

Pflanzenschutzmittel – vom Winde verweht

Plant protection products – Gone with the wind

Konstantin Kuppe, Ulrike Krug, Christina Pickl

Kontakt

Konstantin Kuppe | Umweltbundesamt | Fachgebiet IV 1.3 – Pflanzenschutzmittel | Wörlitzer Platz 1 |
06844 Dessau-Rosslau | E-Mail: konstantin.kuppe@uba.de

Zusammenfassung

Pflanzenschutzmittel können während oder nach ihrer Anwendung über die Luft in weit entfernte Gebiete gelangen. Im Normalfall geht von solchen Einträgen keine direkte Gefahr für die menschliche Gesundheit oder die Natur aus. Dennoch können sie zu Problemen führen, zum Beispiel, wenn Erntegut über die Luft mit Pflanzenschutzmitteln verunreinigt wird und dadurch nur noch eingeschränkt vermarktet werden kann. Das ist besonders für die Koexistenz von Bio- und konventionellem Anbau problematisch und könnte die Ausbauziele der Bundesregierung in Bezug auf die biologische Landwirtschaft gefährden.

Abstract

During or after their application, plant protection products can reach distant areas via the air. Normally, such emissions do not pose a direct threat to human health or nature. Nevertheless, the airborne transport can lead to problems, for example if crops are contaminated with pesticides and can only be marketed to a limited extent. This is particularly challenging for the coexistence of organic and conventional farming and may jeopardize the German government's goals with regard to the increasing role of organic farming.





