

Schlussfolgerungen der weltweiten integrierten Bewertung (Worldwide Integrated Assessment, WIA) zu den Risiken von Neonikotinoiden und Fipronil für Biodiversität und Ökosystemfunktionen

van der Sluijs, J.P.^{1,30}, Amaral-Rogers, V.², Belzunces, L.P.³, Bijleveld van Lexmond, M.F.I.J.⁴, Bonmatin, J.-M.⁵, Chagnon, M.⁶, Downs, C.A.⁷, Furlan, L.⁸, Gibbons, D.W.⁹, Giorio, C.¹⁰, Girolami, V.¹¹, Goulson, D.¹², Kreuzweiser, D.P.¹³, Krupke, C.¹⁴, Liess, M.¹⁵, Long, E.¹⁴, McField, M.¹⁶, Mineau, P.¹⁷, Mitchell, E.A.D.^{18,19}, Morrissey, C.A.²⁰, Noome, D.A.^{4,21}, Pisa, L.¹, Settele, J.^{22,23}, Simon-Delso, N.^{1,24}, Stark, J.D.²⁵, Tapparo, A.²⁶, Van Dyck, H.²⁷, van Praagh, J.²⁸, Whitehorn, P.R.²⁹, Wiemers, M.²²

¹ Department of Environmental Sciences, Copernicus Institute, Utrecht University, Heidelberglaan 2, 3584 CS Utrecht, The Netherlands

² Buglife, Bug House, HamLane, Orton Waterville, Peterborough PE2 5UU, UK

³ INRA, UR 406 Abeilles and Environnement, Laboratoire de Toxicologie Environnementale, Site Agroparc, 84000 Avignon, France

⁴ Task Force on Systemic Pesticides, Pertuis-du-Sault, 2000 Neuchâtel, Switzerland

⁵ Centre National de la Recherche Scientifique, Centre de Biophysique Moléculaire, rue Charles Sadron, 45071 Orléans Cedex 02, France

⁶ Département des Sciences Biologiques, Université du Québec À Montréal, Case Postale 8888, Succursale Centre-Ville, Montreal, Québec, Canada H3C 3P8

⁷ Haereticus Environmental Laboratory, P.O. Box 92, Clifford, VA 24533, USA

⁸ Veneto Agricoltura, Legnaro, PD, Italy

⁹ RSPB Centre for Conservation Science, RSPB, The Lodge, Sandy, Bedfordshire SG19 2DL, UK

¹⁰ Department of Chemistry, University of Cambridge, Lensfield Road, CB2 1EW Cambridge, UK

¹¹ Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Università degli Studi di Padova, Agripolis, viale dell'Università 16, 35020 Legnaro, Padova, Italy

¹² School of Life Sciences, University of Sussex, Brighton BN1 9RH, UK

¹³ Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, 1219 Queen Street East, Sault Ste Marie, ON, Canada P6A 2E5

¹⁴ Department of Entomology, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-2089, USA

¹⁵ Department of System Ecotoxicology, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, 04318 Leipzig, Germany

¹⁶ Healthy Reefs for Healthy People Initiative, Smithsonian Institution, Belize City, Belize

¹⁷ Pierre Mineau Consulting, 124 Creekside Drive, Salt Spring Island V8K 2E4, Canada

¹⁸ Laboratory of Soil Biology, University of Neuchâtel, Rue Emile Argand 11, 2000 Neuchâtel, Switzerland

¹⁹ Jardin Botanique de Neuchâtel, Chemin du Perthuis-du-Sault 58, 2000 Neuchâtel, Switzerland

²⁰ Department of Biology and School of Environment and Sustainability, University of Saskatchewan, 112 Science Place, Saskatoon, SK S7N 5E2, Canada

²¹ Kijani, Kasungu National Park, Private Bag 151, Lilongwe, Malawi

²² Department of Community Ecology, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle, Germany

²³ iDiv, German Centre for Integrative Biodiversity Research, Halle-Jena-Leipzig, Deutscher Platz 5e, 04103 Leipzig, Germany

²⁴ Beekeeping Research and Information Centre (CARI), Place Croix du Sud 4, 1348 Louvain la Neuve, Belgium

²⁵ Puyallup Research and Extension Centre, Washington State University, Puyallup, WA 98371, USA

²⁶ Dipartimento di Scienze Chimiche, Università degli Studi di Padova, via Marzolo 1, 35131 Padova, Italy

²⁷ Behavioural Ecology and Conservation Group, Biodiversity Research Centre, Université Catholique de Louvain (UCL), Croix du Sud 4-5 bte L7.07.04, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

²⁸ Scientific Advisor, Hassellstr. 23, 29223 Celle, Germany

²⁹ School of Natural Sciences, University of Stirling, Stirling FK9 4LA, UK

³⁰ Centre for the Study of the Sciences and the Humanities, University of Bergen, Postboks 7805, N-5020 Bergen, Norway

