

06.22

Lizenziert für Herrn Basilius Thalmann.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

31. Jahrgang
Dezember 2022
Seiten 157 – 204

altlasten spektrum

Herausgegeben vom
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e. V. (ITVA)

www.ALTLASTENDigital.de



Organ des ITVA

PFAS – „Forever Chemicals“ als umweltpolitische Herausforderung

Fragen an die Bundesumwelt-
ministerin Steffi Lemke

Bewertungsschwierigkeiten der PFAS-Belastungssituation und deren Auswirkungen auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser

Hans Ulrich Dahme

Unterschätzen standard- mäßige wässrige Elutions- verfahren PFAS-Gehalte in Böden?

Lukas Lesmeister

Einzelfallprüfung bei PFAS

Frank Karg, Ulrike Hintzen,
Lucie Robin-Vigneron,
Stephan Mostersteg

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Schweizer Böden

Basilius Thalmann, Christoph Hofer, Daniel Wächter, Beatrice Kulli

Einleitung

PFAS (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen) umfassen mehrere tausend synthetische Verbindungen, die in zahlreichen industriellen Prozessen oder in den daraus resultierenden Produkten zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer hohen chemischen Stabilität und der damit verbundenen Persistenz ist davon auszugehen, dass sie sich in Umweltkompartimenten und in Organismen akkumulieren. Da viele PFAS als toxisch gelten, stellt ihre Verbreitung und Akkumulation ein Risiko dar [1]. Über Niederschläge und atmosphärische Deposition werden PFAS praktisch überall auf der Welt in terrestrische und aquatische Ökosysteme eingetragen [1], [2]. In Schweden wurden PFAS landesweit in Bodenproben nachgewiesen, wobei es regionale Unterschiede zwischen den Konzentrationen gab [3]. Auch in der Schweiz wurden nun Bodenproben auf PFAS untersucht. Es handelt sich dabei um Proben aus drei Probenahmekampagnen: (i) vom Nationalen Bodenbeobachtungsnetz (NABO), (ii) vom Biodiversitätsmonitoring (BDM) und (iii) von einer Messkampagne im Kanton Wallis. Im Rahmen dieses Artikels sollen im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) die Daten aus Oberbodenproben im Hinblick auf ihre Verteilung gezeigt und Zusammenhänge zwischen PFAS Gehalten von Böden, deren Nutzung und weiteren Standort- oder Bodeneigenschaften diskutiert werden.

Datengrundlage

Für die Messkampagne (i) der NABO wurden 25 Einstiche (0-20 cm) auf einer Fläche von 10x10 m zu einer Mischprobe vereint, dies entspricht dem NABO Standard. In der Messkampagne (ii) vom BDM wurden vier Bohrkern (0-20 cm) zu einer Mischprobe vereint. Die Probenahme im Wallis (iii) fand im Jahr 2021 statt und unterscheidet sich von der NABO-Beprobung einzig in der Zahl der Einstiche, welche zwischen 16 und 25 lagen. Messkampagne i & ii decken einen Zeitraum zwischen 2010 und 2015 ab. Die Proben wurden 48h bei 40°C getrocknet und anschließend auf 2 mm gesiebt. Die Lagerung der Proben erfolgt in Kunststoff-

gefäßen. Die Analytik orientiert sich an der BAFU-Vollzugshilfe „Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich“ [4]. Die Bestimmungsgrenze (BG) lag für die einzelnen Substanzen bei 0.02 µg/kg Trockensubstanz.

Insgesamt wurden Daten aus 146 Oberbodenproben (0-20 cm) verteilt über die Schweiz ausgewertet. Zudem wurden 49 Unterbodenproben (50-70 cm) aus dem NABO-Netz gemessen. Auf die Angabe deren Konzentrationen wurde verzichtet, da die Messwerte selten über der Bestimmungsgrenze lagen und folglich die Datenmenge für eine statistisch sinnvolle Auswertung zu klein ist. Bei der Auswahl der Untersuchungsflächen wurde nicht auf potenziell verschmutzte Standorte fokussiert. Es wurden vielmehr verschiedene Regionen, Nutzungstypen, Höhenstufen und Klimazonen untersucht, um Zusammenhänge normalverteilt zwischen Umweltfaktoren und der Verteilung von PFAS Konzentrationen über die Schweiz zu eruieren.