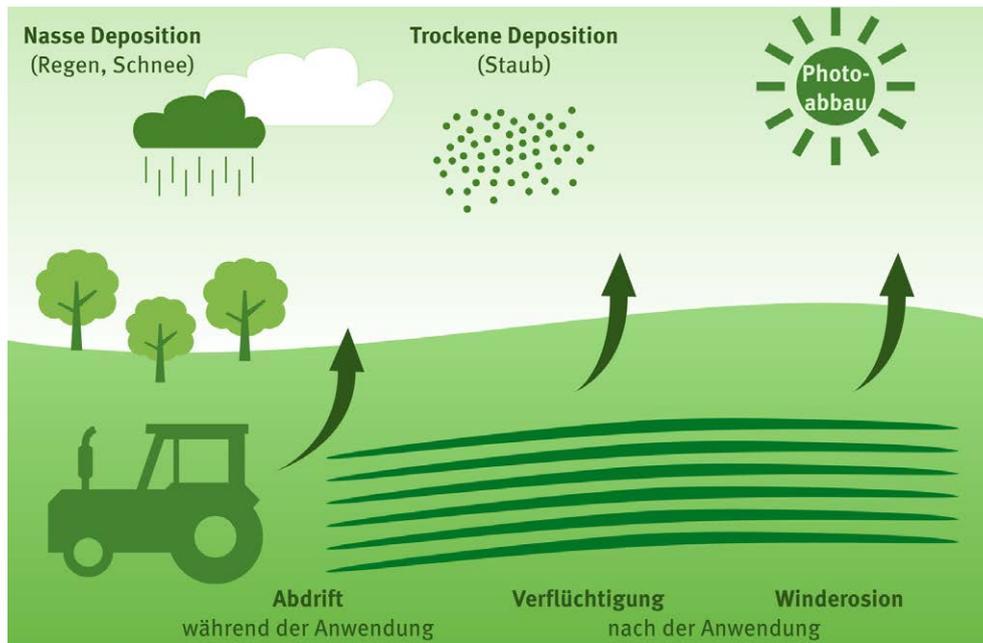
Quelle: oticki / Fotolia

Hintergrund: Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in die Luft

Emissionen in die Luft stellen einen wichtigen Verbreitungspfad von Pflanzenschutzmitteln dar. Der Eintrag in die Atmosphäre kann auf sehr unterschiedliche Prozesse zurückzuführen sein ([□ Abbildung 1](#)). Durch direkte Sprühabdrift bei der Ausbringung können bis zu 30 Prozent des Wirkstoffs direkt in die Atmosphäre gelangen (van den Berg et al., [1999](#)). Pestizidhaltiger Staub kann bei der Ausbringung von Granulaten (Nuyttens et al., [2013](#)) oder behandeltem Saatgut (Krahner et al., [2021](#)) freigesetzt werden (sog. Winderosion). Die Verflüchtigung der Wirkstoffe von Pflanzen, Böden, aber auch Oberflächengewässern kann noch mehrere Tage nach der Ausbringung anhalten (Unsworth et al., [2002](#)). Pestizide, die als nicht flüchtig eingestuft werden, können durch Aerosolbildung aus Bodenpartikeln, die sorbierte Pestizide enthalten, in die Atmosphäre gelangen. Diese Winderosion kann auf einer zeitlichen Skala von Tagen oder Wochen nach der Ausbringung auftreten (Glotfelty et al., [2002](#)). Zu den Parametern, die den Eintrag von Pestiziden in die Luft beeinflussen, gehören die physikalisch-chemischen Eigenschaften und das Umweltverhalten der Substanzen, die Art der Ausbringung (Sprühanwendung, Saatgutbehandlung, Granulat), die örtliche Topographie und die meteorologischen Bedingungen (Wind, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Bodentemperatur, Bodenfeuchtigkeit). In der Luft können Pflanzenschutzmittel durch Lichteinwirkung abgebaut werden (Photoabbau). Die in der Luft verbleibenden Substanzen können sich auf allen Oberflächen ablagern,

darunter auch auf landwirtschaftlichen Flächen. Bei den Ablagerungen unterscheidet man zwischen der nassen Deposition (in Form von Regen oder Schnee) und der trockenen Deposition (als Staub).

Abbildung 1: Pflanzenschutzmittel in der Luft – Übersicht über die wichtigsten Ein- und Austragspfade. Quelle: UBA.



Als Kurzstreckentransport wird die Verfrachtung über eine Distanz zwischen 1 und 1.000 Metern vom Ausbringungsort bezeichnet (□ **Abbildung 2**). In unmittelbarer Nähe zur Anwendung des Pflanzenschutzmittels werden die höchsten Konzentrationen in der Umwelt erwartet. Diese Konzentrationen werden im Rahmen der Risikobewertung bei der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln in Deutschland mit dem sogenannten EVA-Modell abgeschätzt. Dabei wird mit Standardwerten, den sogenannten Abdrifteckwerten, berechnet, wie viel Pflanzenschutzmittel über die Luft in angrenzende Flächen gelangt (Rautmann et al., 1995; Rautmann et al., 2001). Da dieses Modell auch die Verflüchtigung mit anschließender Deposition berücksichtigt, wird so auch das Risiko für weiter entfernte Flächen und in Gewässern abgedeckt, für die im Normalfall geringere Konzentrationen vorhergesagt werden. Problematisch ist, dass das Modell bislang nur in Deutschland verwendet wird. Zulassungen in anderen Ländern der EU berücksichtigen den Transport über die Verflüchtigung also nicht.

Als Ferntransport wird die Verfrachtung vom Ausbringungsort über eine Distanz von 1.000 Kilometern und mehr bezeichnet. Um abzuschätzen, wie groß die Neigung eines Pflanzenschutzmittels zum Ferntransport ist, werden in den Zulassungsverfahren relativ einfache Modellierungen auf Basis von Struktur-Wirkungs-Beziehungen herangezogen (AOP-Berechnung nach Atkinson (1986) und Meylan & Howard (1993)). Diese Modelle sagen vorher, wie lange sich das Pflanzenschutzmittel in der Gasphase aufhält, bevor es abgebaut wird. Ist mehr als die Hälfte des Mittels innerhalb von zwei Tagen abgebaut, ist der Ferntransport nach den gültigen Europäischen Leitlinien vernachlässigbar (FOCUS, 2008). Der Abbau in der Luft kann jedoch verlangsamt werden, wenn sich die Pflanzenschutzmittel in

der Luft an Partikel binden. Dies wird von den Modellen nicht berücksichtigt, weshalb die Neigung zum Ferntransport möglicherweise unterschätzt wird (Socorro et al., 2016; Mattei et al., 2019; Mayer et al., 2024). Über diese modellbasierten Abschätzungen hinaus werden im Rahmen von Wirkstoffgenehmigungen auch Messdaten aus entlegenen Gebieten betrachtet. Diese Gebiete liegen fernab von landwirtschaftlichen Einflüssen.