* J.P. van der Sluijs: jeroen@jvds.nl

Einführung

Die Nebenwirkungen des gegenwärtigen weltweiten Pestizideinsatzes auf die Tierwelt betreffs Population, Biozönose und Ökosystem, sind bisher nur unzureichend erkannt, insbesondere bei den höheren biologischen Organisationsformen (Köhler and Triebkorn 2013). Im Fokus der vorliegenden Studie liegt eine der problematischen Gruppen der Agrochemikalien, und zwar die systemischen Insektizide die Neonikotinoide und Fipronil. Die zunehmende weltweite Abhängigkeit vom teilweise prophylaktischen Einsatz dieser persistierenden wirksamen neurotoxischen systemischen Insektizide ist besorgniserregend hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Biodiversität, Ökosystemfunktionen und die durch eine Vielzahl betroffener Arten und Lebensräume erbrachten Ökosystemdienstleistungen. Das gegenwärtige Einsatzmaß hat in Kombination mit den Eigenschaften dieser Stoffe zu einer großflächigen Verunreinigung von landwirtschaftlichen Böden, Süßwasservorkommen, Feuchtgebieten, Nicht-Zielvegetation und Meeresökosystemen in Mündungs- und Küstengebieten geführt. Zahlreiche Organismen dieser Lebensräume sind dadurch wiederholt und chronisch diesen Insektiziden in wirksamen Konzentrationen ausgesetzt.

Monetär gesehen entfielen im Jahr 2010 etwa ein Drittel des globalen Insektizidmarktes auf Neonikotinoide und Fipronil (Simon-Delso et al. 2015). Die vielfältige Anwendung erfolgt als Saatgutbeizung, Tauchbad, Blattbesprühung, Bodentränkung und Stamminjektion. Diese Stoffe werden nicht nur in Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwirtschaft an hunderterlei Kulturpflanzen zur Bekämpfung von Schadinsekten eingesetzt, sondern finden auch in der Bekämpfung von Schädlingen und Krankheitsüberträgern an Heim- und Nutztieren und in der Aquakultur breite

Verwendung, ebenso in der Schadinsektbekämpfung im Urban- und Haushaltsbereich wie auch der Holzkonservierung (Simon-Delso et al. 2015).

Zwar erforderte die Marktzulassung dieser systemischen Insektizide routinemäßige ökologische Risikobewertungen, jedoch wurde bisher innerhalb dieses regulativen Rahmens versäumt, individuelle wie auch zusammenwirkende ökologische Risiken zu berücksichtigen, die sich aus der großflächigen und simultanen Verwendung mehrerer Präparate mit jeweils unterschiedlicher Zusammensetzung und Wirkungsweise ergeben. Solche Mehrfachverwendung erfolgt in Hunderten von Anbausystemen weltweit und betrifft unsere wichtigsten Agrargüter wie auch zahlreiche Vieharten, Heimtiere etc. Zudem wurden bei der ökologische Risikobewertung auch die unterschiedlichen Wechselwirkungen mit anderen Umweltstressoren vernachlässigt. Nach erfolgter Marktzulassung sind zwar der Dosierung und Häufigkeit einer zugelassenen Anwendung Grenzen gesetzt, nicht aber der kompletten Skala ihrer aktiven Wirkstoffe, wodurch sich das Erholungspotenzial der von den Auswirkungen betroffenen Ökosysteme verringert. Des Weiteren mangelt es auch an einer Analyse der sukzessiven Neonikotinoideexposition, die für Wassereinzugsgebiete charakteristisch ist und über längere Zeit in einer Kulmination von Exposition und Auswirkungen resultiert (Liess et al. 2013). Die potenziellen Wechselwirkungen zwischen Neonikotinoiden und Fipronil und anderen aktiven Pestizidsubstanzen bleiben bisher ebenfalls unbeachtet, obwohl additive Wirkungen und Synergismen toxischer Wirkungsmechanismen bereits dokumentiert sind (Satchivi and Schmitzer 2011; Gewähr 2012; Iwasa et al. 2004).

Die in den Beiträgen dieser Sonderausgabe vorgelegte weltweite integrierte Bewertung (WIA) ist der erste Versuch einer Erfassung des aktuellen Wissensstands hinsichtlich der Risiken für Biodiversität und Ökosystemfunktionen, die sich aus dem breit gestreuten weltweiten Neonikotinoid- und Fipronileinsatz ergeben. Die WIA basiert auf den Ergebnissen von über 800 im Peer-Review begutachteten Zeitschriftenaufsätzen aus den vergangenen zwei Jahrzehnten. Bewertet wurden jeweils die Trends, Einsatzformen, Wirkungsweisen und Metaboliten (Simon-Delso et al. 2015) wie auch Umweltverbleib und Exposition (Bonmatin et al. 2015), Auswirkungen auf Nicht-Zielwirbellose (Pisa et al. 2015), direkte und indirekte Auswirkungen auf Wirbeltiere (Gibbons et al. 2015), die Risiken für Funktionen und Leistungen der Ökosysteme (Chagnon et al. 2015) sowie abschließend die Erfahrungen mit Methoden nachhaltiger Schädlingsbekämpfung als Alternativen zum Neonikotinoid- und Fipronileinsatz (Furlan and Kreuzweiser 2015).