Die meisten hier dargestellten Auswertungen basieren auf der Messung folgender acht durch das BAFU als relevant eingestuftes Stoffe: PFBS, PFHxS, PFOS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA. Das vom BAFU ebenfalls als relevant eingestufte PFBA war nicht Teil des Analysepakets. Die BAFU-Stoffauswahl basiert darauf, dass sie sich standardmässig messen lassen, recht häufig im Boden/Untergrund gefunden werden und Informationen zu ihrer Toxizität vorliegen.

Einzelne Auswertungen wurden unter Berücksichtigung weiterer analysierter Stoffe aus der Gruppe der PFAS gemacht (4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 10:2 FTS, PFBS, PFPS, PFHxS, PFHpS, PFOSlin, PFOS, PFNS, PFDS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, PFHxDA, PFOcDA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, FOSA, GenX, Adona, PFECBS, 8:2-FTUCA, EtFOSA).

Da zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Probenahmekampagnen im Hinblick auf die Summe der acht betrachteten PFAS keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden (nach ANOVA-Test, die Daten sind normalverteilt), wurden die Daten für die meisten Auswertungen zu einem Datensatz zusammengeführt.

Ergebnisse

Räumliche Verteilung

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Summe von 32 PFAS Verbindungen (PFAS-32) über die Schweiz. In Abbildung 2 ist die Verteilung der acht durch das BAFU festgelegten PFAS (PFAS-8) dargestellt. Beide Darstellungen zeigen, dass über die ganze Schweiz verteilt PFAS Konzentrationen gemessen wurden. Etwas höhere Werte scheinen im östlichen Mittelland und im Tessin vorzukommen.

Lediglich in acht von 49 Unterbodenproben (50-70 cm) waren acht der 32 gemessenen PFAS über der BG.

Korrelation zwischen PFAS-Kongeneren und deren Summe

Im Median wurden 1.2 µg/kg PFAS-8 gefunden, die tiefste Konzentration lag bei 0.2 und die Höchste bei 15.1 µg/kg. Abbildung 3 zeigt die Korrelation von PFAS-8 mit den einzelnen in dieser Summe berücksichtigten PFAS. Es fällt auf, dass die Korrelation mit PFOS und PFOA sehr klar ist. Die zwei Verbindungen wurden in allen Bodenproben bestimmt und dominieren meist die Summe der PFAS-8. PFPeA zeigt zwar auch eine gute Korrelation mit PFAS-8, die Anzahl Messungen oberhalb der BG war jedoch sowohl klein (n =10) als auch im tiefen Konzentrationsbereich, sodass sich PFPeA nicht als Schätzhilfe für PFAS-8 eignet.

Durch eine robuste Hauptkomponentenanalyse der Konzentrationen der PFAS-Kongeneren konnte keine Gruppierung der Untersuchungsstandorte festgestellt werden. Die ersten zwei Hauptkomponenten (HK) erklären mehr als 98% der Varianz des Datensatzes und werden im Wesentlichen durch die PFOS (1 HK) und PFOA-Konzentrationen (2 HK) erklärt. Dies deutet darauf hin, dass die Konzentrationen dieser zwei PFAS-Kongeneren unabhängig voneinander sind

und am stärksten zur PFAS-8 Charakterisierung der Untersuchungsstandorte beitragen.

Von den weiteren 24 analysierten PFAS Verbindungen wurden neun Stoffe in jeweils 1 bis 97 Bodenproben gefunden: PFNS (2), PFDS (1), PFDA (97), PFUnDA (50), PFDoDA (10), PFTeDA (2), MeFOSAA (2), EtFOSAA (4), FOSA (2). Der Median der PFAS-32 liegt bei 1.4 µg/kg wobei minimal 0.2 und maximal 20 µg/kg gemessen wurden.

Zusammenhänge mit Umwelt- und Bodenparametern

In einem weiteren Schritt wurden Korrelationen der PFAS-Daten mit Umwelt- oder Bodenparametern der Standorte untersucht. Eine Korrelation mit der Niederschlagsmenge oder dem Boden pH wurde nicht festgestellt.

Die Korrelation zu organischem Kohlenstoff (TOC) ist schwach, heruntergebrochen auf die einzelnen Stoffe verschwindet sie für alle PFAS, außer für PFNA. Für diese Auswertung wurden die Walliser Proben nicht berücksichtigt, weil für diese keine TOC Werte vorlagen.

