



Fachbeirat Bodenuntersuchungen

Empfehlungen des FBU zum methodischen Vorgehen bei der Bestimmung von niedrigen PFAS- Gehalten in Böden

April 2024

Herausgeber: Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU)

Ute Kalbe (Vorsitzende)
Alexander Ruderisch
Andreas Zeddel
Dieter Hennecke
Frank KÜchler
Ina Gründer
Ingo Müller
Klaus Liphard
Steffen Uhlig
Theresa Gesswein
Urs Dippon-Deißler
Volker Linnemann

Weitere Beitragende:

Lennart Gehrenkemper¹, Simone Schmidt¹, Mareike Mersmann², Hanna Ulrich³, Ann-Kathrin Seeger⁴,
Annegret Biegel Engler¹, Helge Düker⁵, Kathlin Schweitzer⁶

1 Umweltbundesamt

2 LANUV NRW

3 LFU Bayern

4 LUBW

5 NLBL

6 HU-Berlin

Redaktion: Urs Dippon-Deißler (Umweltbundesamt) fbu@uba.de

Stand: April 2024

Kostenfreier Download der Publikation: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/kommissionen-beiraete/fachbeirat-bodenuntersuchungen-fbu>

Der FBU: Gemäß § 25 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716) wurde beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit der Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU) eingerichtet. Die Mitglieder des Fachbeirats, welche durch das BMU (bzw. BMUV) berufen werden, sind fachlich qualifizierte und erfahrene Personen aus Bundes- und Landesbehörden, aus der Wissenschaft sowie aus Wirtschaftsbereichen, die vom Vollzug dieser Verordnung berührt sind. Der FBU hat die Aufgabe, Erkenntnisse über fortschrittliche Verfahren und Methoden, deren praktische Eignung zur Erfüllung der Anforderungen der BBodSchV (§§ 10 bis 15 und des Abschnitts 4) gesichert erscheint, sowie über deren Anwendung zusammenzustellen.

1. Vorwort

Die Gruppe der Per- und Polyfluorierten Alkylsubstanzen steht auf Grund ihrer Persistenz, sowie anderer besorgniserregender Eigenschaften im Fokus von Öffentlichkeit und Regulierung. Ihre physikochemischen Eigenschaften und das ubiquitäre Auftreten einiger PFAS machen sie zu relevanten Stoffen für vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutz. Für einige Verfahren zur Analyse von PFAS in Böden sind bereits genormte Methoden vorhanden (DIN 38414-14 zur PFAS-Analytik mittels HPLC-MS/MS, DIN 19528 und 19529 mit besonderer Berücksichtigung der Vorgehensweise zur Elution organischer Schadstoffe), bei anderen läuft die Normung derzeit noch (CEN-Norm zur Aktualisierung der DIN 38414-14, DIN 3608 zur Anwendung des TOP-Assays auf Bodenproben), während beispielsweise für die Bestimmung von niedrigen PFAS-Feststoffgehalten in Mineralböden naturnaher Nutzung außerhalb von Verdachtsflächen dem FBU keine Methode bekannt ist, für die aktuell eine Normung angestrebt wird; die o.g. CEN-Norm strebt voraussichtlich eine für den Hintergrundbereich akzeptable Bestimmungsgrenze ($\sim 0,1 \mu\text{g/kg}$ je PFAS) an.

Dennoch werden für Regulierung und Bewertung geeignete Methoden benötigt, die einen niedrigen PFAS-Feststoffgehalt nach aktuellem Kenntnisstand möglichst präzise darstellen können. Besonders in Bereichen, in denen niedrige PFAS-Gehalte erwartet werden (bspw. bei der Ermittlung von Hintergrundgehalten oder der Abgrenzung von Schadensfällen gegenüber unbelasteten Vergleichsflächen) haben jüngere Untersuchungen gezeigt, dass Ergebnisse und ihre praktische Interpretierbarkeit oftmals von zu hohen Bestimmungsgrenzen beeinträchtigt werden. Zusätzlich reagieren die Ergebnisse empfindlich gegenüber kleinen Variationen im Verfahrensablauf, die derzeit im Rahmen von genormten Verfahren für die Bodenuntersuchung zulässig sind.