Wirkungsweise, Umweltverbleib und Exposition

Aufgrund ihrer systemischen Eigenschaften werden Neonikotinoide und in geringerem Maße auch Fipronil ebenso wie einige ihrer toxischen Metaboliten von den Wurzeln oder Blättern aufgenommen und von dort in die restlichen Pflanzenteile weitergeleitet, wodurch die behandelte Pflanze in wirksamer Weise für Insekten toxisch wird, welche nachweislich potenzielle Verursacher von Ernteschäden sind. Neonikotinoide und Fipronil wirken, indem sie die Neurotransmission im zentralen Nervensystem von Organismen stören. Neonikotinoide binden sich an den

nikotinischen Acetylcholinrezeptor, während Fipronil den GABA-Rezeptor hemmt. Beide Pestizide verursachen sowohl letale wie auch zahlreiche subletale schädliche Folgen, nicht nur an Wirbellosen, sondern auch an einigen Wirbeltieren (Gibbons et al. 2015; Simon-Delso et al. 2015). Besonders bemerkenswert ist die sehr hohe Affinität, mit der Neonikotinoid-Insektizide agonistisch an nikotinischen Acetylcholinrezeptor (nAChR) gebunden werden, weshalb selbst die Exposition von niedrigen Dosen über einen längeren Zeitraum zu bedeutenden Auswirkungen kulminieren kann (siehe entsprechende Literatur Pisa et al. 2015).

Als Konsequenz ihrer umfangreichen Verwendung findet man diese Substanzen in der gesamten Umwelt einschließlich Boden, Wasser und Luft. Umweltkontamination erfolgt auf unterschiedlichstem Wege: durch Verstauben nach Drillsaat von gebeiztem Saatgut, durch Kontamination und Entstehung umweltrelevanter Konzentrationen nach wiederholter Anwendung in Ackerböden und Bodenwasser, durch Abfließen in Oberflächen- und Grundwasser, durch Pestizidaufnahme von Nicht-Zielpflanzen über die Wurzeln mit nachfolgender Weiterleitung in Pollen, Nektar, Guttationsflüssigkeit etc., durch Staub- und Sprayrückstände auf Blättern und durch wind- und tierbedingte Verbreitung des kontaminierten Pollens und Nektars behandelter Pflanzen. Die Persistenz in Böden, Wasserläufen und Nicht-Zielpflanzen variiert, kann jedoch lange andauern; so kann beispielsweise die Halbwertszeit von Neonikotinoiden in Böden 1000 Tage überschreiten. Ebenso können sie auch in Holzgewächsen für Zeiträume von über einem Jahr verbleiben. Ihr Abbau ergibt toxische Metaboliten, deren Umweltkonzentrationen jedoch nur selten gemessen werden (Bonmatin et al. 2015).

Diese Kombination von Persistenz (über Monate und Jahre) und Wasserlöslichkeit hat zu großflächiger Kontamination und erhöhtem Potenzial der Anstauung in Böden und Sedimenten (im ppb-ppm-Bereich), in Wasserläufen (Grund- und Oberflächenwasser im ppt-ppb-Bereich) und in unbehandelter Vegetation (im ppb-ppm-Bereich) geführt. Gegenwärtig gibt es noch kein geeignetes systematisches Screening bezüglich der Verteilung der Pestizide und ihrer Metaboliten, um sowohl die langfristige Exposition gegenüber niedrigen Konzentrationen wie auch die kurzfristig schwankende Exposition gegenüber hohen Konzentrationen bestimmen zu können.

In vereinzelt durchgeführten Screening - Untersuchungen enthielten Umweltproben jedoch zumeist eine Mischung aus Pestiziden, darunter auch Neonikotinoide oder Fipronil (samt ihren toxischen Metaboliten). Aus Grund- und Oberflächenwasser entnommene Proben zeigten ebenfalls eine Überschreitung von Grenzwerten von behördlich festgelegten ökologischen Schwellenwerten verschiedener Länder in Nord-Amerika und Europa. Nach aktuellem Forschungsstand gibt es überzeugende Beweise - sowohl im landwirtschaftlichen und urbanen Bereich als auch in Entwässerungsgebieten - für die Kontamination von Böden, Wasserläufen und Pflanzen mit äußerst variablen Konzentrationen von Neonikotinoid- oder Fipronilmischungen und ihren Metaboliten (Bonmatin et al. 2015).

Dieses Verteilungsprofil führt auf verschiedenen Wegen sowohl zu chronischer wie auch akuter Mehrfachexposition von Nicht-Zielorganismen. So sind beispielsweise Bestäuber (einschließlich Bienen) zumindest folgenden Expositionswegen ausgesetzt: direkter Staubkontakt bei Drillsaat, Aufnahme von Pollen, Nektar, Guttationstropfen, extraflorale Nektarien und Honigtau an gebeizten Nutzpflanzen, Wasser, Aufnahme

kontaminierten Pollens und Nektars an Wildblumen und Bäumen, die in der Nähe von beizbehandelten Nutzpflanzen oder kontaminierten Gewässern wachsen. Untersuchungen der Futtermittel in Bienenstöcken in unterschiedlichen Biotopen zeigen weltweit, dass Bienenvölker regelmäßig und chronisch Neonikotinoiden, Fipronil und ihren Metaboliten ausgesetzt sind (gewöhnlich im 1-100 ppb-Bereich), häufig auch in Kombination mit anderen Pestiziden, von denen einige bekanntermaßen synergistisch mit Neonikotinoiden reagieren. Andere Nicht-Zielorganismen, besonders jene in Böden und aquatischen Lebensräumen oder auch herbivore Insekten, die sich auf Ackerland von nicht-landwirtschaftlichen Pflanzen ernähren, sind zwangsläufig ebenfalls exponiert, wobei es hierzu allerdings generell noch an Expositionsdaten mangelt (Bonmatin et al. 2015).