Eine klare Korrelation mit der Höhe über Meer ist ebenfalls nicht vorhanden. Es fällt lediglich auf, dass ab einer Höhe von 1250 m ü. M. nur ein Wert der PFAS-8 oberhalb von 2.75 µg/kg liegt, während unterhalb von 1250 m ü. M. die Werte von PFAS-8 zwischen 0 und 15.1 µg/kg streuen. Die Werte in tieferen Regionen sind jedoch nicht generell höher, die Mehrzahl der Werte liegt auch hier unterhalb 2.75 µg/kg.

Einfluss der Nutzung

Die Daten zeigen, dass in allen Nutzungsklassen nachweisbare PFAS-8 Konzentrationen gefunden wurden (Abbildung 4). Die gemessenen Konzentrationen überlappen stark. Aufgrund der kleinen Stichprobengrößen einzelner Nutzungsklassen und der

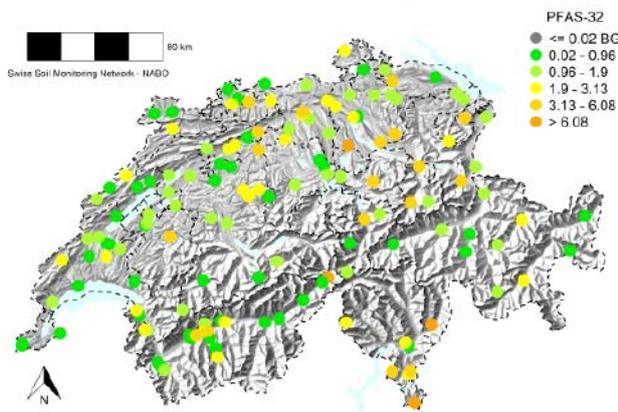


Abb. 1: Summe von 32 PFAS und ihre räumliche Verteilung über die Schweiz. Folgende PFAS wurden berücksichtigt: 4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 10:2 FTS, PFBS, PFPS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTeDA, PFTeDA, PFHxDA, PFOcDA, FOSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, FOSA, GenX, Adona, PFECBS, 8:2-FTUCA, EtFOSA.

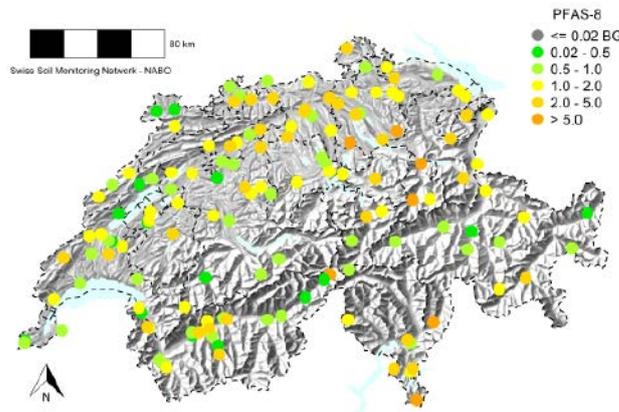


Abb. 2: Summe von acht PFAS (PFBS, PFHxS, PFOS, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA) und ihre Verteilung über die Schweiz.