Der Entfernungsbereich zwischen Kurzstrecken- und Ferntransport, also der Transport über mittlere Entfernungen (Mittelstreckentransport), bezieht sich auf Entfernungen von 1 bis 1.000 Kilometern vom behandelten Gebiet. Er wird weder im Rahmen der Genehmigung von Wirkstoffen noch bei der Produktzulassung gesondert betrachtet.

Abbildung 2: Schematische Darstellung der luftgetragenen Transportentfernungen vom Ort der Anwendung nach FOCUS (2008).



Risiko für die Koexistenz von ökologischer und konventioneller Landwirtschaft

Das Ziel der Bundesregierung ist, den Anteil an ökologischer Landwirtschaft in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf 30 Prozent zu erhöhen. Dies setzt voraus, dass konventionelle und ökologische Landwirtschaft nebeneinander existieren können, ohne sich gegenseitig negativ zu beeinflussen. Ökoanbauverbände berichten allerdings schon seit Jahren über kritische Konzentrationen einzelner Wirkstoffe in ihrem Erntegut mit erheblichen Auswirkungen für die Landwirtschaftsbetriebe (Kruse-Platz et al., 2021). Das beeinträchtigt die Koexistenz von konventioneller und ökologischer Landwirtschaft und könnte damit langfristig auch hinderlich sein für die Erreichung des 30-Prozent-Ziels der Bundesregierung.

Belastungen von Bio-Lebensmitteln können unter anderem auf Pflanzenschutzmittel zurückgeführt werden, die bei ihrer Anwendung in der konventionellen Landwirtschaft vom eigentlichen Ausbringungsort über die Luft weggetragen werden (Schleiffer & Speiser, 2022). Dies betrifft typischerweise kurze und mittlere Entfernungen. Die Bio-Zertifizierung setzt voraus, dass Pflanzen ohne den Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln angebaut werden. Wird festgestellt, dass ökologisch produziertes Erntegut mit chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln belastet ist, kann es unter Umständen nur eingeschränkt vermarktet werden. Es ist davon auszugehen, dass der Anbau von Kulturen, die weitestgehend rückstandsfrei sein müssen (z.B. für die Weiterverarbeitung als Babynahrung), zurückgeht, wenn die Betriebe mit Pflanzenschutzmittelrückständen rechnen müssen, für die sie selber nicht verantwortlich sind. Da die Verursacher einer Belastung aufgrund der Distanz meist nicht ermittelt werden können, ist eine nachbarschaftliche Einigung in der Regel nicht möglich und die betroffenen

Landwirtschaftsbetriebe bleiben auf dem Schaden sitzen. Dies kann insbesondere für Bio-Betriebe ein existenzielles Problem darstellen.

Risiko für den Naturhaushalt

Im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Pflanzenschutzmittel in Deutschland ist das Umweltbundesamt (UBA) für die Bewertung der möglichen Auswirkungen auf den Naturhaushalt zuständig.

Bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln kommt es zur Abdrift eines Teils der ausgebrachten Menge. Unter Abdrift versteht man die unbeabsichtigte Verfrachtung von Pflanzenschutzmitteln auf Nichtzielflächen wie zum Beispiel benachbarte Felder, Böschungen oder Wegränder. Das Risiko für Organismen, die von einer Abdrift beeinträchtigt werden können, wird im Zulassungsverfahren durch Standard-Werte berücksichtigt. Nach der Anwendung kann ein Teil des Wirkstoffs durch Verflüchtigung in die Luft gelangen. Auch dieser Anteil wird in der Risikobewertung betrachtet, indem eine Gesamtkonzentration für die Nichtzielgebiete im Nahbereich berechnet wird. Es wird also die Summe aus dem Anteil durch Abdrift und dem Anteil durch Verflüchtigung berechnet. Um einen Risikoquotienten (den sogenannten TER (Toxicity Exposure Ratio)-Wert), Risikoquotient aus Toxizität und Exposition, abzuleiten, wird diese Konzentration mit der Toxizität der Wirkstoffe verglichen. Dieser Risikoquotient ist entscheidend für die Bewertung des Mittels und damit dessen Zulassungsfähigkeit.

