



Terrestrisches Umweltmonitoring – Messen wir die richtigen Stoffe?

Wolfgang Körner (wolfgang.koerner@lfu.bayern.de)

Zusammenfassung

Der flächenhafte Eintrag von Spurenstoffen in terrestrische Ökosysteme erfolgt durch atmosphärische Deposition. Stoffe mit (halb)offenen Verwendungen wie Kunststoffadditive sind deshalb grundsätzlich relevant. Semiflüchtige organische Substanzen haben Potenzial zur Verflüchtigung und gleichzeitig Neigung zur Deposition. Sind solche Stoffe persistent, werden sie auf dem Luftweg weit transportiert. Persistenz, Mobilität und Bioakkumulation sind also zentrale Relevanzkriterien für das terrestrische Umweltmonitoring. Anhand von bromierten Flammschutzmitteln und UV-Lichtschutzmitteln mit 2-Hydroxyphenylbenzotriazol-Struktur wird die Notwendigkeit der Priorisierung veranschaulicht, um begrenzte Laborkapazitäten effizient zu nutzen. Hinweise zur Erweiterung des Monitorings über wenige in Luft und Boden regulierte organische Stoffe hinaus werden gegeben. Dabei werden fünf allgemeingültige Thesen abgeleitet.

Einleitung

Seit 1950 ist die weltweite Chemikalienproduktion um das 50-fache angestiegen. Allein von 2000 bis 2017 hat sich die globale Produktionskapazität für Chemikalien nahezu verdoppelt. Bis 2050 wird eine weitere Verdreifachung der jährlich produzierten Chemikalienmenge erwartet [1]. Persson et al. folgern, dass die Belastungsgrenze des Erdsystems für den Eintrag synthetischer Substanzen und Materialien überschritten und mit einer nachhaltigen Entwicklung künftiger Generationen nicht mehr verträglich ist. Weltweit werden rund 350.000 Chemikalien für kommerzielle Zwecke produziert [1]. Bei der Europäischen Chemikalienagentur ECHA sind aktuell ca. 27.000 Substanzen registriert, die in der EU jährlich mit > 1 Tonne produziert oder importiert werden [2]. Sehr groß ist die Vielfalt der zur Herstellung von Kunststoffen eingesetzten Substanzen: Wiesinger et al. [3] nennen 10.547 Chemikalien, die als Monomere, Verarbeitungshilfsstoffe oder Additive verwendet werden. Eine aktuelle UNEP-Studie identifiziert sogar über 13.000 Chemikalien im direkten Zusammenhang mit Produktion und Einsatz von Kunststoffen [4]. Die große Mehrzahl dieser Substanzen sind organische Stoffe.

Chemikalien, die in Materialien und Produkten für die gewerbliche und private Nutzung eingesetzt werden, befinden sich meistens nicht in einem geschlossenen System und können deshalb grundsätzlich in gewissen Anteilen in die Umwelt gelangen – in der Regel auf unbeabsichtigte Weise. Das Monitoring von Chemikalien in terrestrischen Umweltmedien wie Luft, Deposition, Böden, Pflanzen und Tieren beschränkt sich hingegen bisher auf eine sehr begrenzte Zahl an (an)organischen Stoffen, zumal es nur für wenige Substanzen Grenz- oder Richtwerte gibt.

In diesem Artikel werden zunächst die Kriterien aufgeführt, die eine Chemikalie für den Eintrag in die terrestrische Umwelt und somit für das Monitoring relevant machen und dadurch eine Priorisierung ermöglichen. Anhand einiger Beispiele wird die Priorisierung veranschaulicht und es werden Hinweise für gezielte Anpassungen im terrestrischen Umweltmonitoring gegeben, um begrenzte (Labor)Kapazitäten von Umweltbehörden effizient zu nutzen. Daraus werden fünf allgemeingültige Thesen abgeleitet.

