



## Experimentelle Methoden zur Untersuchung der PFAS-Immobilisierung

Thomas Bierbaum<sup>1</sup> ([thomas.bierbaum@iws.uni-stuttgart.de](mailto:thomas.bierbaum@iws.uni-stuttgart.de)),

Norbert Klaas<sup>1</sup> ([norbert.klaas@iws.uni-stuttgart.de](mailto:norbert.klaas@iws.uni-stuttgart.de)), Claus Haslauer<sup>1</sup> ([claus.haslauer@iws.uni-stuttgart.de](mailto:claus.haslauer@iws.uni-stuttgart.de)),

Jürgen Braun<sup>1</sup> ([juergen.braun@iws.uni-stuttgart.de](mailto:juergen.braun@iws.uni-stuttgart.de)), Frank Thomas Lange<sup>2</sup> ([frankthomas.lange@tzw.de](mailto:frankthomas.lange@tzw.de)),

Frank Sacher<sup>2</sup> ([frank.sacher@tzw.de](mailto:frank.sacher@tzw.de))

<sup>1</sup> Universität Stuttgart, IWS/VEGAS, Stuttgart

<sup>2</sup> TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

### Zusammenfassung

Die Immobilisierung von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) durch Bearbeitung von kontaminiertem Bodenmaterial mit Agentien wird als effektive Maßnahme zur Reduzierung des Schadstofftransports an belasteten Standorten diskutiert. Die experimentelle Vorgehensweise zum Nachweis der PFAS-Immobilisierung ist jedoch noch nicht einheitlich geregelt. Um der Frage, welche Laborversuche hierfür geeignet sind, nachzugehen, wurden im Projekt „PFAS-Immo“ mehrere Immobilisierungsmaßnahmen in Laborversuchen auf verschiedenen Skalen und bei unterschiedlichen Sättigungsbedingungen untersucht: Es wurden Schüttelversuche („Infinite Sink“), gesättigte Säulenversuche sowie variabel-gesättigte Lysimeter betrieben. In allen Versuchstypen wurde in Böden mit aktivkohlebasierten Zusatzstoffen eine deutliche Reduktion des PFAS-Austrags festgestellt. Dabei wurden langkettige PFAS wirksamer und nachhaltiger adsorbiert als kurzkettige Verbindungen. In Säulen- wie auch in Lysimeterversuchen wurde eine verzögerte Freisetzung von kurzkettigen Substanzen beobachtet, die vermutlich durch Transformationsprozesse initiiert wurde. Die Kombination verschiedener experimenteller Methoden (gesättigte/ungesättigte Bedingungen) und der Vergleich von Elutionsdaten sind bei der Bewertung von Immobilisierungsmaßnahmen zu empfehlen. Für die Untersuchung von Langzeiteffekten sind ausreichend lange Versuche nötig.

### Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind heute aufgrund ihrer Persistenz („forever chemicals“) sowie der bioakkumulierenden und toxischen Eigenschaften mancher Vertreter als großes und langfristiges Umweltproblem erkannt. Eine besondere Herausforderung ist dabei, dass die Substanzklasse der PFAS aus mehreren Tausend Verbindungen besteht (>4700 sog. PFAS-bezogener CAS-Nummern, lt. OECD), von denen bisher lediglich ca. 20 in der Routineanalytik quantifiziert werden. Ein Teil der perfluorierten Endprodukte entsteht dabei in Transformationsprozessen aus polyfluorierten Präkursoren.

PFAS sind ubiquitär verbreitet mit Bodenhintergrundgehalten von circa 0,1 – 5 µg/kg. Neben deutschlandweit hunderten Schadensfällen nach Einsatz von Löschschaum oder bei Galvaniken sind auch flächenhafte Einträge zu verzeichnen. Im Raum Rastatt/Baden-Baden befindet sich der flächenmäßig größte PFAS-Schadensfall Deutschlands (Klatt, 2022; Bugsel

et al., 2022 u. a.). Dort wurde vor über einem Jahrzehnt mit Papierschlämmen verunreinigter Kompost auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht. Über 1200 ha sind seither unterschiedlich stark mit PFAS kontaminiert. Dies führt zu starken Einschränkungen der landwirtschaftlichen Nutzung und zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität.