Auswirkungen auf Nicht-Zielorganismen

Die Auswirkungen systemischer Pestizide auf Bestäuber geben besonderen Anlass zur Sorge, wie es die große Anzahl von Studien zu diesem Thema belegt. Bei Bienen haben kontrollierte Versuche mit Expositionen wie bei realistischen Freilandbedingungen schädliche Auswirkungen auf individuelle Navigationsfähigkeit, Lernfähigkeit, Futtersammeln, Lebensdauer, Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten sowie Fruchtbarkeit gezeigt. Bei Hummelvölkern sind ebenfalls deutliche Auswirkungen zu beobachten, so wachsen exponierte Völker langsamer und produzieren erheblich weniger Königinnen (Whitehorn et al. 2012). In begrenztem Maße durchgeführte Feldstudien mit frei lebenden Bienenvölkern hatten ergaben bisher keine einheitlichen Ergebnisse und erwiesen sich als schwierig durchführbar, häufig wegen der

unvermeidbaren Kontamination der Kontrollen mit Neonikotinoiden oder mangels Replikation in der Studienplanung. Insgesamt verdeutlichen diese Faktoren die Herausforderungen bei solchen Freilandstudien (Maxim and Van der Sluijs 2013; Pisa et al. 2015).

Andere Gruppen Wirbelloser haben bisher weniger Aufmerksamkeit gefunden. Für fast alle Insekten ist die Toxizität dieser Insektizide sehr hoch, einschließlich zahlreicher Arten, die in der biologischen Schädlingsbekämpfung eine wichtige Rolle spielen. Die Toxizität ist bei Nicht-Insekten weniger deutlich. Bei Ringelwürmern wie Regenwürmern liegt die mittlere letale Konzentration (LC50) für viele Neonikotinoide im unteren ppm-Bereich (LOEC, die geringste statistisch messbare Wirkung, bei 10 ppb). Krustentiere sind gemeinhin weniger sensibel, wobei dies allerdings in hohem Maße von der jeweiligen Art und dem Entwicklungsstadium abhängt. So sind zum Beispiel Blaukrabben im Megalopa-Stadium um eine Größenordnung sensibler als juvenile Tiere.

In feldrealistischer Umweltkonzentration können Neonikotinoide und Fipronil negative Auswirkungen auf Physiologie und Bestand einer Vielzahl von Nicht-Zielwirbellosen in terrestrischen und aquatischen Habitaten, Feuchtgebieten, im Meeresraum und am Meeresboden haben (siehe entsprechende Literatur Pisa et al. 2015). Entsprechende Berichte stammen jedoch überwiegend aus Toxizitätsversuchen unter Laborbedingungen, die eine begrenzte Anzahl von Arten betrafen. Solche Tests untersuchen normalerweise lediglich letale Wirkungen über kurze Zeiträume (d. h. 48 oder 96 Stunden), während ökologisch relevante subletale Wirkungen wie die Beeinträchtigung von Flug, Navigation, Sammeltätigkeit und Wachstum seltener beschrieben werden. Vielen Tests mangelt es

offenkundig an ökologischer Relevanz, da sie nicht-sensible Arten benutzen (z. B. *Daphnia magna*, Großer Wasserfloh) und zur Simulation chronischer Exposition von unzureichender Dauer sind. Das Erreichen unschädlicher ökologischer Konzentrationsschwellenwerte mittels Labortest wird dadurch erschwert, dass die meisten Tests auf Pestizidtoxizität immer noch veralteten Versuchsprotokollen folgen. Obwohl diese systemischen Pestizide viele neuartige Eigenschaften aufweisen, ist die Testdurchführung weitgehend unverändert geblieben und impliziert daher Fehlschlüsse hinsichtlich ökologischer Sicherheit von Pestiziden (Maxim and Van der Sluijs 2013). Es bedarf einer neuen und verbesserten Methodologie, um die spezifischen Toxizitätsprofile von Chemikalien einschließlich ihrer möglichen kumulativen und verzögerten letalen und nicht-letalen Auswirkungen für eine Vielzahl terrestrischer, aquatischer, und mariner Organismen gezielt untersuchen zu können. Dennoch zeigt unsere Übersicht eine Zunahme von Veröffentlichungen, welche diese systemischen Insektizide als ernstzunehmende Gefahr für ein breites Spektrum von Nicht-Zielwirbellosen-Taxadarklassen, häufig bereits in Konzentrationen, die unter den erwarteten Umweltkonzentrationen liegen. Infolgedessen sind Auswirkungen auf zahlreiche betroffene Nahrungsketten zu erwarten.