Kriterien für relevante Stoffe

Abgesehen von lokal begrenzten Altlasten, wie ungesicherte Abfalldeponien und kontaminierte ehemalige (und aktuelle) gewerbliche Standorte, ist der flächenhafte Eintrag von Spurenstoffen in terrestrische Ökosysteme nur durch atmosphärische Deposition möglich. Dazu müssen Chemikalien erst einmal in die Atmosphäre gelangen. Die Tendenz einer Substanz aus dem festen oder flüssigen Zustand in die Gasphase überzugehen, wird im Wesentlichen durch ihren Sättigungsdampfdruck P^0 bestimmt, der auf die thermodynamische Standardtemperatur von 25 °C bezogen wird. Leichtflüchtige organische Stoffe (volatile organic compounds, VOC), deren Sättigungsdampfdruck bei 25 °C über 10 Pa liegt, was einer Siedetemperatur von < 260 °C entspricht, haben zwar eine starke Tendenz in die Atmosphäre überzugehen, aber meist nur eine geringe Neigung zur Deposition. Ein erhebliches Potenzial zur Verflüchtigung in die Atmosphäre und gleichzeitig die Fähigkeit zur gasförmigen und partikelgebundenen Deposition besitzen hingegen semiflüchtige organische Substanzen (semivolatile organic compounds, SVOC), deren Sättigungsdampfdrücke einen großen Bereich von 10 bis 10^{-5} Pa umfassen, entsprechend einer Siedetemperatur von 240-260 °C bis 380-400 °C [5]. SVOC liegen in der Atmosphäre bei den in Mitteleuropa üblichen Umgebungstemperaturen teilweise oder sogar überwiegend gasförmig vor. Bei hinreichender Stabilität können solche Substanzen auf dem Luftweg weit transportiert werden. Das ist auch für semiflüchtige Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe nachgewiesen [6]. Auch schwerflüchtige organische Stoffe ($P^0_{25\text{ °C}} < 10^{-5}$ Pa; $T_b > 400$ °C), die in der Atmosphäre überwiegend oder vollständig partikelgebunden vorliegen, können in die Luft eingetragen werden. Schwerflüchtige Stoffe deponieren überwiegend auf Oberflächen in der näheren Umgebung ihrer Quellen und können somit lokale und ggf. regionale Belastungen der terrestrischen Umwelt verursachen.

Von primärer Relevanz für die Belastung der terrestrischen Umwelt sind folglich Chemikalien, die in erheblichen Mengen bzw. Anteilen ihrer produzierten Masse in die Atmosphäre gelangen. Dazu zählen Substanzen in umweltoffenen Anwendungen wie Lösemittel in Farben und Lacken, Pflanzenschutz-

mittel und Biozide sowie Stoffe, die über Abgas und Abluft von stationären Anlagen freigesetzt werden. Auch bei Chemikalien, die physikalisch, d.h. ohne chemische Bindung in eine stoffliche Matrix, gemischt sind, handelt es sich um eine umwelt-offene Anwendung, sofern Oberflächen dieser Materialien Kontakt zur Umgebungsluft haben. Zu dieser Verwendungskategorie zählen die meisten Substanzen, die Kunststoffen als Additive zugesetzt werden. Diese Stoffe werden in die Polymerschmelze von Thermoplasten (z.B. Polystyrol) bei der Extrusion zugemischt und liegen im Kunststoffprodukt in Massenkonzentrationen von < 1 % bis über 30 % vor.

