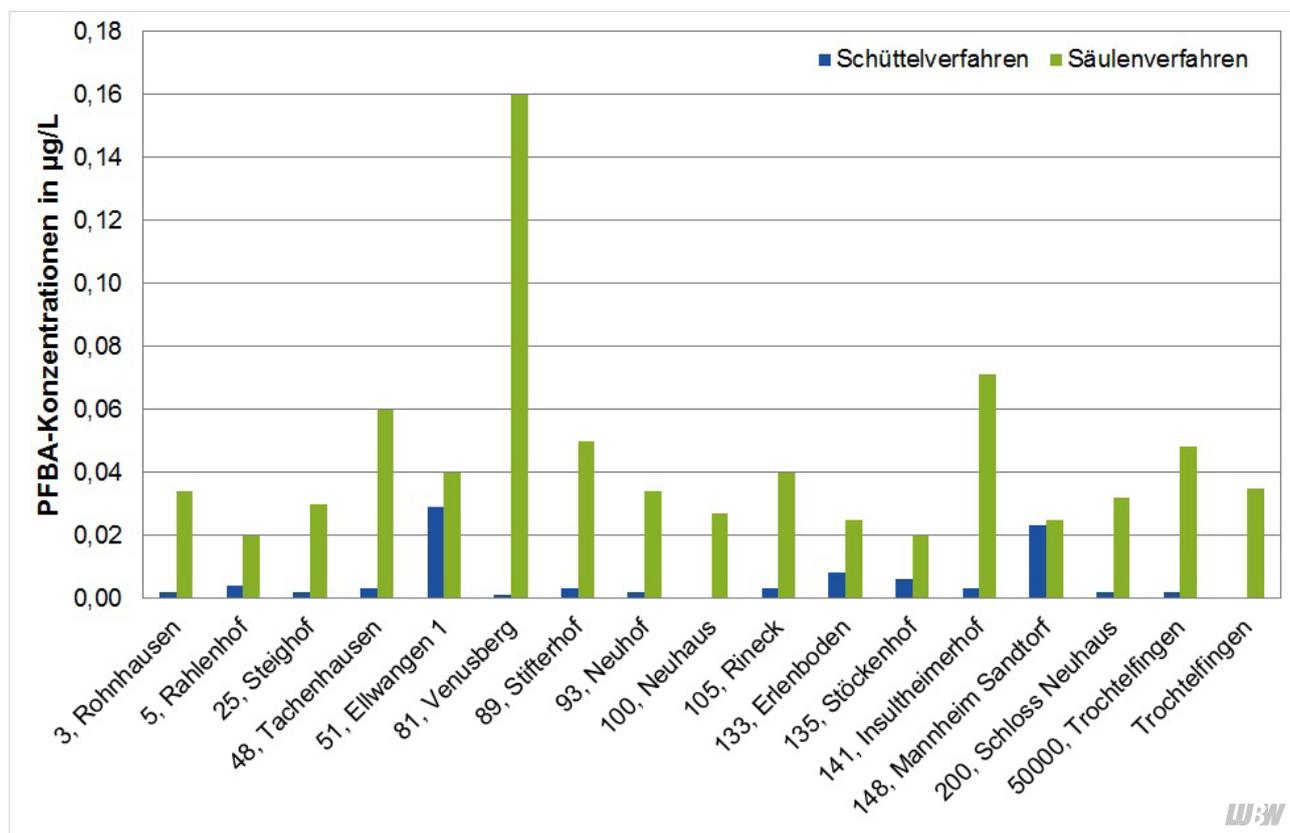


Abbildung 7.2: Summenkonzentrationen an PFAS in Schüttel- und Säuleneluaten, Böden aus Hintergrundstandorten [LUBW 2019]