Es ist anzunehmen, dass die Rückstände, die in Folge von Mittel- und Langstreckentransporten auftreten, im Regelfall kein hohes Risiko für den Naturhaushalt darstellen. Die hier zu erwartenden Konzentrationen sind in der Regel wesentlich geringer als in unmittelbarer Nachbarschaft der Anwendung, welche durch die oben dargestellte Risikobewertung im Nahbereich abgedeckt ist. Indem schon solche höheren Depositionen im Nahbereich nicht toleriert werden, kann es auch in entfernteren Bereichen nicht zu unannehmbar hohen Depositionen kommen.

Dies gilt allerdings nur für das einzelne Mittel. Denn mögliche negative Effekte auf den Naturhaushalt, die aus der Anwendung verschiedener Wirkstoffe resultieren (Kombinationswirkung), aber auch indirekte Effekte auf Nahrungsnetze oder das Zusammenwirken verschiedener Stressoren werden im Zulassungsverfahren bislang nur ansatzweise berücksichtigt. Die Umweltrisikobewertung bleibt hier sowohl im Nahbereich wie auch in größeren Entfernungen lückenhaft.

Risiko für die menschliche Gesundheit

Im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Pflanzenschutzmittel in Deutschland ist das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) für die Bewertung der möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zuständig.

Im Jahr 2020 hat das BfR zwei Mitteilungen zum Thema veröffentlicht (BfR, [2020a](#); [2020b](#)). Darin wird hervorgehoben, dass Abdrift und Verflüchtigung bei der gesundheitlichen

Risikobewertung berücksichtigt werden. Demnach ist bei sachgerechter und bestimmungsgemäßer Anwendung nicht von einem gesundheitlichen Risiko durch luftverfrachtete Wirkstoffe auszugehen.

Funde und Risikominderungsmaßnahmen

In der Vergangenheit hat insbesondere die Anwendung Pendimethalin- und Pro-sulfocarb-haltiger Herbizide zu Wirkstoffeinträgen in großer Entfernung von den behandelten Flächen geführt. In der Folge wurden in mehreren Fällen Rückstände in Kulturen (beispielsweise Grünkohl, Fenchel) gemessen, die selbst nicht mit den Wirkstoffen behandelt wurden (LUGV, [2015](#)).

Deshalb hat das zuständige Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) im Jahr 2016 zusätzliche Anwendungsbestimmungen für Pendimethalin- und Pro-sulfocarb-haltige Mittel eingeführt, um derartige Verfrachtungen zukünftig zu vermindern. So wurden Düsen vorgeschrieben, welche die Abdrift um 90 Prozent verringern. Die Fahrgeschwindigkeit wurde auf 7,5 Kilometer pro Stunde limitiert, weil nur so die Verminderung von 90 Prozent erreicht wird. Ein Mindestaufwand von 300 Litern Wasser pro Hektar soll dazu beitragen, den Anteil an Feintropfen zu verringern. Die Vorschrift, das Mittel nur bei einer Windgeschwindigkeit von höchstens drei Metern pro Sekunde auszubringen, soll sowohl die Abdrift des Spritznebels als auch eine Verfrachtung durch Boden-erosion vermeiden.

Inwiefern diese Maßnahmen tatsächlich dazu beitragen, dass Wirkstoffe weniger verfrachtet und Rückstände in nicht behandelten Kulturen reduziert werden, ist noch nicht bekannt. Dazu liegen keine Daten vor.

Rechtliche Einordnung

Bei der Risikobewertung von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen spielt der Verbleib und das Verhalten in der Luft nur eine untergeordnete Rolle. Die Verordnung (EU) 283/2013 der Kommission legt die Datenanforderungen für Wirkstoffe fest. Sie schreibt damit den Herstellerfirmen von Pflanzenschutzmitteln vor, dass im Genehmigungsverfahren Daten zum Dampfdruck vorgelegt werden müssen, um Rückschlüsse auf die Verflüchtigungsneigung zu ziehen. Das Potential für den Langstreckentransport wird anhand modellierter Halbwertszeiten (der Zeit, die benötigt wird, bis 50% eines Stoffes auf natürliche Weise abgebaut bzw. eliminiert wurden) in der oberen Atmosphäre bestimmt. Darüber hinaus können Daten aus Monitoringstudien für derartige Abschätzungen verwendet werden. Da aber meist keine umfassenden Monitoringdaten vorliegen, ist diese Methode keine gängige und standardisierte Praxis in der Risikobewertung. Die wissenschaftliche Basis der beschriebenen Datenanforderungen bilden Europäische Leitlinien, welche die europäische FOCUS (FORum for the Coordination of pesticides fate models and their USE)-Arbeitsgruppe für Pflanzenschutzmittel in der Luft 2008 vorgelegt hat.