An der Oberfläche eines mit einem Additiv versetzten Kunststoffprodukts besteht somit ein steiler Konzentrationsgradient zur umgebenden Luft, in der die Konzentration des Additivs im Spurenbereich liegt. Es besteht also im System Kunststoffprodukt – Luft ein Bestreben, das Konzentrationsgefälle des Additivs durch Diffusion zu verringern, d.h. durch Stofftransport entlang des Konzentrationsgradienten. Diffusion ist grundsätzlich auch bei schwerflüchtigen Substanzen möglich. In der Umwelt wird durch den ständigen Luftaustausch praktisch nie ein Gleichgewicht zwischen kondensierter Phase und Gasphase eines Stoffes erreicht. Die Diffusion eines Additivs aus einem Kunststoffgegenstand in die Umgebungsluft findet also ständig während des gesamten Verwendungszeitraumes statt. Da die Diffusionsgeschwindigkeit mit der Temperatur steigt, bewirken hohe Lufttemperaturen, direkte Sonneneinstrahlung auf Materialien und die Erwärmung von Kunststoffteilen im Gebrauch durch Reibung und im Betrieb von Elektrogeräten eine beschleunigte Freisetzung von Additiven in die Atmosphäre. Hinsichtlich Verwendungsmengen und Umweltrelevanz sind Weichmacher, Flammschutzmittel, Antioxidantien und UV-Lichtschutzmittel die wichtigsten Gruppen von Additiven [7].

Sind Stoffe mit einem Potenzial zur diffusen Freisetzung in die Atmosphäre persistent, dann können sie auf dem Luftweg sehr weit transportiert und in entlegene terrestrische und aquatische Ökosysteme durch atmosphärische Deposition eingetragen werden. Die Persistenz in der Umwelt ist wiederum Voraussetzung für die Bioakkumulation in Lebewesen und die Biomagnifikation in Nahrungsketten. Persistenz und Mobilität in der Atmosphäre sowie Bioakkumulation sind also weitere wesentliche Relevanzkriterien zur Stoffauswahl für das Monitoring in terrestrischen Umweltmedien einschließlich Luft und Deposition.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es im EU-Chemikalienrecht REACH im Gegensatz zur Stockholm-Konvention für die Einstufung einer Chemikalie als besonders besorgniserregende Substanz (SVHC, Substance of Very High Concern) kein Kriterium für die Mobilität in der Atmosphäre gibt. Ebenso wenig werden Potenzial und Ausmaß der Freisetzung einer Chemikalie in die Atmosphäre bei der SVHC-Bewertung berücksichtigt.

Priorisierung von Stoffen und Beispiele

Projektbezogene Luftmessungen des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) im städtischen Hintergrund von Augsburg und auf der Zugspitze auf halogenierte Flammschutzmittel haben gezeigt, dass auch schwerflüchtige Stoffe wie Decabromdiphenylethan (DBDPE), Hexabromcyclododecan (HBCD) und Dechlorane Plus, dessen Aufnahme als POP in die Stockholm-Konvention im Mai 2023 beschlossen wurde, praktisch immer zu finden sind [8; 9]. Der Eintrag von DBDPE und HBCD in alpine Waldökosysteme durch atmosphärische Deposition konnte bereits in Bodenproben von Streu- und Humusaufgaben im Nationalpark Berchtesgaden aus dem Jahr 2009 nachgewiesen werden (Abb. 1) [10].

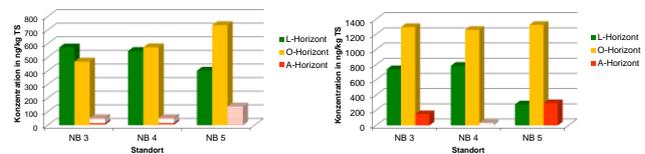


Abbildung 1: Konzentrationen von Decabromdiphenylethan (links) und Hexabromcyclododecan (rechts). Summe aller Isomere in den drei obersten Bodenhorizonten im Bergwald des Nationalparks Berchtesgaden in Höhenlagen von 1198 m (NB 3), 1334 m (NB 4) und 1421 m (NB 5) in ng/kg Trockensubstanz [10]. Im A-Horizont lagen die Gehalte oft unter der analytischen Bestimmungsgrenze, die als rot-weiß schraffierte Säule angegeben ist. Die Probenahme erfolgte im Juli 2009 durch Dr. Edzard Hangen, LfU-Referat 103.