Unsere Übersicht umfasst fast 150 Studien zu den direkten (toxischen) und indirekten (z. B. nahrungskettenrelevanten) Auswirkungen von Fipronil und den Neonikotinoiden Imidacloprid und Clothianidin auf Wirbeltiere in freier Natur – Säugetiere, Vögel, Fische, Amphibien und Reptilien. Zusammenfassend bestätigt sich, dass Imidacloprid und Clothianidin in Konzentrationen, die der Freiland-Exposition entsprechen, auf Feldern mit gebeiztem Saatgut eine Gefahr für kleine Vögel darstellen; selbst die Aufnahme

weniger behandelte Samenkörner kann zum Tod führen oder die Fortpflanzungsfähigkeit sensibler Vogelarten beeinträchtigen (siehe entsprechende Studien Gibbons et al. 2015). Einige von Fipronil in der Umwelt gemessene Konzentrationen sind ausreichend hoch für eine Gefährdung von Fischen (Gibbons et al. 2015). Alle drei Insektizide bewirken subletale Effekte, die von genotoxischen und zytotoxischen Folgen bis hin zu beeinträchtigter Immunfunktion und reduziertem Wachstum oder Fortpflanzungserfolg reichen. Jüngste Befunde belegen eindeutig, dass Neonikotinoide die Immunantwort auf molekularer Ebene beeinträchtigen und so Schäden durch „verdeckte Krankheiten und Parasiten auslösen können (Di Prisco et al. 2013). Sämtliche beschriebene Auswirkungen treten bereits bei Konzentrationen auf, die deutlich unter den mit direkter Mortalität assoziierten liegen (Gibbons et al. 2015). In zahlreichen Taxa lässt sich quer durch die ausgewertete Forschungsliteratur ein Trend ausmachen: Kurzfristiges Überleben ist kein relevanter Prädiktor, weder für langfristig gefundene Mortalität noch für die Beeinträchtigung von Funktionen und Leistungen für das Ökosystem durch die betroffenen Organismen.

Mit Ausnahme der extremsten Fälle scheinen die Konzentrationen von Imidacloprid und Clothianidin, denen Fische und Amphibien ausgesetzt sind, wesentlich unter den Schwellenwerten zur Mortalität zu liegen, wobei subletale Effekte allerdings noch nicht hinreichend erforscht sind. Trotz des Forschungsmangels und der Schwierigkeit eindeutiger Kausalitätsbestimmung sind die indirekten toxischen Auswirkungen auf Wirbeltiere möglicherweise ebenso wichtig wie die direkten, womöglich übertreffen sie diese sogar in ihrer Bedeutung. So vernichten Neonikotinoide und Fipronil die Wirbellosen-

Beute von Wirbeltieren in wesentlich effektiverem Maße als diese selbst. Risikobewertungen messen indirekten Auswirkungen jedoch nur selten ausreichende Bedeutung bei, so dass trotz potenzieller Auswirkungen auf Populationsebene weiterhin ein Datendefizit besteht. Lediglich zwei Freiland-Fallstudien, die indirekte Auswirkungen beschreiben, sind in der Literatur zu finden. Eine dieser Studien schildert eine durch Imidacloprid- und Fipronil-Einsatz verursachte Reduzierung von wirbellosen Beutetieren, was dann in das Wachstum einer Fischart beeinträchtigte; in der zweiten Studie ging die Reduzierung von Populationen zweier Eidechsenarten auf die Auswirkungen von Fipronil auf Termiten als deren Beutetiere zurück (siehe entsprechende Studien Gibbons et al. 2015).

Auswirkungen auf Funktionen und - Hilfsleistungen für Ökosysteme

Das Konzept der Hilfsleistungen für Ökosysteme dient häufig der Entscheidungsfindung, wenn es um die Bestimmung von Nutzenstiftungspotenzial, Vorteilen und Nutzwerten geht, die Mensch und Biosphäre von gut funktionierenden Ökosystemen beziehen (z.B. Spangenberg et al. 2014); ebenso wird es als Endpunkt (als der zu schützende ökologische Wert) einer ökologischen Risikobewertung von Chemikalien benutzt. Neonikotinoid-Insektizide und Fipronil werden in der Umwelt (Böden Wasser, Luft) oftmals an Orten festgestellt, an denen Schädlingsbekämpfung keinen Nutzen bringt oder auch nur erwarten lässt, wo aber unerlässliche Ressourcen zum Erhalt von Biodiversität offenkundig von langfristiger oder wiederholter Kontamination bedroht sind. Die in der vorliegenden integrierten Bewertung (WIA) zusammengefasste