Die großflächige Belastung, die damit verbundenen hohen Kosten sowie fehlende Erfahrung im Umgang mit den chemisch und thermisch stabilen perfluorierten Verbindungen erschweren die Anwendung von Bodensanierungsmaßnahmen. Eine Schadstoffimmobilisierung im Bodenmaterial wird als effektive Maßnahme zur Reduzierung der PFAS-Verlagerung diskutiert. Ein in-situ-Immobilisierungsverfahren sieht die Einmischung von Additiven mit einer hohen Sorptionskapazität in den Oberboden vor, um die Elutionskonzentration im Grundwasser zu vermindern und die ursprüngliche Nutzung (beispielsweise als landwirtschaftliche Fläche) wieder zu ermöglichen. Die Verfestigung und somit eine Reduzierung der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodenmaterials stellt einen weiteren Immobilisierungsansatz dar – beispielsweise zur Verwendung des kontaminierten Bodenmaterials in Lärmschutzwällen. Im Projekt „PFAS-Immo“ (gefördert vom Umweltministerium Baden-Württemberg im Rahmen des Forschungsprogramms BWPLUS) wurden entsprechende Bodenmischungen untersucht.

Bisher wurde über die PFAS-Immobilisierung in Bodenmischungen nur in wenigen begutachteten (peer reviewed) Veröffentlichungen berichtet, Berichte über Feldapplikationen sind selten zu finden (Hale et al., 2017; Söregard et al., 2021; Bräunig et al., 2021; Kabiri et al., 2021; McDonough, 2022). Meist wird bei aktivkohlebasierten Immobilisierungsprodukten von einer hohen Sorptionswirkung berichtet. Eine allgemeine Vorgehensweise zur Untersuchung und zum Nachweis der nachhaltigen Wirksamkeit von Immobilisierungsmaßnahmen gibt es jedoch bisher nicht. So unterscheiden sich beispielsweise die Versuchsmethoden und der Parameterumfang in der Einzelstoffanalytik. Im Projekt „PFAS-Immo“ wurden zur Untersuchung der PFAS-Desorption aus den Bodenmischungen Versuche auf verschiedenen Skalen (Batchversuche, Säulenversuche, Lysimeter) und unter verschiedenen Sättigungsbedingungen durchgeführt. Das vorrangige Ziel war dabei die Entwicklung einer Methode zur Untersuchung unterschiedlicher PFAS-Immobilisierungsansätze in Böden.

## Methoden

Ein PFAS-belasteter Oberboden aus dem Landkreis Rastatt, Baden-Württemberg, wurde als Ausgangsmaterial (N-1) für verschiedene Immobilisierungsansätze verwendet. Nach der Bodenprobennahme ergab die Feststoffanalyse nach methanolischer Extraktion in Anlehnung an DIN 38407-42 einen PFAS-Gehalt von circa 800 µg/kg (Summe der 27 analysierten Einzelsubstanzen) mit hohen Anteilen von PFDA und PFOS (jeweils > 200 µg/kg). Die Analyse des Summenparameters EOF ergab einen methanolisch extrahierbaren organisch gebundenen Fluorgehalt von circa 1500 µg/kg; dies deutet auf einen hohen Anteil an polyfluorierten Vorläufersubstanzen (Präkursoren) hin. Durch die Analyse mehrerer polyfluorierter Alkylphosphatester (PAP) sowie Perfluoroktansulfonamidoethanol-basierte Phosphatester (SAMPAP) konnte festgestellt werden, dass diese Vorläufersubstanzen den Großteil der Kontamination darstellen (Nürnberg et al., 2018).

Basierend auf dem Bodenmaterial N-1 wurden Immobilisierungsansätze (R-1 bis R-4) mit verschiedenen Applikationsmöglichkeiten hergestellt: Mischungen R-1 und R-2 enthalten zusätzlich ca. 2,5 M-% aktivkohlebasierte Additive, R-3 ist ein zement- und bentonithaltiger Flüssigboden (mit ca. 93 M-% N-1), R-4 ist ein Beton mit belastetem Bodenmaterial als Zuschlagsstoff (ca. 6 M-%). Die verwendeten Rezepturen wurden in enger Zusammenarbeit mit Vertretern der Kiesindustrie festgelegt.