DBDPE wird seit den 1990er Jahren als additives Flammschutzmittel als Ersatz für Decabromdiphenylether verwendet. Hier handelt es sich offensichtlich um eine *regrettable substitution*, denn hinsichtlich Persistenz zeigen diese beiden hochbromierten, strukturell eng verwandten aromatischen Verbindungen (Abb. 2) keinen wesentlichen Unterschied.

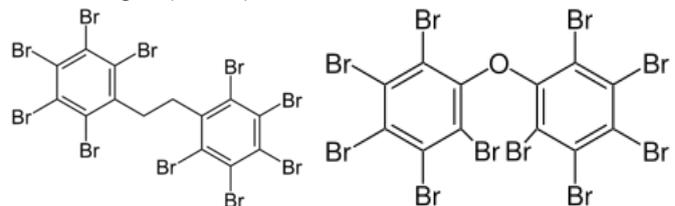


Abbildung 2: Strukturformeln von Decabromdiphenylethan (links) und Decabromdiphenylether (rechts).

Das Beispiel zeigt, dass das *Umweltmonitoring essentiell für die Regulierung von Stoffen unter REACH ist (1. These)*, also die Nutzung aller verfügbaren Informationen zur Bewertung nach dem „Weight-of-evidence“-Prinzip. Im Fall von DBDPE ist noch keine Regulierung erfolgt. Allerdings hat die ECHA im März 2023 ihre Strategie zur Regulierung von Flammschutzmitteln veröffentlicht, in der bromierte aromatische Flammschutzmittel als Kandidaten für eine EU-weite Beschränkung identifiziert werden, weil diese Stoffe im Allgemeinen in der Umwelt persistent sind [11]. Ein entsprechender Beschränkungsvorschlag, der auch einige aliphatische bromierte Flammschutzmittel enthalten könnte, wird für 2025 in Aussicht gestellt.

Scheringer et al. [12] identifizierten von 93.144 organischen Chemikalien aus dem European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances (EINECS) 510 Stoffe (Unsicherheitsbereich: 190 – 2100), die alle Screening-Kriterien der Stockholm-Konvention als POP erfüllen. Bei komplexeren Stoffgruppen wie den polybromierten Diphenylethern wurde dabei lediglich jede Homologengruppe als eine Substanz gezählt. Somit dürfte die begrenzte Zahl an PBT- und vPvB-Stoffen auf der aktuell insgesamt 235 Substanzen umfassenden Liste der besonders besorgniserregenden Substanzen (SVHC) der REACH-Verordnung [13] noch sehr unvollständig sein. Die Mehrzahl der Stoffe sind wegen ihrer Kanzerogenität oder Mutagenität oder Reproduktionstoxizität (sog. CMR-Stoffe) auf der SVHC-Liste.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) priorisierte 2015-2017 in einem Projekt unter REACH (vor)registrierte Stoffe u.a. nach Persistenz und Bioakkumulation und dem Potenzial zum diffusen Eintrag in die Umwelt. Unter den 81 priorisierten Stoffen waren 12 weitere bromierte Flammenschutzmittel, 12 UV-Lichtschutzmittel mit 2-Hydroxyphenylbenzotriazol-Struktur sowie flüchtige Methylsiloxane [14]. Bei Luftmessungen der „neuen“ bromierten Flammenschutzmittel im städtischen Hintergrund in Augsburg mit jeweils vierwöchigen Probenahmen nach VDI-Richtlinie 2464 Blatt 3 [15] von Dezember 2019 bis Mai 2020 zeigten 1,3,5-Tribrom-2-(2,3-dibrompropoxy)benzol (DPTE) mit 5,9 – 29,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und α/β -1,2-Dibrom-4-(1,2-dibrom-ethyl)cyclohexan (TBECH) mit 2,5 – 7,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auffällige Konzentrationen [16]. DPTE wurde bei Untersuchungen von Haubentauchereiern vom Eibsee am Fuß der Zugspitze in allen Proben mit Gehalten bis zu 3,55 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Fett gefunden; BATE (s. Abb. 3), ein Transformationsprodukt von DPTE, war in fünf von sieben Proben in Konzentrationen bis zu 0,60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Fett nachweisbar [17].