Daher hat der FBU verschiedene Variationen bestehender Untersuchungsverfahren gemeinsam mit Vertreter*innen aus NRW, BW, BY und dem UBA diskutiert und kommt zu den folgenden Empfehlungen bei der Auswahl von Methoden für eine Bestimmung von PFAS-Gehalten im Bereich von niedrigen PFAS-Feststoffgehalten. Anforderungen an die Erhebung von Hintergrundgehalten und die Ableitung von Hintergrundwerten, die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2017) erarbeitet wurden, sowie bestehende Normverfahren und der Leitfaden zur PFAS-Bewertung (BMUV, 2022) wurden dabei berücksichtigt und, wo erforderlich, um PFAS-spezifische Anforderungen ergänzt.

Ziel dieser Empfehlungen ist, ein einheitliches Vorgehen zur Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten in Mineralböden zu etablieren; insbesondere für die Erhebung von Hintergrundgehalten.

Auf Grund ihrer physikochemischen Eigenschaften wäre für den überwiegenden Teil der PFAS eigentlich eine Extraktion mit organischen Lösungsmitteln aus dem Boden mit anschließender massenspektrometrischer Quantifizierung die geeignetste Methode, um Feststoffgehalte zu bestimmen. Dem FBU ist derzeit keine solche Methode bekannt, deren Entwicklung weit genug vorangeschritten ist, als dass mit ihr auch in kommerziellen Laboren eine Bestimmungsgrenze im Bereich von niedrigen PFAS-Feststoffgehalten ($\leq 0,1 \mu\text{g/kg}$ je PFAS-Einzelsubstanz) sicher erzielt werden könnte.

Hingegen können in wässrigen Bodeneluat nach DIN 19528 oder DIN 19529 auch in kommerziellen Laboren Bestimmungsgrenzen $\leq 1 \text{ ng/L}$ je PFAS-Einzelsubstanz erreicht werden. Diese Verfahren sind jedoch eigentlich darauf ausgelegt den kurzfristig mit Wasser mobilisierbaren Anteil an PFAS in einer Bodenprobe abzubilden. Dieser ist kleiner als der Feststoffgehalt. Um niedrige Feststoffgehalte hilfswise mit Elutionsmethoden abschätzen zu können, sind Anpassungen besonders hinsichtlich der Probenvorbereitung notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

Die so veränderte Elutionsmethode ist dann als wässrige Extraktion zu verstehen. Bei einer Extraktion mit Wasser ist zwar (je nach Wasserlöslichkeit der Einzelsubstanz) eine vergleichsweise geringere Extraktionseffizienz im Vergleich zu einer Extraktion mit organischem Lösungsmittel zu erwarten, aber die sehr deutlich niedrigeren Bestimmungsgrenzen des Verfahrens einer wässrigen Extraktion erlauben eine Quantifizierung auch im Bereich von geringen PFAS-Gehalten. Die mit Hilfe einer wässrigen Extraktion erhaltenen Werte sind nicht als exakte Feststoffgehalt, sondern als Mindestgehalte im Feststoff zu verstehen, da zu erwarten ist, dass nicht extrahierte Rückstände den tatsächlichen Feststoffgehalt vergrößern. Die Ergebnisse von Elutionsuntersuchungen nach DIN 19528/19529, von wässrigen Extraktionen mit den unten empfohlenen Anpassungen und von Extraktionen mit organischem Lösungsmittel (vgl. DIN 38414-14) sind nicht miteinander korrelierbar und können je nach Kontaminationsmuster stark voneinander abweichen.

Solange keine geeignete Methode zur Bestimmung von PFAS-Feststoffgehalten im Bereich von niedrigen PFAS-Gehalten basierend auf einer Extraktion mit organischem Lösungsmittel verfügbar ist, empfiehlt der FBU daher vorläufig, zusätzlich zu DIN 38414-14 eine wässrige Extraktion durchzuführen. Diese Empfehlung ist ausdrücklich nicht gleichbedeutend mit einer Bewertung des FBU als gleichwertige Methode nach § 25 BBodSchV, sondern ist als pragmatische Hilfslösung zu verstehen.

Nachstehend wird diese Empfehlung sowie Hinweise zu einzelnen Verfahrensschritten bei Bodenuntersuchungen zur Bestimmung von niedrigen PFAS-Gehalten im Feststoff genauer erläutert.