Gesetzliche Grenzwerte für das Umweltmedium Luft wurden im Pflanzenschutzrecht noch nicht verankert. Beispielsweise gibt es zum Schutz des Grundwassers den Grenzwert

von 0,1 Mikrogramm Pflanzenschutzmittelwirkstoff pro Liter, der nicht überschritten werden darf. Eine vergleichbare obere Grenze, auf deren Basis im Zulassungsverfahren von Pflanzenschutzmitteln reguliert werden kann, gibt es im Bereich der Luft nicht. Aus Sicht des UBA wäre das aber sinnvoll.

Zwar legt die Verordnung (EG) Nr. 396/2005 die Höchstmengen an Pflanzenschutzmittelrückständen fest, die in Erzeugnissen pflanzlichen Ursprungs für den menschlichen Verzehr zulässig sind. Diese gelten aber nur für die landwirtschaftlichen Erzeugnisse selbst und stellen im Zulassungsverfahren für Pflanzenschutzmittel kein Bewertungskriterium dar. Die EU-weit einheitlichen Grenzwerte wurden nach dem sogenannten ALARA-Prinzip („As Low As Reasonably Achievable“ – „So niedrig wie in der Praxis möglich“) festgelegt. So wurden für bestimmte Kulturen vergleichsweise hohe zulässige Rückstandswerte festgelegt, zum Beispiel für Grünkohl, der aufgrund seiner großen Blattflächen oft mit Pflanzenschutzmitteln belastet ist. Die gesetzlichen Rückstandshöchstgehalte gelten für konventionell wie auch für ökologisch erzeugte Waren gleichermaßen.

Entsprechend der EU-Ökoverordnung 2018/848 bezieht sich die Kennzeichnung „ökologisch/biologisch“ primär auf den Produktions- und Verarbeitungsprozess. Die Auslobung ist demnach nicht abhängig von einer möglichen Belastung mit Pflanzenschutzmitteln, solange der Bio-Betrieb diese nicht selbst zu verschulden hat. Jedes biozertifizierte Unternehmen muss im Kontrollverfahren ein vorbeugendes Konzept „Vorkehrungen zur Minimierung des Risikos einer Kontamination durch unzulässige Erzeugnisse oder Stoffe“ vorlegen. Doch trotz einer vorschriftsmäßigen biologischen Produktion und trotz aller vorbeugenden Maßnahmen können Bio-Erzeugnisse durch den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln aus dem konventionellen Anbau belastet sein.

Der Bundesverband Naturkost Naturwaren e.V. (BNN) hat einen sogenannten Orientierungswert für die Bio-Produkte seiner Mitgliedsunternehmen festgelegt. Dieser dient nur als Richtwert, er ist nicht rechtlich bindend. Der Orientierungswert liegt bei 0,01 Milligramm pro Kilogramm und bezieht sich auf das unverarbeitete Ausgangsprodukt. Je nach Wirkstoff ist das nur bis zu einem Zehntel des gesetzlichen Grenzwerts. Bei Überschreitung des Orientierungswertes müssen Untersuchungen eingeleitet werden, welche die Ursache für die Rückstandsbelastung klären sollen. Ergeben sich dabei keinerlei Hinweise auf einen unzulässigen Mitteleinsatz durch den Bio-Betrieb selbst, darf die Ware trotzdem als Bio-Ware vermarktet werden.