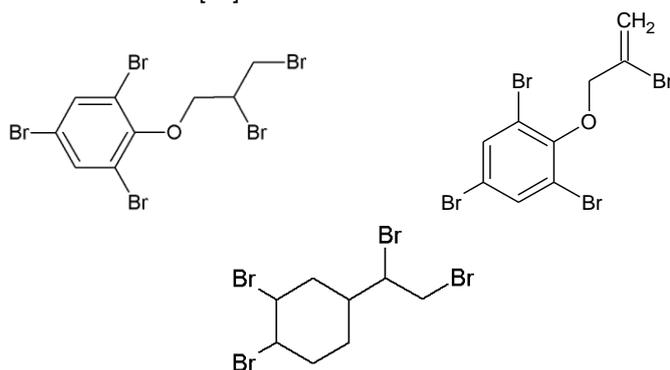


Abbildung 3: Strukturformeln von 1,3,5-Tribrom-2-(2,3-dibrompropoxy)benzol, DPTE (links), 2-Bromallyl-2,4,6-tribromphenylether, BATE (rechts) und α/β -1,2-Dibrom-4-(1,2-dibrom-ethyl)cyclohexan, TBECH (unten).

Bei den UV-Lichtschutzmitteln wurden UV-328 und vier bisher nicht regulierte Substanzen in der Humusaufgabe des Waldbodens im Nationalpark Berchtesgaden aus dem Jahr 2009 jeweils im unteren $\mu\text{g}/\text{kg}$ -Bereich nachgewiesen - ein deutlicher Hinweis auf Freisetzung dieser Kunststoffadditive in die Luft, atmosphärischen Ferntransport und Deposition. UV-328 sowie UV-320 (s. Abb. 4), UV-327 und UV-350 sind aufgrund ihrer

Persistenz und Bioakkumulation seit 2020 auf der Liste der zu-lassungspflichtigen Stoffe der REACH-Verordnung und dürfen nach dem 27.11.2023 nicht mehr in neuen Produkten verwendet werden [18]. Für UV-328 beschloss im Mai 2023 die Vertragsstaatenkonferenz der Stockholm-Konvention die Aufnahme als POP. UV-328 ist die erste halogenfreie Substanz, die unter der Stockholm-Konvention global reguliert wird.

Eine systematische Priorisierung von Stoffen ist also für das (terrestrische) Umweltmonitoring wichtig (2. These).

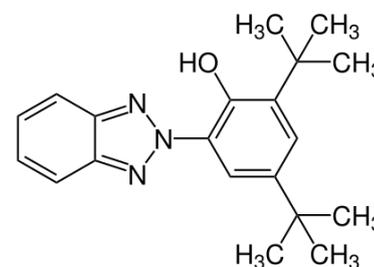
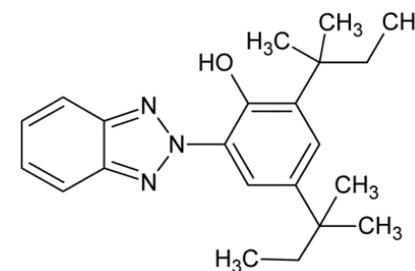


Abbildung 4: Strukturformeln der UV-Lichtschutzmittel 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol, UV-328 (links) und 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-butylphenol, UV-320 (rechts)