8 Relevanz für die Praxis

Da bislang keine am Bodenschutzrecht orientierten Feststoffwerte festgelegt sind, wird allein das Sickerwasser-Kriterium herangezogen, um zu bewerten, ob eine schädliche Bodenveränderung zu besorgen ist bzw. vorliegt. Dies gilt bis auf Weiteres auch bei der Verwertung von Bodenmaterial zur Verfüllung von Abgrabungen. Für diese und für technische Bauwerke gilt ein Mindestabstand zur gesättigten Zone (Grundwasserspiegel) von einem Meter. Verfüllungen sind zusätzlich mit einer 2 Meter starken unbelasteten Bodenschicht zu versehen. Die der Einbauweise entsprechenden Materialwerte aus der Tabelle des Erlasses des UM vom 29.01.2016 sind einzuhalten. Darüber hinaus ist das gemeinsame Auftreten mehrerer PFAS-Kongenerere wie folgt zu bewerten:

Beim Erreichen oder Überschreiten der GFS-Werte wird dies als Hinweis auf eine schädliche Bodenveränderung bewertet, eine Einzelfallprüfung durchgeführt und daraufhin ggfs. Maßnahmen eingeleitet (z. B. Bewässerungsbeschränkungen für Anbauflächen).

Die meisten Messwerte von den beprobten BDF in Baden-Württemberg erreichen auf landwirtschaftlichen Flächen QS zwischen ca. 0,5 und 1, bei ca. 25 % der beprobten Flächen auch > 1 . Durch die Verabschiedung neuer, niedrigerer GFS-Werte der LAWA wären vermehrt Böden von Hintergrundstandorten bereits als „Verdachtsflächen“ zu bewerten. Bei dieser vorläufigen Einstufung steht der Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Vordergrund. Ungeklärt ist die Frage, inwieweit bei geringen Eluatgehalten aus Böden das Risiko eines PFAS-Übergangs im Wirkungspfad Boden-Pflanzen besteht.

Besonders relevant ist diese Frage, sobald Bodenmaterial als Aushub im Abfallregime gehandhabt wird. Das Risiko des Transfers von PFAS in Nahrungs- und Futterpflanzen würde auch eine Materialverwertung in der Landwirtschaft in Frage stellen. Unmittelbare Auswirkungen ergeben sich auch für die Beurteilung von Böden im Rahmen von Flurneuordnungsverfahren oder der Bauleitplanung.

Für PFAS im Grundwasser gibt es noch keine Grenzwerte in Deutschland und der EU. Die Bund- und Länderarbeitsgemeinschaften Wasser (LAWA) und Boden (LABO) haben Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser (GFS) abgeleitet. Sieben GFS-Werte (PFBA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) wurden zusammen mit weiteren sechs gesundheitlichen Orientierungswerten (GOW) per Erlass vom 21. August 2018 in Baden-Württemberg eingeführt. Zur Bewertung des gemeinsamen Auftretens mehrerer PFAS ist die Quotientensumme heranzuziehen. Bei Überschreitung der Einzelwerte (GFS- und vorläufige GFS-Werte) im Grundwasser oder bei einer Quotientensumme > 1 liegt in der Regel eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit gemäß WHG vor [UM 2018]; (vgl. Kapitel 2).

Für die weitere Bearbeitung in der Praxis ist es zunächst erforderlich, lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen abzugrenzen. Dies wird jedoch durch fließende Übergänge vor Ort in den diversen Belastungsfällen und die Schwierigkeit der Abgrenzung beider Begriffe voneinander erschwert. Von den flächenhaften PFAS-Kontaminationen abgegrenzt sind diffuse, sehr geringe, analytisch jedoch offensichtlich flächendeckend nachweisbare, ausschließlich anthropogen verursachte PFAS-Gehalte in ansonsten als unbelastet eingestuft Böden [UBA 2020].