In vielen Fällen muss Erntegut also strengere Qualitätsstandards erfüllen als die gesetzlich geregelten Grenzwerte. Für bestimmte Produktgruppen gelten eigene Grenzwerte, beispielsweise für Babynahrung oder für Arzneipflanzen. Ein Biobetrieb, dessen Erzeugnisse unverschuldet mit Pflanzenschutzmitteln belastet sind, kann seine Ware beispielsweise nicht mehr als Babynahrung vermarkten. Denn hier gelten die 0,01 Milligramm pro Kilogramm tatsächlich als Grenzwert, nicht nur als Orientierungswert. Auch bestimmte Handelsketten legen eigene Rückstandshöchstwerte für die Produkte aus ihren Lieferketten fest und gehen damit über die gesetzlichen Vorgaben hinaus. Belastete Bio-Ware wird dementsprechend auch hier zurückgewiesen. Solcherart Einschränkungen bei der Vermarktung von Erntegut können zu erheblichen finanziellen Einbußen für Bio-Betriebe führen.

Luft-Monitoring

Der atmosphärische Transport von Pflanzenschutzmitteln ist ein Thema von wachsender Bedeutung, was sich an der großen Zahl einschlägiger wissenschaftlicher Veröffentlichungen in den letzten Jahren ablesen lässt (siehe u.a. die Übersichtsartikel von Woodrow et al., [2018](#); Langenbach & Caldas, [2021](#); Galon et al., [2021](#); Seiber & Cahill, [2022](#)). Fortschritte in der Analytik, insbesondere die Multimethoden, welche die parallele Bestimmung von Hunderten von Wirkstoffen/Pflanzenschutzmitteln in einer Probe ermöglichen, haben die Durchführung zahlreicher Luftmonitoring-Studien auf der ganzen Welt angeregt (Kruse-Platz et al., [2021](#); López et al., [2021](#); Figueiredo et al., [2021](#); Yera & Vasconcellos, [2021](#); Degrendele et al., [2022](#); Mayer et al., [2024](#)). Häufig werden Rückstände von Pflanzenschutzmitteln da festgestellt, wo sie eigentlich nicht zu erwarten wären, zum Beispiel in Insekten in Naturschutzgebieten (Bruhl et al., [2021](#)), in Staub im Innen- und Außenbereich von Wohnhäusern (Figueiredo et al., [2021](#)), im Regenwasser (Decuq et al., [2022](#)), in Bodenproben von Bio-Betrieben (Geissen et al., [2021](#)) und in Bio-Lebensmitteln (EFSA, [2018](#)).

Darüber hinaus haben Länderbehörden und Nichtregierungsorganisationen (NGO) in den letzten Jahren eine Vielzahl an Monitoring-Untersuchungen zur Verfrachtung von Pflanzenschutzmitteln über die Luft veröffentlicht. Trotz einiger methodischer Schwächen liefern diese Studien wertvolle Daten zur deutschlandweiten Belastungssituation, indem sie aufzeigen, dass Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe und auch deren Abbauprodukte weit verbreitet sind und nicht nur in landwirtschaftlich geprägten Gebieten vorkommen. Generell fällt auf, dass die Wirkstoffe, die in den Untersuchungen am häufigsten gefunden werden, gleichzeitig zu den am meisten verkauften Wirkstoffen gehören (z.B. die Herbizide Glyphosat, Pendimethalin, Prosulfocarb, Terbutylazin, S-Metolachlor und das Fungizid Chlorthalonil).

Da es bislang keine gesetzliche Verpflichtung zur Erhebung von Daten zur Verbreitung von Pflanzenschutzmitteln über die Luft gibt, ist die Datenlage in diesem Bereich sehr dünn. Die für die Umweltüberwachung zuständigen Bundesländer haben in Eigenverantwortung Messkampagnen durchgeführt. Weil diese jedoch mit unterschiedlichen Methoden erfolgen, ist eine Abschätzung der Belastungssituation für ganz Deutschland bislang nicht möglich. In diesem Sinne leisten die Daten der Länder und der NGOs einen wertvollen Beitrag, die vorhandene Wissenslücke zu schließen. In einigen EU-Mitgliedstaaten laufen bereits staatliche Luft-Monitoringprogramme auf freiwilliger Basis, so zum Beispiel in Frankreich, Schweden und Dänemark. Aus Sicht des UBA sollten nationale Untersuchungen zu Pflanzenschutzmitteln im Umweltmedium Luft auf europäischer Ebene für jeden Mitgliedstaat verpflichtend festgelegt werden, um die tatsächliche Verfrachtung über die Luft zu beziffern. Darauf wurde auch im Scientific Opinion Paper des UBA zum Verordnungsentwurf zur „Nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln“ (Sustainable Use Regulation, SUR) hingewiesen (Bär et al., [2022](#)).