Zur Untersuchung der Elutionscharakteristiken und zur Entwicklung einer experimentellen Methode für Immobilisierungsansätze wurden Laborversuche auf verschiedenen Skalen durchgeführt, Batchversuche, gesättigte Säulenversuche sowie variabel-gesättigte Lysimeter. Die Batchversuche wurden nach der „Infinite-Sink“-Methode durchgeführt (Wege, 2005). Dabei handelt es sich um einen Schüttelversuch, bei dem Boden und Wasser im Verhältnis von ca. 1:5 in einer Glasflasche geschüttelt werden. Um die Desorptionsrate (Übergang vom Boden in die Wasserphase) während des Versuchsverlaufs auf möglichst hohem Niveau zu halten, steht ein Sorbens (Aktivkohlegranulat) in dauerhaftem Kontakt mit der Wasserphase. Die gelösten Stoffe adsorbieren an der Aktivkohle und werden somit kontinuierlich der Wasserphase entzogen. Das Wasser-Feststoff-Verhältnis spielt bei diesem Verfahren keine Rolle (außer evtl. für ultrakurzkettenige PFCA (TFAA, PFPrA), die aber in diesen Proben nicht untersucht wurden). Die Desorption der PFAS wird durch regelmäßigen Austausch und Extraktion des Sorbens analysiert. Eine vierfache Heißextraktion zur Analyse der adsorbierten Substanzen ergab Wiederfindungen von 80 – 120 %.

Zur Beurteilung der Beschaffenheit von Grund- und Sickerwasser wird derzeit in der Regel ein Säulenversuch nach DIN 19528 angewandt (siehe auch Röhler et al., 2021). Daran angelehnt wurden im Forschungsvorhaben gesättigte Elutionsversuche in Glassäulen (ID = 9 cm, L = 55 cm) mit regelmäßigen Probennahmen durchgeführt. Da die Erfassung von

Langzeiteffekten bei Immobilisierungen wichtig ist, wurden die Versuche bis zu hohen Wasser-Feststoff(WF)-Verhältnissen betrieben.

Die variabel-gesättigten Bedingungen in den Lysimetern kommen den Feldverhältnissen am nächsten. In den Glaszylindern mit einem Innendurchmesser von 60 cm wurden jeweils circa 180 kg der belasteten Bodenmaterialien eingebaut. Die Lysimeter wurden mit einer Wasserzugabe von 500 bis 1000 mm/a betrieben, die somit über der Grundwasserneubildung im Feld (circa 300 mm/a) liegt.

Die Elutionscharakteristik und die Feststoffgehalte in den Bodenmischungen wurden durch verschiedene analytische Methoden ermittelt. Die Messung von Zielverbindungen mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatografie-Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS-MS) wurde durch die Bestimmung der summarischen Parametern EOF (extrahierbares organisch gebundenes Fluor) und AOF (adsorbierbares organisch gebundenes Fluor) sowie mit dem Total Oxidizable Precursor (TOP)-Assay ergänzt. Insbesondere sollte die Langzeitstabilität der Immobilisierungsmaßnahmen untersucht werden. In den gesättigten Säulen- und den variabel-gesättigten Lysimeterversuchen (siehe Abbildung 1) war daher eine lange Versuchsdauer mit entsprechend hohen Wasser-Feststoff-Verhältnissen (in den gesättigten Versuchen > 20 L/kg) notwendig, um damit auch Langzeitprognosen zu ermöglichen.

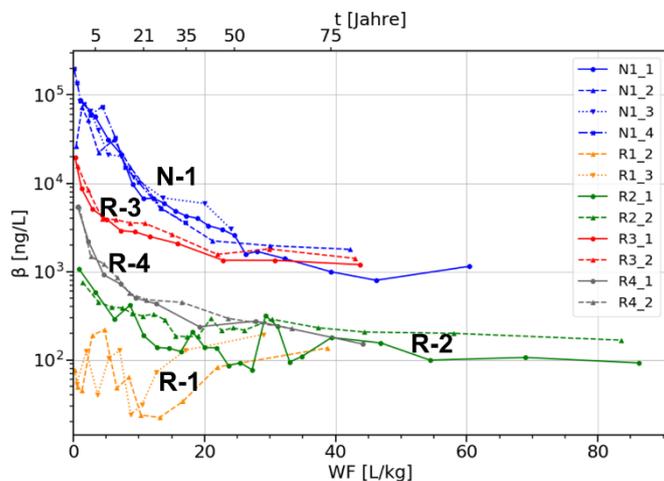


**Abb. 1:** Der Versuchsstand mit Lysimeter (vorne) und gesättigten Säulenversuchen (hinten) bei VEGAS, Universität Stuttgart.