Grenzwerte für Luft und Böden

Trotz der aufgezeigten Relevanz einer größeren Zahl organischer Stoffe gibt es für das Umweltedium Luft bisher nur für Benzol und Benzo[a]pyren einen verbindlichen Grenz- bzw. Zielwert, dessen Überwachung in Deutschland Aufgabe der Landesumweltämter ist. Der Prozess zur Einführung eines umweltbezogenen Grenzwertes für eine Chemikalie ist langwierig und erfordert neben fundierten Daten zur (Öko)toxikologie umfangreiche Umweltmonitoringdaten mit spezifischen und empfindlichen validierten Analyseverfahren. Die betroffenen Akteure in Industrie und Gesellschaft haben also jahrelang Zeit, sich auf die erwartete Entwicklung und den kommenden Grenzwert einzustellen. Der EU-weite Grenzwert für Benzol in Luft von 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel wurde beispielsweise zum 01.01.2005 mit fünfjähriger Übergangsphase eingeführt, gilt also erst seit dem 01.01.2010. Benzolkonzentrationen z.T. deutlich über 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Luft deutscher Großstädte waren jedoch bereits ab 1995 ein Thema, als regelmäßige Messungen an Luftmessstationen in einigen Bundesländern begannen. Die entscheidende Maßnahme für den Rückgang der Immissionskonzentrationen war die Minderung des Benzolgehaltes in Benzin durch die Mineralölindustrie. 2010 lagen an den verkehrsnahen Messstationen z.B. in Bayern die Benzoljahresmittelwerte bereits weit unter dem Grenzwert und sind

seitdem weiter rückläufig [19]. Daraus lässt sich folgern, dass das *Umweltmonitoring vor Einführung eines Grenzwertes wichtiger ist als die Überwachung des Grenzwertes* (**3. These**).

Um die begrenzten behördlichen Laborkapazitäten für aktuelle, relevante Substanzen nutzen zu können, ist es deshalb notwendig, das Monitoring von geregelten Stoffen, bei denen der Grenzwert für das betreffende Umweltmedium mehrere Jahre sicher eingehalten wird und kein zunehmender Trend erkennbar ist, rasch auf ein Minimum zu reduzieren. Aus verschiedenen Gründen sind jedoch in den *Monitoring- und Laboreinheiten der Umweltbehörden starke Bewahungskräfte weit verbreitet* (**4. These**).

So wichtig die Validierung eines neuen Analyseverfahrens vor Beginn eines Umweltmonitorings und die laufende Kontrolle der analytischen Qualität zweifellos sind, so setzen die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 an akkreditierte Prüflaboratorien insgesamt hohe Hürden, um Umweltmessprogramme für neue Chemikalien zu beginnen. Für neu in den Fokus kommende Substanzen wird es zunächst weder (zertifizierte) Referenzmaterialien noch Ringversuche zur analytischen Qualitätssicherung geben. Die selbst organisierte Durchführung einer Vergleichsmessung mit ein oder wenigen anderen Laboren, die ebenfalls ein analytisches Verfahren für die betreffende(n) Substanz(en) etabliert haben, ist dann die einzige und bestmögliche Option. Gerade für das Medium Luft sind Laborvergleichsuntersuchungen und Ringversuche viel schwerer zu realisieren als für feste und wässrige Umweltmedien.

Auch in der 2021 novellierten und am 01.08.2023 in Kraft getretenen Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) gibt es nur für eine sehr begrenzte Zahl organischer Stoffe Vorsorgewerte oder Prüf- und Maßnahmewerte für die Pfade Boden-Mensch und Boden-Pflanze [20]. Die meisten dieser Substanzen werden seit langem nicht mehr verwendet, darunter die alten, bereits lange verbotenen Organochlorinsektizide Aldrin, DDT und Hexachlorcyclohexan (vier Isomere). Solche Stoffe sind für eine Bodendauerbeobachtung in der Fläche nicht relevant. Die BBodSchV enthält aber keine Messverpflichtung für persistente Substanzen, die aktuell als Kunststoffadditive Verwendung finden oder bis in jüngere Zeit fanden.