2. Probenahme

Die Probenahme sollte nach gängigen Methoden zur Ermittlung niedriger Konzentrationen in naturnah genutzten Böden außerhalb von Verdachtsflächen erfolgen. Detaillierte Hinweise hierzu enthalten u.a. die Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5 bzw. künftig KA6 der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005), sowie die DIN-ISO 18400-102, DIN-ISO 18400-104, DIN-ISO 18400-202, das Methodenhandbuch „Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Dauerbeobachtungsflächen“ (Barth et al., 2022) und die LABO-Veröffentlichung „Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden“ (LABO, 2017).

Für die Erhebung von Feststoffwerten bei erwartet geringen PFAS-Massenanteilen (bspw. im Hintergrundbereich) sind zusätzlich folgende Aspekte zu beachten:

- Transport und Lagerung der Proben: Nach Probenahme sollte die Probe im Labor schnellstmöglich weiterverarbeitet werden. Da PFAS auch im Labor ubiquitär sind, sollte auf möglichst wenige offene (Um-)Lagerungen geachtet werden.
- Verpackung: möglichst dicht schließende PP- oder HDPE-Behälter, sowie nachweislich PFAS-freie Braunglasflaschen oder verschließbare Blecheimer.

Material und Gerätschaften: Bei der Probenahme ist grundsätzlich darauf zu achten, dass keine PFAS-haltigen Materialien verwendet werden (z.B. bei Bekleidung, Schuhen, Schutzausrüstungen, Schonhammer, Dichtungen an PN-Gefäßen, Aufklebeetiketten, Tinten, die nicht explizit PFAS-frei sind).¹ Für manuelle Einschlaghilfen, wie den Schonhammer, gibt es leider noch keine gängige Alternative, bei der auch die Anforderungen des Arbeitsschutzes hinreichend beachtet sind. LfU Bayern und UBA empfehlen behelfsmäßig die Verwendung eines großen Baumwolltuchs (nicht imprägniert) zur Bodenabdeckung beim Einschlagen des Bohrstocks. Dieser Empfehlung schließt sich der FBU an.

¹ Weiterführende Informationen enthalten der UBA-Text 137/2020 Anhang A Kapitel 4.1 bzw. ausführlicher der Nationale Umweltmanagementplan 2.0 der Länder Australien und Neuseeland für PFAS (HEPA, 2020), auf die geachtet werden sollten. Die Leiter der Umweltbehörden Australiens und Neuseelands (HEPA) haben den Entwurf des Nationalen Umweltmanagementplans für Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS NEMP) Version 3.0 zur öffentlichen Konsultation freigegeben. Diese Version 3.0 enthält wichtige neue Leitlinien und Standards, die auf der im Jahr 2020 veröffentlichten Version 2.0 aufbauen.

3. Probenvorbereitung

3.1. Trocknung

Bereits die Art der Trocknung kann ersten Erkenntnissen des DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) zufolge einen starken Einfluss auf die Extraktionseffizienz bei wässriger Extraktion von PFAS aus Bodenproben haben (Abbildung 1). Die geringste PFAS-Extraktionsausbeute ist offenbar bei feldfrischen Proben zu beobachten, während bei Trocknung mit 105 °C die höchste PFAS-Extraktionsausbeute im wässrigen Extrakt erkennbar ist. Etwa miteinander vergleichbare Ergebnisse werden durch Trocknung bis 40°C oder Gefriertrocknung erreicht. Die Mechanismen für diese Unterschiede sind mit dem derzeitigen Kenntnisstand nicht erklärbar. Der FBU empfiehlt, diese Mechanismen aufzuklären, um nachfolgend Erkenntnisse hierüber für die Entwicklung eines für PFAS geeigneten Verfahrens zu nutzen.