Begleitend wurden mit HYDRUS-1D numerische Modelle angewendet, um Eluatkonzentrationen für größere Zeitskalen zu berechnen. Stofftransportrelevante Modellparameter (Kd-Werte und weitere Modellparameter) wurden für ausgewählte PFAS (PFBA, PFOA, PFOS) in eindimensionalen Simulationen kalibriert. Verschiedene Sorptionsmodelle, die beispielsweise auch die zeitabhängige Sorption im Nichtgleichgewichtszustand betrachten, stehen dabei zu Verfügung.

## Ergebnisse und Diskussion

In den Säulenversuchen mit N-1 wurden zu Versuchsbeginn Konzentrationen von bis zu 100 µg/L im Eluat nachgewiesen, die Verbindungen mit den höchsten Konzentrationen waren PFOA, PFDA und PFOS. Über den gesamten Versuchsverlauf (bis zu 142 Tage, WF ≈ 70 L/kg) wurden im Eluat ca. 520 µg/kg ΣPFAS (eluierte Masse normiert auf Bodenmasse) ausgetragen. Die PFAS-Konzentration im Eluat nimmt dabei zwar stetig ab (Abbildung 2), beispielsweise sinkt jedoch die PFOA-Konzentration erst bei WF > 40 L/kg unter den GFS-Wert von 100 ng/L. Bei einer Grundwassererneubildungsrate von 300 mm/Jahr entspräche dies im Feld ungefähr 80 Jahren (ohne Berücksichtigung von Transformationsreaktionen und möglicher zusätzlicher PFOA-Freisetzung).

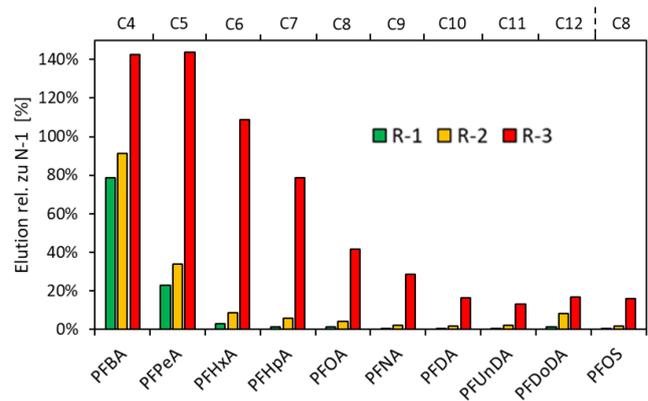


**Abb. 2:** Eluatkonzentrationen  $\beta$  (Summe der Konzentrationen der PFAS-Einzelsubstanzen) in den gesättigten Säulenversuchen in Abhängigkeit vom Wasser-Feststoff-Verhältnis (WF). Die zeitliche Entsprechung im Feld ist am oberen Rand des Diagramms angegeben.

In den mit aktivkohlehaltigen Reagenzien behandelten Böden (R-1 und R-2) wird in den Säulenversuchen eine deutlich reduzierte Elution der PFAS beobachtet: Im Vergleich zum unbehandelten Boden liegen die Eluatkonzentrationen (Summe der Konzentrationen der analysierten Einzelsubstanzen) zu Beginn bis zu einem Faktor 1000 niedriger (R-1 und R-2, Abbildung 2), die eluierten Stoffmengen betragen weniger als 4 %. Die Infinite-Sink-Versuche zeigen ein ähnliches Verhalten, jedoch liegen hier die Desorptionsraten methodenbedingt (Schüttelversuch) höher als in den Säulenversuchen. Dies wird insbesondere bei den Versuchen mit den behandelten Materialien deutlich: Vor allem die Desorption von langkettigen Verbindungen liegt im Batchversuch höher als im Säulenversuch.