5. These: *Das Monitoring alter Stoffe frisst Kapazitäten für aktuelle Stoffe*

Ausblick

Große, aktuelle Herausforderungen für die Analytik und das (terrestrische) Umweltmonitoring bestehen durch persistente Stoffgruppen, die als komplexe Substanzgemische verwendet werden bzw. auftreten: Mittelkettige Chlorparaffine (MCCP), die häufig erheblich mit kurzkettigen Chlorparaffinen (SCCP) verunreinigt sind, werden in riesigen Mengen (> 1 Mio. t pro Jahr) vor allem als Weichmacher und Flammschutzmittel in PVC-, Polyurethan- und Gummiprodukten verwendet [21],

wodurch ein Eintrag in die Umwelt unvermeidlich ist. Enorm ist die Vielfalt der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) mit unterschiedlichsten anionischen, neutralen, kationischen und zwitterionischen funktionellen Gruppen. Für die Bestimmung eines PFAS-Summenparameters wie dem EOF in Boden und anderen Feststoffproben ist deshalb eine Erweiterung der für anionische und neutrale PFAS etablierten Extraktionsmethoden sinnvoll [22, 23]. PFAS sind ubiquitär in Böden nachweisbar, insbesondere in Waldökosystemen [24, 25]. Zur Messung von PFAS in Abgas und Abluft stationärer Anlagen fehlt selbst für klassische perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren ein validiertes, genormtes Probenahmeverfahren; hier besteht akuter Handlungsbedarf [26].

Das Potenzial zur diffusen Freisetzung in die Luft während der Verwendung und das Potenzial für den atmosphärischen Ferntransport sind bisher keine Kriterien für die Einstufung einer Chemikalie als besonders besorgniserregende Substanz im EU-Chemikalienrecht. Angesichts der Relevanz solcher Stoffe für den weit verbreiteten Eintrag in terrestrische Ökosysteme ist für den vorsorgenden Umwelt- und Gesundheitsschutz hier eine Weiterentwicklung der REACH-Verordnung erforderlich.

Literatur

- [1] L. Persson, B.M. Carney Almroth, C.D. Collins et al. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science & Technology* 56, 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- [2] ECHA European Chemicals Agency 2023. REACH – Registered Substances Factsheets. <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/registered-substances> Aufgerufen am 11.08.2023.
- [3] H. Wiesinger, Z. Wang, S. Hellwg (2021). Deep Dive into Plastic Monomers, Additives, and Processing Aids. *Environmental Science & Technology* 55, 9339-9351. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00976>
- [4] United Nations Environment Programme (2023). Chemicals in Plastics – A Technical Report. ISBN: 978-92-807-4026-4. <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report>
- [5] DIN ISO 16000-25 (2012). Innenraumluftverunreinigungen – Teil 25: Bestimmung der Emission von schwerflüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten – Mikroprüfkammervverfahren (ISO 16000-25:2011). Beuth-Verlag, Berlin.
- [6] M. Kruse-Platz, F. Hofmann, W. Wosniok, U. Schlechtriemen, N. Kohlschütter (2021). Pesticides and Pesticide-related Products in Ambient Air in Germany. *Environmental Sciences Europe* 33, 114-134. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00553-4>
- [7] R.D. Maier, M. Schiller (2016). *Handbuch Kunststoff-Additive*. 4. Auflage, Carl Hanser, München. ISBN: 978-3-446-22352-3.