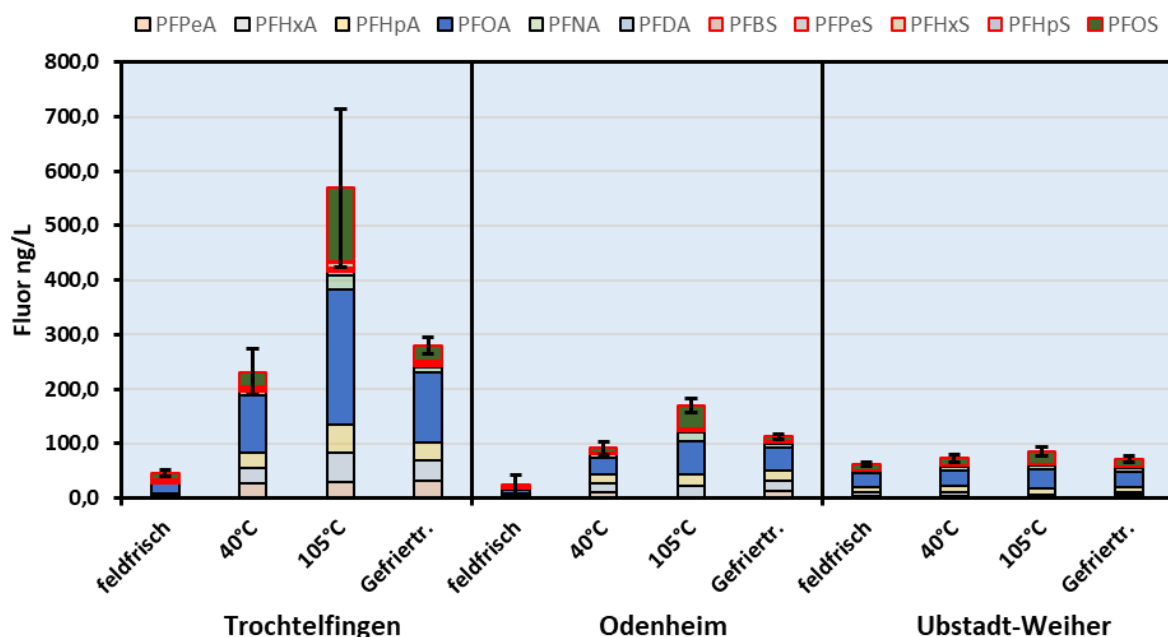


Abbildung 1 Einfluss der Trocknung auf die Ergebnisse von Untersuchungen von wässrig extrahierten Böden mit nicht spezifischer PFAS-Belastung (Hintergrundbelastung). Quelle: Sacher et al. (2022)

Der FBU empfiehlt daher bis zum Vorliegen vertiefter Erkenntnisse vorläufig, die Trocknung der Bodenproben bei 40 °C durchzuführen, um eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Feuchtegehalten der feldfrischen Proben zu erreichen und die Minderbefunde bei feldfrischen Proben (vgl. Abbildung 1) mit angemessenem Aufwand gering zu halten. Der Feuchtegehalt ist vor und nach der Trocknung durch Wägung zu bestimmen.

Zwischenlagerung nach Trocknung: Lagerung in dicht schließenden PP- oder HDPE-Gefäßen, Braunglasflaschen oder Bleheimern bei konstanter Temperatur. Sollte eine kühle Lagerung erfolgen, ist beim Aufwärmen vor der weiteren Bearbeitung auf Luftabschluss zu achten. Zusätzlich ist auf die Vermeidung von Feuchtigkeitszug zu achten.

3.2. Weitere Anforderungen an die Probenvorbereitung

Sieben: Wie üblich auf < 2 mm sieben und dabei auf PFAS-freie Siebe achten. In jedem Fall sollen unterschiedliche Untersuchungen, die untereinander in Bezug gesetzt werden sollen, an der gleichen Materialfraktion durchgeführt werden.

Mahlen: < 250 µm nur für die Bestimmung von Feststoffgehalten. Bei der wässrigen Extraktion sollte auf das Mahlen verzichtet werden. (siehe unter „Extraktion“)

3.3. Extraktion

a) Extraktion mit organischem Lösungsmittel zur Feststoffgehaltbestimmung

Die Feststoffuntersuchung sollte nach DIN 38414-14:2011 an der Fraktion < 2 mm, getrocknet und gemahlen (< 250 µm) erfolgen.²

b) wässrige Extraktion

Wird für die Feststoffgehaltbestimmung eine Bestimmungsgrenze $\leq 0,1 \mu\text{g/kg}$ je PFAS-Einzelsubstanz nicht erreicht, empfiehlt der FBU die Verwendung einer wässrigen Extraktion auf Basis der bekannten Elutionsverfahren (Säulenverfahren DIN 19528 und Schüttelverfahren DIN19529³). Für die Untersuchung von PFAS sind beide Verfahren bisher nicht validiert. Es liegen momentan auch keine ausreichenden Daten zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen zur Anwendung im Sinne einer wässrigen Extraktion vor. Kürzlich abgeschlossene und derzeit laufenden Erhebungen aus BW, BY, NRW und des UBA nutzen überwiegend das Schüttelverfahren nach DIN19529. Um eine Datenvergleichbarkeit zwischen Projekten zu ermöglichen wird daher bei der wässrigen Extraktion die Nutzung des Schüttelverfahrens als Konvention empfohlen.