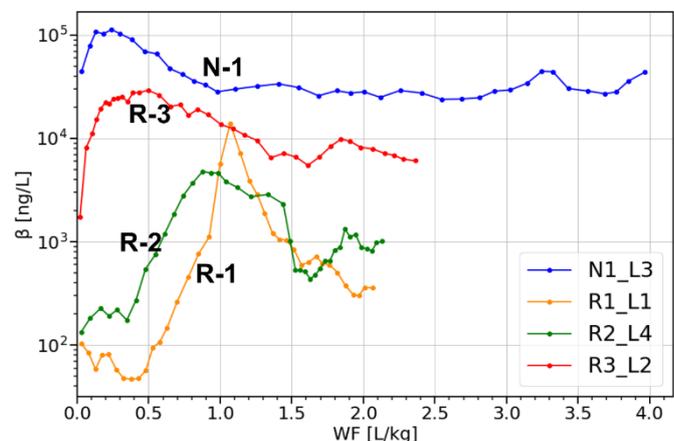
Sowohl beim Infinite-Sink- als auch beim Säulenelutionsverfahren ist zu erkennen, dass die Immobilisierungseffektivität der Einzelverbindungen variiert. Bei den kurzkettigen Carbonsäuren (PFBA, PFPeA) ist eine geringere Sorptionswirkung zu beobachten als bei Verbindungen mit Kohlenstoffkettenlängen von 6 bis 12 (PFHxA bis PFDODA, Abbildung 3). Bei der Elution der zementhaltigen Bodenmischungen R-3 und R-4 (alkalische

Eluate) werden höhere desorbierte Massen der kurzkettigen Carbonsäuren (PFBA, PFPeA, PFHxA) beobachtet als aufgrund des jeweiligen N-1-Anteils zu erwarten wäre. Zusätzlich zur erhöhten Desorption werden hier Transformationsreaktionen vermutet, die abiotisch oder in der Kombination abiotisch/biotisch (d. h. alkalische Hydrolyse, z. B. von Fluor-telemeralkohol-basierten Präkursoren, gefolgt von oxidativen Prozessen) polyfluorierte Substanzen in mobile Carbonsäuren mit verschiedenen Kettenlängen überführen.



**Abb. 3:** Elution von Einzelsubstanzen im Säulenversuch in den behandelten Böden (R-1, R-2, R-3) in Vergleich zur beobachteten Elution in N-1. In der oberen x-Achse sind die Kettenlängen der Alkylsäuren angegeben.

Ein besonderes Elutionsverhalten wird bei den behandelten Böden R-1 und R-2 in den variabel-gesättigten Lysimeterversuchen beobachtet. Hier findet eine verzögerte PFBA-Elution statt (Abbildung 4), die so in den übrigen Versuchsmethoden nicht nachgewiesen werden konnte. Zwar wird auch in den gesättigten Säulenversuchen eine verzögerte Elution von kurzkettigen Verbindungen beobachtet, jedoch bei deutlich niedrigeren Konzentrationen und höheren WF-Verhältnissen. Da die Elution in beiden Versuchsskalen ähnliche zeitliche Raten aufweist, könnten (zeitabhängige) biotische oder abiotische Transformationsprozesse beteiligt sein.



**Abb. 4:** Eluatkonzentrationen  $\beta$  (Summe der 27 analysierten Einzelsubstanzen) aus den Lysimeterversuchen mit den verschiedenen Bodenmischungen.

Im Vergleich der Elutionsdaten wird zudem deutlich, dass langkettige Verbindungen (bei gleichem WF-Verhältnis) im Lysimeter stärker retardiert werden. Zum Teil ist das auf den Tensidcharakter der PFAS (hydrophiler Kopf und hydrophobe Kohlenstoffkette) und dadurch eine zusätzliche Retardation durch Adsorption an Luft-Wasser-Grenzflächen zurückzuführen (siehe auch Brusseau et al., 2018). Für kurz-kettige Substanzen, die kaum an Bodenpartikel sorbieren und rasch mit dem Sickerwasser eluieren, z. B. PFBA, wird dieser Effekt nicht beobachtet.