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Schweizer Böden

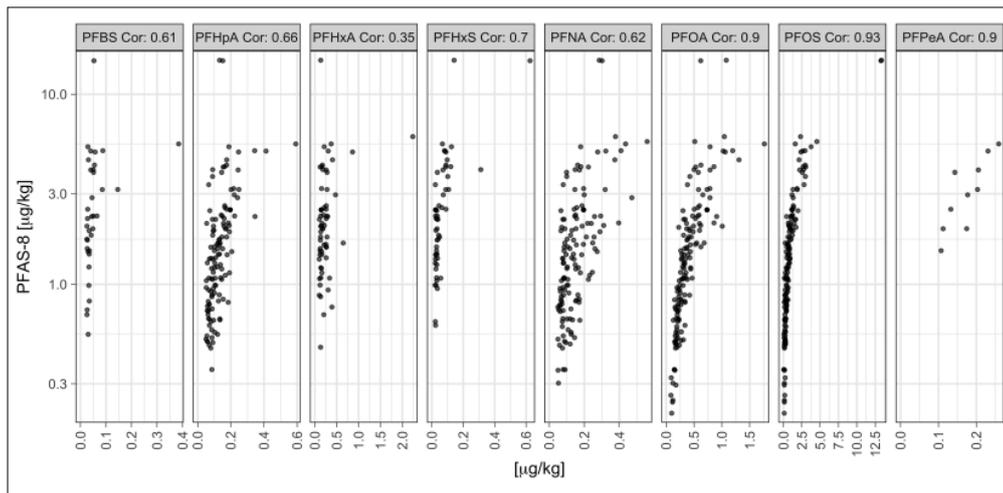


Abb. 3: Rangkorrelationen zwischen PFAS-8 und den in dieser Summe berücksichtigten einzelnen PFAS (für Messungen > BG). Stichprobengröße für die Kongenere: PFBS n=35; PFHpA n=124; PFHxA n=61; PFHxS n=53; PFNA n=131; PFOA n=146; PFOS n=146; PFPeA n=10.

großen Unterschiede in der Varianz der Stichproben, wurde darauf verzichtet mithilfe von statistischen Auswertungen etwas über die Signifikanz der Unterschiede auszusagen. Es gibt jedoch Hinweise auf Unterschiede zwischen urbanen Standorten und Ackerland, sowie alpinen Standorten. Bodenproben von alpinen Standorten weisen zwar nicht die tiefsten gefundenen PFAS Konzentrationen auf, aber ausschließlich relativ tiefe, wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist. Eine Korrelation zwischen PFAS-8 und der Höhe über Meer [m] konnte dennoch nicht nachgewiesen werden.

Einzelne Standort könnten auf Grund einer spezifischen Nutzung (auf der Fläche oder in der Nähe davon) erhöhte PFAS Konzentration aufweisen. Für 15 Standorte mit der höchsten PFAS-8 Konzentration wurde versucht mögliche Quellen, wie beispielsweise Galvanikbetriebe im näheren Umfeld der Standorte oder Klärschlammapplikationen [5] zu identifizieren. Eine eindeutige Quelle der PFAS konnte jedoch meist nicht eruiert werden, zudem kann der Eintrag aus nicht mehr bestehenden Quellen oder früheren Nutzungen stammen. Folglich wurden bei der Auswertung der Daten alle Daten gleichermaßen berücksichtigt. Um den Einfluss der Nutzung oder von PFAS-Quellen in der Umgebung besser beurteilen zu

können, sind räumlich besser aufgelöste Messungen, Messungen archivierter Proben (wenn möglich Zeitreihen) oder vertiefte historische Abklärungen nötig.

Schlussfolgerungen

PFAS wurde in allen 146 Proben aus Oberböden nachgewiesen, dabei lag die PFAS-8 Konzentration im Median bei 1.2 µg/kg und bei acht Proben (5.5%) über 5 µg/kg. Die Median Konzentrationen liegen in der Schweiz 33% höher als in Schweden [3]. Der Grund für den Unterschied konnte nicht eindeutig eruiert werden, da kein direkter Zusammenhang mit der Landnutzung festgestellt und folglich eine spezifische Quelle der PFAS nicht gefunden wurde. Alpine Standorte weisen die niedrigsten Konzentrationen auf. Ein gewisser Zusammenhang mit der Besiedlungsdichte könnte also bestehen.

Die fehlende Korrelation zwischen PFAS und Bodennutzung legt nahe, dass der Eintrag eine starke diffuse Komponente hat, wie sie beispielsweise in der Studie von Cousins et al. [2] beschrieben wurde. Bei kleinräumigeren Untersuchungen in Vorarlberg wurden jedoch zwischen Nachbarsparzellen große Unterschiede festgestellt und damit erklärt, dass Einträge von Abwasser- und Abfallströmen eine Hauptursache