Das BVL hat im September 2022 einen Vorschlag für ein bundesweites Monitoringprogramm zur Verfrachtung von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen über die Luft vorgelegt. Dabei sollen Informationen gesammelt werden, wie die Verfrachtung von Pflanzenschutzmitteln über die Luft im Zulassungsverfahren besser berücksichtigt werden kann. Das Konzept sieht vor, fünf Standorte mit jeweils sechs Messstationen auszustatten. An den

einzelnen Messstationen sollen verschiedenartige Proben gesammelt werden. Die Standorte sollen nach Möglichkeit an bestehende Luftmonitoring-Messnetze der Bundesländer angeschlossen werden. Eine Pilotstudie zur Erprobung der Methodik hat 2023 begonnen.

Literatur

- [1] Atkinson, R. (1986). Kinetics and mechanisms of the gas-phase reactions of the hydroxyl radical with organic compounds under atmospheric conditions. *Chemical Reviews*, 86(1), 69–201. <https://doi.org/10.1021/cr00071a004>
- [2] Bär, S., Knillmann, S., Otto, S. et al. (2022) Auf dem Weg zu einem nachhaltigen Pflanzenschutz – Bewertung des Verordnungsentwurfs zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln 2022/0196 (COD) mit Fokus auf den Umweltschutz. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auf-dem-weg-zu-einem-nachhaltigen-pflanzenschutz>
- [3] BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung. (2020a). Abdrift, Verflüchtigung und Verfrachtung von Pestiziden: Gesundheitliche Beeinträchtigungen sind bei sachgerechter und bestimmungsgemäßer Anwendung unwahrscheinlich. Mitteilung Nr. 045/2020.
- [4] BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung. (2020b). Fernab vom Feld: Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Abdriften von Pflanzenschutzmitteln sind unwahrscheinlich. vol Mitteilung Nr. 054/2020.
- [5] Bruhl, C. A., Bakanov, N., Kothe, S. et al. (2021). Direct pesticide exposure of insects in nature conservation areas in Germany. *Sci Rep*, 11(1) 24144. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03366-w>
- [6] Decuq, C., Bourdat-Deschamps, M., Benoit, P. et al. (2022). A multiresidue analytical method on air and rainwater for assessing pesticide atmospheric contamination in untreated areas. *Sci Total Environ*, 823, 153582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153582>
- [7] Degrendele, C., Klanova, J., Prokes, R. et al. (2022). Current use pesticides in soil and air from two agricultural sites in South Africa: Implications for environmental fate and human exposure. *Sci Total Environ*, 807 (Pt 1), 150455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150455>
- [8] EFSA – European Food Safety Authority. (2018). Monitoring data on pesticide residues in food: results on organic versus conventionally produced food. *EFSA Supporting Publications*, 15(4). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2018.EN-1397>
- [9] Figueiredo, D. M., Duyzer, J., Huss, A. et al. (2021). Spatio-temporal variation of outdoor and indoor pesticide air concentrations in homes near agricultural fields. *Atmospheric Environment*, 262, 118612. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118612>
- [10] FOCUS. (2008). Pesticides in Air: Considerations for Exposure Assessment. Report of the FOCUS Working Group on Pesticides in Air. vol SANCO/10553/2006 Rev 2.
- [11] Galon, L., Bragagnolo, L., Korf, E. P. et al. (2021). Mobility and environmental monitoring of pesticides in the atmosphere – a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28, 3223632255. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14258-x>
- [12] Geissen, V., Silva, V., Lwanga, E. H. et al. (2021). Cocktails of pesticide residues in conventional and organic farming systems in Europe – Legacy of the past and turning point for the future. *Environmental Pollution* 278, 116827. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116827>
- [13] Glotfelty, D. E., Leech, M. M., Jersey, J. et al. (2002). Volatilization and wind erosion of soil surface applied atrazine, simazine, alachlor, and toxaphene. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37(2), 546–551. <http://dx.doi.org/10.1021/jf00086a059>