Für die numerischen Simulationen wurde das Sorptionsmodell „two-site sorption“ gewählt, in dem eine sofortige (gemäß dem jeweiligen Verteilungsgleichgewicht nach Freundlich) und eine zeitabhängige (De-)Sorptions möglich ist. Das Modell kann die Elutionskurven in den gesättigten Säulenversuchen mit N-1 in guter Näherung darstellen. Die in einer „brute-force“-Kalibrierung bestimmten Parametersätze wurden basierend auf Elutionsdaten aus Versuchen mit unterschiedlichen Kontaktzeiten validiert. Ein stark nicht-konservatives Verhalten, das beispielsweise Elutionskurven wie bei den Lysimetern mit R-1 und R-2 ergibt, kann dabei jedoch ohne reaktive Prozesse kaum abgebildet werden.

In den Feststoffanalysen der unbehandelten und der behandelten Böden vor und nach den Versuchen wird deutlich, dass ein großer Anteil der Vorläufersubstanzen im Boden verbleibt (> 80 %). Untersuchungen des EOF bestätigen diese Beobachtung. Ein Teil dieser Vorläufersubstanzen sind polyfluorierte Alkylphosphatester (PAP) und Perfluoroktansulfonamidoethanol-basierte Phosphatester (SAmPAP). Vorläufersubstanzen und Zwischenabbauprodukte werden in geringen Gehalten auch in den Eluatproben gemessen. Diese werden bei Anwendung des TOP-Assays in messbare Endprodukte umgewandelt. Es hat sich gezeigt, dass die Vorläufersubstanzen größtenteils im Feststoff gebunden vorliegen, kaum verlagert werden und einen unbestimmten Quellterm für die mobileren perfluorierten Substanzen darstellen. Es wird vermutet, dass sich diese Transformationsprozesse auch auf die Langzeitstabilität von Immobilisierungsmaßnahmen auswirken können.

## Fazit

In den verschiedenen Elutionsverfahren wird eine stark reduzierte Desorption in den aktivkohlebasierten Mischungen (R-1, R-2) festgestellt. Bei Betrachtung der Desorption der Einzelsubstanzen ergeben sich vergleichbare Charakteristiken in den Infinite-Sink- und den gesättigten Säulenversuchen, die auf eine stoffspezifisch unterschiedlich starke Sorption in R-1, R-2 und R-3 schließen lassen. Bei den zementhaltigen Böden deuten zudem höhere Gehalte an kurz-kettigen PFAS im Eluat auf abiotische Transformationsprozesse hin. Bei den Infinite-Sink-Versuchen wird vor allem bei den behandelten Böden methodenbedingt eine höhere PFAS-Desorption festgestellt als in den Säulenversuchen. Unterschiedliche Bedingungen (kein WF-Verhältnis in den Infinite-Sink-Versuchen, unge-

sättigte Verhältnisse in den Lysimetern) erschweren den direkten Vergleich der gemessenen Zeitreihen.

Bei den Lysimetern wird mit dem verzögerten PFAS-Austrag ein abweichendes Elutionsverhalten beobachtet. Ob und inwiefern diese Beobachtung die Bewertung der Langzeitstabilität der PFAS-Immobilisierung beeinflussen kann, ist offen. Jedoch verdeutlicht dies die Bedeutung von ungesättigten Elutionsversuchen. Der Einfluss von Biotransformationen sowie der Einfluss von Luft-Wasser-Grenzflächen werden hier ähnlich wie im Feld abgebildet.