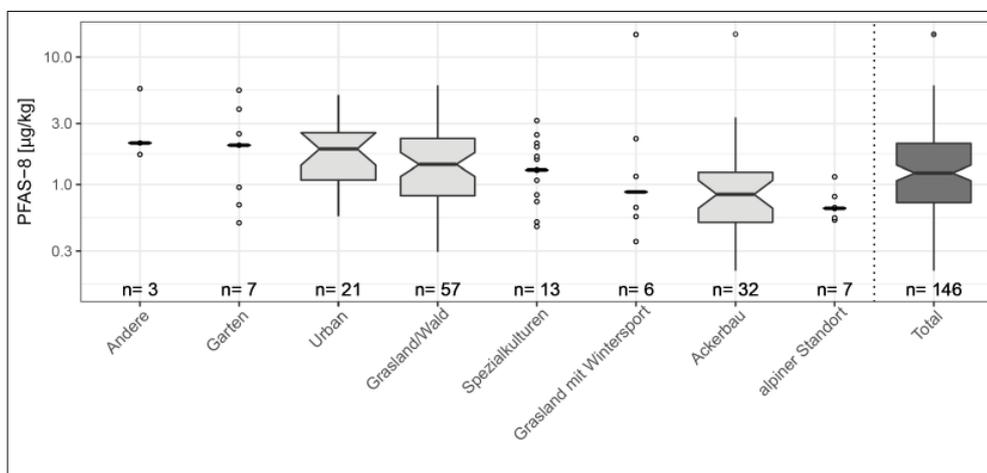


Abb. 4: Verteilung von PFAS-8 in den Bodennutzungsklassen sowie insgesamt über alle Klassen (Total). In Klassen die weniger als 20 Beobachtungen aufweisen, sind die Summenwerte direkt dargestellt, enthalten die Klassen mehr als 20 Beobachtungen ist die Verteilung als Boxplot dargestellt. Vertikale Segmente = Median der Nutzungsklassen, n = Anzahl PFAS-8 Summenwerte.

der Belastung sein könnten [7]. So klare Aussagen über mögliche Quellen lassen sich aus den hier vorliegenden räumlich viel gröber aufgelösten Daten nicht ableiten. Um Aussagen über den Einfluss von PFAS-Einträgen durch die Bewirtschaftung oder Deposition aus Quellen in der Umgebung eines Standorts machen zu können, wären detaillierte Aufzeichnungen der Bewirtschaftungsdaten, Abklärungen über frühere Nutzungen oder nicht mehr vorhandene Quellen nötig. Eine spezifische Wirkung potenzieller Quellen könnte in kleineren Gebieten anhand räumlich höher aufgelöster Messungen untersucht werden. Möglicherweise liessen sich damit diffus eingetragene anthropogene Hintergrundbelastungen von lokalen Verschmutzungen abgrenzen.

Zudem fanden wir eine sehr starke Korrelation von PFOS mit PFAS-8, welches an vielen Standorten auch einen grossen Anteil an der Gesamtkonzentration ausmacht. Diese Erkenntnis deckt sich mit Erhebungen aus Schweden [3], sowie aus der Schweiz [5] und den Aussagen der EFSA [6], welche zum Schluss kam, dass über 50 % der menschlichen Belastung auf PFOS zurückzuführen ist.

Literatur

- [1] M. G. Evich u. a., „Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment“, *Science*, Bd. 375, Nr. 6580, S. eabg9065, Feb. 2022, doi: 10.1126/science.abg9065.
- [2] I. T. Cousins, J. H. Johansson, M. E. Salter, B. Sha, und M. Scheringer, „Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 56, Nr. 16, S. 11172 – 11179, Aug. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c02765.
- [3] M. Söregård, J. Kikuchi, K. Wiberg, und L. Ahrens, „Spatial distribution and load of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden“, *Chemosphere*, Bd. 295, S. 133944, Mai 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133944.
- [4] BAFU (Hrsg), „Messmethoden im Abfall- und – Altlastenbereich“. 1. aktualisierte Auflage 2022. Erstausgabe 2017. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1715: 106 S., 2022.
- [5] A. C. Alder und J. van der Voet, „Occurrence and point source characterization of perfluoroalkyl acids in sewage sludge“, *Chemosphere*, Bd. 129, S. 62 – 73, Juni 2015, doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.045.
- [6] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel) u. a., „Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food“, *EFSA*, Bd. 18, Nr. 9, Sep. 2020, doi: 10.2903/j.efsa.2020.6223.
- [7] M. Humer und C. Scheffknecht, „Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Vorarlberg“. Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2021.

Autorenschaft

Basilius Thalmann

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften,
Basilius.Thalmann@zhaw.ch

Christoph Hofer

Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, ZHAW
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften,
christoph.hofer@zhaw.ch

Daniel Wächter

Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope Zürich,
daniel.waechter@agroscope.admin.ch

Beatrice Kulli

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften,
beatrice.kulli@zhaw.ch