- [14] Krahner, A., Heimbach, U., Stahler, M. et al. (2021). Deposition of dust with active substances in pesticides from treated seeds in adjacent fields during drilling: disentangling the effects of various factors using an 8-year field experiment. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(47), 66613–66627. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15247-w>
- [15] Kruse-Platz, M., Hofmann, F., Wosniok, W. et al. (2021). Pesticides and pesticide-related products in ambient air in Germany. *Environmental Sciences Europe*, 33(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00553-4>
- [16] Langenbach, T., de Campos, T. M. P. & Querino Caldas, L. (2021). Why Airborne Pesticides Are So Dangerous. In: *Environmental Sustainability – Preparing for Tomorrow*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95581>
- [17] López, A., Ruiz, P., Yusà, V. et al. (2021). Methodological Aspects for the Implementation of the Air Pesticide Control and Surveillance Network (PESTNet) of the Valencian Region (Spain). *Atmosphere*, 12(5), 542. <https://doi.org/10.3390/atmos12050542>
- [18] LUGV – Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Brandenburg. (2015). Durchführung einer Bioindikation auf Pflanzenschutzmittelrückstände mittels Luftgüte-Rindenmonitoring, Passivsammlern und Vegetationsproben Fachbeiträge des LUGV 147. https://lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/fb_lugv-147.pdf
- [19] Mattei, C., Wortham, H. & Quivet, E. (2019). Heterogeneous degradation of pesticides by OH radicals in the atmosphere: Influence of humidity and particle type on the kinetics. *Science of The Total Environment*, 664, 1084–1094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.038>
- [20] Mayer, L., Degrendele, C., Šenk, P. et al. (2024). Widespread Pesticide Distribution in the European Atmosphere Questions their Degradability in Air. *Environmental Science & Technology*, 58(7), 3342–3352. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08488>
- [21] Meylan, W. M. & Howard, P. H. (1993). Computer estimation of the Atmospheric gas-phase reaction rate of organic compounds with hydroxyl radicals and ozone. *Chemosphere*, 26 (12), 2293–2299. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90355-9](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90355-9)
- [22] Nuyttens, D., Devarrewaere, W., Verboven, P. et al. (2013). Pesticide-laden dust emission and drift from treated seeds during seed drilling: a review. *Pest Manag Sci*, 69(5), 564–575. <https://doi.org/10.1002/ps.3485>
- [23] Rautmann, D., Spangenberg, R., Streloke, M. et al. (1995). Studies on the spray drift of plant protection products: results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany. In: *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem*, vol 305. Blackwell. <https://doi.org/10.5073/20210701-081329>
- [24] Rautmann, D., Streloke, M., Winkler, R. (2001). New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. Workshop on risk management and risk mitigation measures in the context of authorization of plant protection products. 1999. *Mitt Biol Bundesanst Land- Forstwirtsch* 383, 131 –143.
- [25] Schleiffer, M. & Speiser, B. (2022). Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environmental Pollution* 313, 120116. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120116>
- [26] Seiber, J. N. & Cahill, T. A. (2022). *Pesticides, Organic Contaminants, and Pathogens in Air*. vol (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003217602>
- [27] Socorro, J., Durand, A., Temime-Roussel, B. et al. (2016). The persistence of pesticides in atmospheric particulate phase: An emerging air quality issue. *Sci Rep*, 6, 33456. <https://doi.org/10.1038/srep33456>

- [28] Unsworth, J. B., Wauchope, R. D., Klein, A. W. et al. (2002). Significance of the long range transport of pesticides in the atmosphere. *Pest Management Science*, 58(3), 314–314. <https://doi.org/10.1351/pac199971071359>
- [29] van den Berg, F., Kubiak, R., Benjey, W. G. et al. (1999). Emission of Pesticides into the Air. *Water, Air, and Soil Pollution*, 115(1), 195–218. <https://doi.org/10.1023/A:1005234329622>
- [30] Woodrow, J. E., Gibson, K. A. & Seiber, J. N. (2018). Pesticides and Related Toxicants in the Atmosphere. *Rev Environ Contam Toxicol*, 247, 147–196. https://doi.org/10.1007/398_2018_19
- [31] Yera, A. M. B. & Vasconcellos, P. C. (2021). Pesticides in the atmosphere of urban sites with different characteristics. *Process Safety and Environmental Protection* 156, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.049>