Die Untersuchungen zeigen, dass die PFAS-Emission von belasteten Böden mit aktivkohlehaltigen Reagenzien deutlich reduziert werden kann. Eine generelle Herausforderung bei der Bewertung von Immobilisierungsmaßnahmen ist, dass nur teilweise auf bestehende Grenzwerte (GFS-Werte für wenige Substanzen, Quotientensumme) zurückgegriffen werden kann und erwartungsgemäß künftig andere Bewertungskonzepte eingeführt werden. Zudem ist offen, inwiefern die beobachtete Wirksamkeit, die in Laborversuchen unter idealisierten Bedingungen bestimmt wird, auf die reale Situation im Feld übertragen werden kann. Der gewählte Ansatz mit verschiedenen Versuchsmethoden auf unterschiedlichen Skalen kann dabei hilfreich sein. Bei der experimentellen Untersuchung von Immobilisierungen muss gewährleistet sein, dass alle relevanten Prozesse in den Laborversuchen, wie z. B. die stoffspezifischen, langfristigen Desorptionsraten, ausreichend abgebildet werden. Der Vergleich der verschiedenen Versuchsskalen spielte bei der Erarbeitung dieser experimentellen Vorgehensweise eine zentrale Rolle. Alle experimentellen Methoden lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Charakterisierung der PFAS-Elution in Immobilisierungsansätzen. Durch den Einsatz von verschiedenen Versuchstypen und den Vergleich von Elutionsdaten konnten beteiligte Prozesse (wie z.B. Transformationen, Adsorption an Luft-Wasser-Grenzflächen) herausgearbeitet werden. Zur Untersuchung von PFAS-Immobilisierungen wird daher empfohlen, verschiedene Versuchsmethoden zu kombinieren. Zur Untersuchung von Langzeiteffekten sind zudem lange Versuchslaufzeiten nötig. Es bedarf weiterer Untersuchungen, etwa zum Einfluss der Biotransformation auf die Langzeitstabilität von Immobilisierungen.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt „PFAS-Immo“ wurde mit Mitteln des Umweltministeriums Baden-Württemberg innerhalb des Förderprogramms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)“ (Förderkennzeichen L7519001) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Autoren danken für die Unterstützung. Das Forschungsvorhaben endete im Juni 2022.

## Quellen

- Bräunig, J., Baduel, C., Barnes, C. M., Mueller, J. F. (2021): Sorbent assisted immobilisation of perfluoroalkyl acids in soils - effect on leaching and bioavailability. *J. Hazard. Mater.* 412, 125171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125171>
- Brusseau, M. L. (2018): Assessing the potential contributions of additional retention processes to PFAS retardation in the subsurface. *Sci. Total Environ.* 613-614, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.065>
- Bugsel, B., Bauer, R., Herrmann, F., Maier, M.E., Zwiener, C. (2022): LC-HRMS screening of per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) in impregnated paper samples and contaminated soils. *Anal. Bioanal. Chem.* 414, 1217-1225. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03463-9>
- DIN (2009). Norm 19528:2009-01. Elution von Feststoffen - Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen. Beuth Verlag, Berlin.
- Hale, S. E., Arp, H. P., Slinde, G. A., Wade, E. J., Bjørseth, K., Breedveld, G. D., Straith, B. F., Moe, K. G., Jartun, M., Høisæter, Å. (2017): Sorbent amendment as a remediation strategy to reduce PFAS mobility and leaching in a contaminated sandy soil from a Norwegian firefighting training facility. *Chemosphere* 171, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.057>
- Kabiri, S., McLaughlin, M. J. (2021): Durability of sorption of per- and polyfluorinated alkyl substances in soils immobilized using common adsorbents: 2. Effects of repeated leaching, temperature extremes, ionic strength and competing ions. *Sci Total Environ.* 766, 144718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144718>
- Klatt, P. (2022): Zehn Jahre PFAS-Belastung in Mittelbaden: Ein „Freilandexperiment“ mit unbekanntem Ausgang? *Mitt. Umweltchem. Ökotox.* 28, 47-51
- McDonough, J. T., Anderson, R. H., Lang, J. R., Liles, D., Matteson, K., & Olechiw, T. (2022): Field-scale demonstration of PFAS leachability following in situ soil stabilization. *ACS Omega* 7, 419-429. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04789>
- Nürnberg, G. et al. (2018): Nachweis von polyfluorierten Alkylphosphatestern (PAP) und Perfluoroktansulfonamidoethanol-basierten Phosphatestern (SAMPAP) in Böden. *Mitt. Umweltchem. Ökotox.* 24, 28-32.
- Röhler, K., Haluska A. A., Susset B., Liu B., Grathwohl P. (2021): Long-term behavior of PFAS in contaminated agricultural soils in Germany, *J. Contam. Hydrol.* 241, 103812 <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103812>
- Söregård, M., Gago-Ferrero, P., Kleja, D. B., Ahrens, L. (2021): Laboratory-scale and pilot-scale stabilization and solidification (S/S) remediation of soil contaminated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *J. Hazard. Mater.* 402, 123453. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123453>

Wege, R. (2005): Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser. Dissertation, IWS, Universität Stuttgart

## Korrespondenzadresse

Thomas Bierbaum  
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)  
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart  
E-Mail: [thomas.bierbaum@iws.uni-stuttgart.de](mailto:thomas.bierbaum@iws.uni-stuttgart.de)