- [8] W. Körner, S. Kastenhofer (2015). Ermittlung der städtischen Hintergrundkonzentrationen bromierter Flammschutzmittel in Außenluft. Mitteilungen der GDCh-Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie 21(3), 80-86. ISSN: 1618-3258.
- [9] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021). PureAlps 2016-2020 - [Abschlussbericht](#).
- [10] A.M. Wallner (2012). Spurenanalytische Untersuchungen zu Quellen und Verbleib neuer bromierter Flammschutzmittel in der terrestrischen Umwelt. Diplomarbeit Fachhochschule NTA Prof. Dr. Grübler gGmbH Isny / Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- [11] ECHA European Chemicals Agency (2023). Regulatory Strategy for Flame Retardants. March 2023. ISBN: 978-92-9468-261-1. DOI: 10.2823/854233. [All news - ECHA \(europa.eu\)](#)
- [12] M. Scheringer, S. Stempel, S. Hukari, C.A. Ng, M. Blepp, K. Hungerbühler (2012). How Many Persistent Organic Pollutants Should We Expect? Atmospheric Pollution Research 3, 383-391.
- [13] ECHA European Chemicals Agency (2023). Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Substanzen. <https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table> Aufgerufen am 11.08.2023.
- [14] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2019). Nachweis besorgniserregender Chemikalien in der Umwelt - [Abschlussbericht](#).
- [15] VDI-Richtlinie 2464 Blatt 3 (2012). Messen von Immissionen - Messen von Innenraumluft - Messen von polybromierten Diphenylethern, Hexabromcyclododecan und Hexabrombenzol. Beuth-Verlag, Berlin.
- [16] M. Nichterlein (2020). Etablierung einer spurenanalytischen Methode für neuartige bromierte Flammschutzmittel in Immissions- und Biotaprobe mit einem Gaschromatograph-Tandem-Massenspektrometer. Masterarbeit, Hochschule Coburg.
- [17] V. Reitsam (2019). Determination of Emerging Brominated Flame Retardants in Wild Bird Eggs from the Alpine Region and other Biota Using GC-MS/MS. Master Thesis, Universität Ulm.
- [18] ECHA European Chemicals Agency (2023). Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe (List of Substances Included in Annex XIV of REACH). <https://echa.europa.eu/de/authorisation-list>. Aufgerufen am 11.08.2023.
- [19] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2023). Lufthygienische Jahreskurzberichte 1997 – 2022 und Lufthygienische Jahresberichte 2005 – 2021. https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/lufthygienische_berichte/index.htm
- [20] Verordnung zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021, Anlage 1 und 2. <https://www.bmu.de/gesetz/bundesbodenschutz-und-altlastenverordnung-bbodschv>
- [21] C. Chen, A. Chen, F. Zahn, F. Wania, S. Zhang, L. Li, J. Liu (2022). Global Historical Production, Use, In-Use-Stocks, and Emissions of Short-, Medium-, and Long-Chain Chlorinated Paraffins. Environmental Science & Technology 56, 7895-7904. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00264>
- [22] Held (2020). Precursor! altlasten spektrum 29(6), 225–231.
- [23] A. Nickerson, A.C. Maizel, P. Kulkarni, D.T. Adamson, J.J. Kotnuc, C.P. Higgins (2020). Enhanced Extraction of AFFF-Associated PFASs from Source Zone Soils. Environmental Science & Technology 54, 4952–4962. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00792>
- [24] M. Söregård, J. Kikuchi, K. Wiberg, L. Ahrens (2022). Spatial Distribution and Load of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Background Soils in Sweden. Chemosphere 295, 133944. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133944>
- [25] J. Wellnitz, N. Bandow, J. Koschorreck (2023). Long-term Trend Data for PFAS in Soils from German Ecosystems Including TOP Assay. Science of the Total Environment 893, 164586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164586>
- [26] H. Brunn, G. Arnold, W. Körner, G. Rippen, K. G. Steinhäuser, I. Valentin (2023). PFAS: Forever Chemicals – Persistent, Bioaccumulative and Mobile. Reviewing the Status and the Need for their Phase out and Remediation of Contaminated Sites. Environmental Sciences Europe 35, 20-69. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

Korrespondenzadresse

PD Dr. Wolfgang Körner
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Referat 74 - Organische Analytik
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
E-Mail: wolfgang.koerner@lfu.bayern.de