9 Literatur und Quellen

- BAuA (2010):
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Technische Regeln für Gefahrstoffe – Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition – TRGS 402
- DIN 19528:2009-01 (2009):
Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 19529:2015-12 (2012):
Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 38407-42 (2011):
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 (F 42), Beuth Verlag, Berlin
- DIN 38414-14:2011-08 (2011):
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) (S 14), Beuth Verlag, Berlin
- KALBE, U. (2018):
Vergleich von Elutionsuntersuchungen auf perfluorierte Chemikalien (PFC), Vortrag BEW-Fachgespräch Feststoffuntersuchungen, Essen, 05.03.2018.
- LAWA (2017):
Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC)
- LUBW (2016):
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, PFC – Hintergrundgehalte in Böden
- LUBW (2017):
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, PFC-Einträge in Böden durch Kompost und Klärschlamm
- LUBW (2018):
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 50 Jahre Lysimetermessnetz
- LUBW (2019):
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Bestimmung von per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) in Feststoffen – Vergleich Schüttel- und Säulenelutionsverfahren
- LUBW (2021):
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Bestimmung von PFAS in wässrigen Boden-Eluaten – Studie zum Einfluss methodischer Faktoren auf die Analysenergebnisse
- OSTERAUER, R. (2018):
PFC-Akkumulation in Wanderfalkeneiern, Regenwürmern und Böden. Vortrag beim Gesprächskreis „PFAS in Böden und terrestrischen Systemen“ am Landesamt für Umwelt, Bayern am 20.03.2018.
- UBA (2020):
Umweltbundesamt, Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen
- UM (2016):
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Erlass zur Entsorgung von Bodenmaterial aus PFC (PFAS) belasteten Flächen
- UM (2018):
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Erlass zur Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten

10 Abbildungen und Tabellen

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Ackerfläche, (Foto LUBW 2018)	8
Abbildung 2.2: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Grünlandfläche, (Foto LUBW 2018)	8
Abbildung 2.3: Beprobung einer Bodendauerbeobachtungs-Waldfläche, (Foto LUBW 2016)	8
Abbildung 2.4: Beprobung der Waldaufgabe einer Bodendauerbeobachtungs-Waldfläche, (Foto LUBW 2016)	8
Abbildung 2.5: Entnahme eines Bohrkerns aus dem Split-Tube-Bohrer, (Foto LUBW 2018)	9
Abbildung 3.1: PFAS Summenkonzentrationen im Eluat der Proben der ersten Untersuchungsphase (LUBW 2016)	11
Abbildung 4.1: Probenahmestandorte Untersuchungsphasen 1 und 2	12
Abbildung 4.2: Summe der PFAS-Feststoffgehalte in Böden der Bodendauerbeobachtungsflächen, Phase 2	13
Abbildung 4.3: Vergleich der Eluatkonzentrationen an zwei Standorten mit unterschiedlicher Probenaufbereitung feldfrisch (FF)/trocken (LT) [LUBW 2021]	13
Abbildung 4.4: Prozentuale Verteilung der PFAS-Konzentrationen im Eluat bei unterschiedlicher Probenaufbereitung	14
Abbildung 4.5: Beprobungen der Bodendauerbeobachtungsfläche Mannheim-Sandtorf in den Jahren 2016 und 2019	14
Abbildung 4.6: Quotientensummen an Bodenproben der Bodendauerbeobachtungsflächen, Phase 2	15
Abbildung 5.1: Beprobungstiefen der Bodenhorizonte; die unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten sind farblich gekennzeichnet	16
Abbildung 5.2: Probenahmestandorte während der Untersuchungsphasen 1, 2 und 3	17
Abbildung 5.3: PFAS-Eluatsummen in Ober- und Unterböden	18
Abbildung 5.4: Einfluss der Probenaufbereitung im 2:1 Schütteleuat. Die Eluate der feldfrischen Oberbodenproben weisen signifikant niedrigere PFAS-Gehalte auf als die Eluate der getrockneten Rückstellproben der Unterböden.	19
Abbildung 6.1: Standort Lysimeter Büchig, (Foto LUBW 2019)	20
Abbildung 6.2: PFAS-Konzentrationen in Eluaten der Bodenproben und Sickerwasser der Lysimeter	20
Abbildung 6.3: Pflanzenscreening Kraichgau, (Foto LUBW 2019)	21
Abbildung 6.4: Pflanzenscreening Kraichgau, (Foto LUBW 2019)	21
Abbildung 6.5: Vergleich PFAS-Konzentrationen bei verschiedenen Elutionsmethoden der Bodenproben	22
Abbildung 7.1: Summe PFAS im 2:1 Schütteleuat (mineralische Oberböden)	23
Abbildung 7.2: Summenkonzentrationen an PFAS in Schüttel- und Säuleneluaten, Böden aus Hintergrundstandorten [LUBW 2019]	24

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Analysierte PFAS	9
Tabelle 2.2: Geringfügigkeitsschwellen- (GFS) und gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) für PFAS [LAWA, 2017]	10