Forschungsliteratur zeigt auf, dass global gesehen die weitreichende Bioverfügbarkeit dieser Insektizide in der Umwelt Werte aufweist, die offenkundig letale und subletale Auswirkungen auf eine Vielzahl von terrestrischen (einschließlich im Boden) und aquatischen Mikroorganismen sowie auf Wirbellose und Wirbeltiere haben. Auswirkungen auf Populationsebene sind nach in der Feldforschung beobachteten Umwelt-Konzentrationen für Bestäuberinsekten, Boden-Wirbellose und aquatische Wirbellose als wahrscheinlich einzustufen. Es gibt zunehmend Belege dafür, dass diese Auswirkungen die Ökosystemfunktionen, die Resilienz und die von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen erbrachten Leistungen und Funktionen gefährden. Solche Leistungen und Funktionen können bereitstellender, regulierender, kultureller oder unterstützender Art sein und bestehen unter anderem in Bodenbildung, Bodenqualität, Nährstoffkreislauf, Abfallbeseitigung und Sanierung, Bestäubung, Nahrungsnetzerhaltung, Wasserreinigung, Schädlings- und Krankheitsbekämpfung, Samenverbreitung, Herbivoren- und Unkrautbekämpfung, Nahrungsbereitstellung (einschließlich Fischen), ästhetischem Genuss und Erholung.

Wissenslücken

Obwohl sich die vorliegende Bewertung auf eine wachsende Anzahl veröffentlichter Forschungsergebnisse stützt, bestehen weiterhin Wissenslücken. Die besprochenen Substanzen sind zwar in mehreren Ländern behördlichen Sicherheitsprüfungen unterzogen worden, jedoch sind mehrere potenzielle Risiken angesichts des globalen Ausmaßes des Gebrauchs noch immer unzureichend erkannt. Im Folgenden

beleuchten wir die wesentlichen Wissenslücken.

In den meisten Ländern gibt es entweder keine oder nur wenig öffentlich zugängliche Angaben zu Einsatzquantität und Einsatzorten von systemischen Pestiziden. Zuverlässige Daten zum Einsatzumfang sind jedoch eine notwendige Voraussetzung für eine realistische Einschätzung der ökologischen Bedeutung und der Risiken.

- Screenings von Neonikotinoid- und Fiproni-Rückständen in der Umwelt (Boden, Wasser, Nutzpflanzengewebe, Nicht-Zielvegetation, Sedimente, Uferpflanzen, Küstengewässer und dortige Sedimente) finden extrem selten statt. Trotz erwiesener Wasserlöslichkeit und Drift-Neigung liegen auch für Meeresökosysteme nur sehr wenige Daten vor.
- Eine noch größere Wissenslücke besteht hinsichtlich des Umweltverbleibs einer Vielzahl ökotoxischer und persistenter Metaboliten von Neonikotinoiden und Fipronil. Folglich lässt sich für die überwiegende Mehrheit von Organismen eine wahrscheinliche gemeinsame Exposition nicht mit ausreichender Genauigkeit abschätzen.
- Es besteht ein noch unzureichendes Verständnis des Umweltverbleibs dieser Stoffe, beispielsweise hinsichtlich des Einflusses von Bodeneigenschaften auf Persistenz sowie möglicher Akkumulation in (zumeist blühenden) Holzgewächsen nach wiederholter Behandlung mit der Muttersubstanz. Das Verhalten von Abbauprodukten (potenziell in hohem Maße toxisch und persistent) in unterschiedlichen Medien (Pflanzen, Böden, Sedimente, Wasser, Nahrungsketten etc.) ist nur unzureichend bekannt.