Für die Verwendung im Sinne der hier beschriebenen wässrigen Extraktion ist die in Kapitel 3.1 beschriebene Vorgehensweise für die Trocknung der Probe zu berücksichtigen.

4. Analytik

Die Analyse der Extrakte soll angelehnt an DIN 38414-14 bzw. DIN 38407-42 mittels HPLC-MS/MS durchgeführt werden. Dabei wird empfohlen das Substanzspektrum entsprechend Tabelle 2 zu analysieren. Die Bestimmungsgrenzen je Einzelsubstanz sollten an die Untersuchung von Proben aus dem Bereich der Hintergrundbelastung angepasst werden: für die Untersuchung von Bodenproben nach Extraktion mit organischem Lösungsmittel (DIN 38414-14, siehe Kapitel 3.3 a)) $BG \leq 0,1 \mu\text{g/kg TS}$; für wässrige Extraktionsuntersuchungen

² Das derzeit am UBA laufende bundesweite Hintergrundwerte-Projekt zeigt, dass mit einer BG von $0,1 \mu\text{g/kg}$ je PFAS im vorläufigen Acker-Datensatz nur für PFOA und PFOS die 50. Perzentile und nur für PFBA, PFOA und PFOS die 90. Perzentile oberhalb der BG liegen würden. Es wird daher empfohlen eine deutlich niedrigere BG anzustreben, wenn eine organische Extraktion genutzt werden soll.

³ Das europäische Schüttelverfahren DIN EN 12457-1:2003 (W/F 2 l/kg) beschreibt derzeit keine für organische Schadstoffe geeignete Fest/Flüssig-Trennung und wird daher nicht zur Anwendung empfohlen. Die in DIN 19529 festgelegte Zentrifugation ist damit gegenüber einer Filtration vorzuziehen. Filtermaterialien stellen potenziell eine zusätzliche Blindwertquelle dar und Sorption kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Sollten bei sehr humosen Böden keine Schütteleluate erreichbar sein, sollte für diese Böden das Säulenverfahren (DIN 19528) verwendet werden. Von Schütteleluaten mit einem W/F 10 l/kg wird strikt abgeraten.

BG ≤ 1 ng/L (DIN 38407-42). Es wird empfohlen die nach wässriger Extraktion erhaltenen Konzentrationen im Sinne von Mindestgehalten in Massenanteile (μg PFAS pro kg Trockensubstanz Boden) umzurechnen, wobei die genauen Volumina aus dem wässrigen Extraktionsschritt einzusetzen sind.

Zusätzlich kann ein TOP-Assay aus dem Extrakt mit organischen Lösemitteln (DIN 38414) durchgeführt werden, um aufzuzeigen, ob ggf. weitere relevante Vorläufer/Ersatzstoffe in den Böden vorhanden sind. Soll mittels des TOP-Assays auch DONA erfasst werden, wird empfohlen das Einzelparameterspektrum um PFMoPrA (als Transformationsprodukt von DONA) zu erweitern.

Table 2: Mögliches und empfohlenes Substanzspektrum bei der Ermittlung von niedrigen PFAS-Gehalten in Böden

Carbonsäuren	Sulfonsäuren	Vorläufer/Ersatzstoffe
PFBA	PFBS	PFOSA
PFP(e)A	PFPeS	FOSAA
PFHxA	PFHxS	N-MeFOSA
PFHpA	PFHpS	N-EtFOSA
PFOA	PFOS	N-Me-FOSAA
PFNA	PFNS	N-EtFOSAA
PFDA	PFDS	H4PFHxS (4:2 FTSA)
PFUnDA	PFUnDS	H4PFOS (6:2 FTSA)
PFDoDA	PFDoDS	H4PFDS (8:2 FTSA)
PFTTrDA	PFTTrDS	8:2 FTUCA
PFTeDA		8:2 diPAP
PFHxDA		HFPO-DA / FRD-903 / GenX
PFOcDA		DONA (ADONA)