- Die langfristige Toxizität gegenüber den suszeptibelsten Organismen ist bisher nicht untersucht. So sind etwa Toxizitätstests lediglich bei vier der annähernd 25 000 weltweit bekannten Bienenarten durchgeführt worden und es gibt nur sehr wenige Studien zur Toxizität gegenüber anderen Bestäubergruppen wie Schwebfliegen oder Tagfalter oder Motten (Nachtfalter). Ebenso haben Bodenorganismen (über Regenwürmer hinaus) bisher nur wenig Aufmerksamkeit gefunden; sie spielen eine mehrfache Rolle bei der Bodengewinnung und dem Erhalt von Bodenfruchtbarkeit. Toxizität gegenüber Wirbeltieren (wie granivoren Säugetieren und Vögeln, die in Gefahr sind behandeltes Saatgut zu fressen) ist lediglich für eine sehr geringe Anzahl von Arten untersucht.
- Die wenigen existierenden Toxizitätsstudien hierzu konzentrieren sich vor allem auf die Überprüfung akuter Toxizität, während die Auswirkungen langfristiger, akuter und chronischer Exposition bisher kaum bekannt sind, obwohl diese das ökologisch meist-relevante Szenario für sämtliche Organismen in landwirtschaftlichen und aquatischen Lebensräumen darstellen. Die langfristigen Expositionsfolgen unter ökologisch realistischen Bedingungen sind bisher noch nicht erforscht.
- Alle Neonicotinoide binden sich an dieselben nikotinischen Acetylcholinrezeptoren (nAChR) im Nervensystem, so dass die Entwicklung kumulativer Toxizität zu erwarten ist. Bisher hat sich noch keine Studie mit den additiven oder synergistischen Auswirkungen simultaner Exposition von mehreren Substanzen aus der Familie der Neonicotinoide beschäftigt, d. h. gegenüber Imidacloprid, Clothianidin, Thiamethoxam, Dinotefuran, Thiacloprid, Acetamiprid, Sulfoxaflor, Nitenpyram, Imidaclothiz, Paichongding und Cycloxyprid in aggregierter Dosis, z. B. als „Imidacloprid-Äquivalente“. Gegenwärtig werden Risikobewertungen für jede Chemikalie getrennt ausgeführt, jedoch sind viele Nicht-Zielarten, wie Bestäuber, simultaner Exposition gegenüber mehreren Neonicotinoiden sowie anderen Pestiziden und Stressoren ausgesetzt. Dies hat zu einer systematischen Unterbewertung der Risiken geführt. Die Quantifizierung einer Ansammlung von gleichzeitig auftretenden Pestiziden ist zwar eine gewaltige Herausforderung, jedoch wäre eine einzige Metrik, die alle Neonicotinoidexpositionen gegenüber repräsentativen Taxa umfasst, ein viel versprechender Ausgangspunkt.
- In der behördlichen Bewertung und Handhabung chemischer Risiken findet die kumulative Toxizität von sukzessiver und simultaner Exposition bisher keine Berücksichtigung.
- Für die meisten Organismen sind subletale Auswirkungen, die häufig im realistischen ökologischen Umfeld letale Konsequenzen haben, noch nicht untersucht, obwohl diese für Bienen bereits als gravierend bekannt sind. Bei den wenigen übrigen ebenfalls untersuchten Arten wurden subletale Dosen dieser neurotoxischen Chemikalien mit schädlicher Auswirkung auf das Verhalten festgestellt, und zwar in Dosen deutlich unter den unmittelbar tödlichen.
- Wechselwirkungen zwischen systemischen Insektiziden und sonstigen Stressoren, wie andere Pestizide, Krankheiten und nahrungsbedingter Stress, wurden nur in einer geringen Anzahl von Studien berücksichtigt (in der

Regel bei Bienen), welche bedeutende synergistische Auswirkungen dokumentiert haben. So erhöhen bei Bienen bereits niedrige Dosen von Neonikotinoiden ganz erheblich die Anfälligkeit für virale Erkrankungen. Wechselwirkungen zwischen systemischen Insektiziden und weiteren Stressoren sind allerdings in Organismen abgesehen von Bienen bisher fast gänzlich unerforscht. In Freilandsituationen sind Organismen fast immer gleichzeitig mehreren Pestiziden und anderen Stressoren ausgesetzt. Unser Unvermögen, die Konsequenzen dieser Wechselwirkungen zu verstehen (oder auch nur geeignete Mittel und Wege für zukünftige Untersuchungen in diesem Bereich zu entwickeln) stellt eine bedeutende Wissenslücke dar.

- Die Auswirkungen dieser systemischen Insektizide auf die Bereitstellung einer ganzen Reihe von Ökosystemleistungen sind noch unklar. Die Akkumulation in Böden und Sedimenten könnte es uns ermöglichen, potenzielle Auswirkungen auf die Bodenfauna zu prognostizieren, etwa für Regenwürmer und Springschwänze (Collembola), die dann möglicherweise ihrerseits Auswirkungen auf Bodengesundheit, Bodenstruktur und Permeabilität sowie auf den Nährstoffkreislauf hätten. Die Kontamination von Feldrandvegetation durch Verstäuben oder Grund- oder Oberflächenwasser lässt Auswirkungen auf die Fauna erwarten, die aus ästhetischen Gründen geschätzt wird (z. B. Schmetterlinge), und wird Populationen wichtiger nützlicher Insekten bedrohen, die für Bestäubung oder Schädlingsbekämpfung eine Rolle spielen (z. B. Schwebfliegen, räuberische Käfer). Der allgemeine Schwund landwirtschaftlicher und aquatischer

Insektenpopulationen wird wahrscheinlich Folgen für insektivore Arten wie Vögel und Fledermäuse haben. Die Kontamination von Süßwasser lässt eine Reduzierung von Wirbellosen als Nahrung für Fische und damit die Bedrohung der Fischerei befürchten. Ähnliche Entwicklungen dürften auch auf Meeresökosysteme in Küstengebieten zutreffen und damit eine potenzielle ernstzunehmende Bedrohung von Korallenriffen und Salzsumpf-Mündungsgebieten darstellen. Keines dieser Szenarien ist bisher untersucht worden.

- Der kurz- und langfristige agronomische Nutzen von Neonikotinoiden und Fipronil ist noch unklar. Angesichts der Häufigkeit ihrer Verwendung ist die geringe Anzahl veröffentlichter Studien zur Bewertung ihres Ertragsnutzens oder ihrer Kosteneffektivität erstaunlich; einige Studien jüngerer Datums (Furlan and Kreuzweiser 2015) zeigen, dass ihre Verwendung bei einigen Nutzpflanzen zu keinem Reingewinn führt sondern sogar zu einem ökonomischen Reinverlust. Gegenwärtig lässt sich nicht ermesen, wie die landwirtschaftlichen Auswirkungen der Meidung oder einer reduzierten Anwendung dieser systemischen Pestizide aussähen (wobei das kürzlich erfolgte partielle Verbot in der EU die Chance bietet, eben dies zu erforschen).