5. Qualitätssicherung

Da die vorgenannten Verfahren mit Blick auf die Bestimmung niedriger PFAS-Konzentrationen oft nah an den jeweiligen Bestimmungsgrenzen eingesetzt werden und Unsicherheiten aufweisen sowie vorläufige Empfehlungen darstellen, sind Maßnahmen der Qualitätssicherung von besonderer Bedeutung:

- Doppelbestimmung
- Bestimmung des Verfahrensblindwertes unter Einbezug aller Verfahrensschritte inkl. Feldprobenbehältnisse möglichst bei jedem Probenet.
- Gegebenenfalls Parallelbestimmung durch unterschiedliche Labore.

Als vorläufiges Qualitätskriterium bei Doppelbestimmungen werden 30% Abweichung empfohlen, bei höherer Abweichung sollte eine dritte Bestimmung erfolgen. Es wird empfohlen in festgelegten Abständen eine Referenzprobe mitzuführen.

6. Abschlussbemerkung

Abschließend stellt der FBU fest, dass die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung von PFAS-Gehalten in Böden und anderen Feststoff-Matrizes benötigt wird, welches geeignet ist auch in Proben mit geringen PFAS-Gehalten zuverlässig Feststoffgehalte zu bestimmen. Die Normung eines solchen Verfahrens wird empfohlen.

Zur Unterstützung einer Verfahrensentwicklung sind die Anwender der in diesem Dokument gemachten Empfehlungen zur Untersuchung von Böden mit niedrigen PFAS-Konzentrationen eingeladen, ihre Erfahrungen und verfahrensbezogene Anregungen der FBU-Geschäftsstelle (fbu@uba.de) zu übermitteln.

7. Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage (KA 5). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste (Hrsg.), Hannover
- Barth, N., Borho, W., Cordsen, E., Heller, C., Höper, H., Ludwig, B., Marx, M., Meesenburg, H., Spörlein, P. & Weller, M. (2022): Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. IN: KÖNIG, W. & UTERMANN, J. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kennziffer 9060, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
Auch einzusehen auf der Homepage der LABO: https://www.labo-deutschland.de/documents/Methodenhandbuch_BDF.pdf
- BMUV (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung – Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. Abrufbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf.
- DIN-ISO 18400-102 (11.2020): Bodenbeschaffenheit - Probenahme – Teil 102: Auswahl und Anwendung von Probenahmetechniken (ISO 18400-102:2017)
- DIN ISO 18400-104 (11.2020): Bodenbeschaffenheit - Probenahme – Teil 104: Strategien (ISO 18400-104:2018)
- DIN ISO 18400-202 (11.2020): Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 202: Erfassung (ISO 18400-202:2018)
- DIN EN 12457-1 (01.2003): Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 1: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 2 l/kg und einer Korngröße unter 4 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung)
- DIN 38414-14 (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)
- DIN 19529 (07.2023): Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg
- HEPA, Heads of EPAs Australia and New Zealand (2020): PFAS National Environmental Management Plan Version 2.0.
Einzusehen unter: <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/publications/pfas-nemp-2>
- LABO, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. IN: KÖNIG, W. & UTERMANN, J. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kennziffer 9006, Erich Schmidt Verlag, Berlin. Auch einzusehen auf der Homepage der LABO: https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf

LUBW, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2019): Bestimmung von per- und polyfluorierten Verbindungen (PFAS) in Feststoffen: Vergleich Schüttel- und Säulenelutionsverfahren, Karlsruhe.

Auch einzusehen auf der Homepage des LUBW: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/42387>

Sacher, F., Guckert, M., Körner, B., Lange, F. T., Lesmeister, L., Löffler, N., Merklinger, M., Scheurer, M., Schell, H. et al. (2022): Fluorierte Verbindungen aus technischen Produkten der Papierindustrie – Evaluierung von Transformation, Verlagerung und Bildungspotential durch modernste analytische Methoden (FluorTECH). Forschungsbericht BWPLUS.

Einzusehen auf der Homepage des LUBW: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10496>