Angesichts der beschriebenen Wissenslücken ist es nicht möglich, das ganze Ausmaß der mit dem anhaltenden Einsatz systemischer Insektizide verbundenen Risiken angemessen zu evaluieren, aber die hier gegebene Auswertung von Forschungsergebnissen zeigt deutlich, dass die Risiken eine Vielzahl von Taxa betreffen, während der Nutzen für Anbauflächen mit

dem intensivsten Pestizideinsatz nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Schlussfolgerungen

Die Bewertung der aktuellen Forschungslage bestätigt eindeutig, dass das derzeitige Verunreinigungsniveau von Neonikotinoiden und Fipronil - auch bei Einhaltung der Zulassungsbedingungen angewendet (vorgeschriebene Dosis und Applikationsweise) - bei einer Vielzahl von Nicht-Zielarten die niedrigste Konzentration mit beobachteter schädlicher Wirkung oftmals übersteigt und damit zahlreiche negative biologische und ökologische Auswirkungen erwarten lässt. Die Kombination von prophylaktischem Einsatz, Persistenz, Drift, systemischen Eigenschaften und chronischer Toxizität rechtfertigt die Prognose grundlegender Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosystemfunktionen. Die in der WIA ausgewerteten Forschungsergebnisse beweisen überwiegend, dass das derzeitige Ausmaß des Gebrauchs von Neonikotinoiden und Fipronil kein nachhaltiger Ansatz zur Schädlingsbekämpfung sein kann; zudem wird das aktive Bemühen zahlreicher Betroffener untergraben, die Biodiversität und die daraus abzuleitenden ökologischen Funktionen und Leistungen diverser Organismen zu erhalten und zu fördern.

Im zeitgemäßen landwirtschaftlichen Umfeld stellt sich zunehmend klarer heraus, dass die Behandlung mit den Insektiziden Neonikotinoide und Fipronil – am deutlichsten ihr prophylaktischer Einsatz – den Grundsätzen der sogenannten integrierten Schädlingsbekämpfung (Integrated Pest Management, kurz IPM) nicht entspricht. Obwohl IPM-Ansätze schon immer Insektizide mit eingeschlossen haben, gibt es durchaus auch andere Ansätze, die sich

effektiv in die IPM integrieren lassen, indem sie Chemikalien lediglich als letztes Mittel in der Kette bevorzugter Optionen verwenden. Hervorzuheben ist hier, dass in der derzeitigen Praxis der Saatgutbehandlung das genaue Gegenteil der Fall ist: Chemikalien werden in erster Wahl anstatt als letztes Mittel eingesetzt. Vorzuziehende Möglichkeiten umfassen bzw. berücksichtigen Bioanbau, Fruchtwechsel- und Fruchtfolge, Mischkultur, Anbau-Timing, Bodenbearbeitung und -bewässerung, Anbau von weniger sensiblen Pflanzen auf Böden mit Schädlingsbefall, Anbau von „Opferpflanzen“, Anwendung biologischer Schädlingsbekämpfungsmittel und selektiver Einsatz alternativer risikoarmer Insektizide. Wegen ihres persistenten und systemischen Charakters (mit der sich daraus ergebenden Zukunftsbedeutung und kumulativen Umweltbelastung) sind Neonikotinoide und Fipronil miteiner integrierten Schädlingsbekämpfung (IPM) unvereinbar. IPM-Ansätze sind zugegebenermaßen nicht immer perfekt und befinden sich in konstanter Weiterentwicklung, dennoch bietet IPM eine reiche Informationsbasis und eine Erfolgsgeschichte, die für die Schädlingsbekämpfung bei zahlreichen Anbaumethoden ein hilfreicher Ansatzpunkt sein können. Tatsächlich ist der IPM-Ansatz in Europa in Übereinstimmung mit der EU-Richtlinie 2009/128/EG für alle Anbauflächen seit 1. Januar 2014 gesetzlich vorgeschrieben; in den meisten Mitgliedsstaaten bedarf es jedoch noch der Institutionalisierung und Einführung dieser neuen Regularien, wobei IPM nicht immer hinreichend klar definiert ist.

Empfehlungen

Die Autoren dieser Abhandlung empfehlen eine Umsetzung der Prinzipien von

Prävention und Vorsorge auf behördlicher Ebene, um die Vorschriften bezüglich Neonikotinoiden und Fipronil weiter zu verschärfen und klare Entwürfe für eine umfangreiche Reduzierung des weltweiten Einsatzes zu erstellen. Eine fortgesetzte Erforschung der Alternativen ist unerlässlich, aber ebenso dringend sind Aufklärung und Information von Landwirten und sonstigen Anwendern, ebenso sowie die Entwicklung von Richtlinien und Vorschriften zur Förderung alternativer Agrarstrategien im Umgang mit Schädlingen (B. z.B. Integrierte Schädlingsbekämpfung (IPM), biologische Landwirtschaft, etc.). Außerdem bedarf es weiterer Forschungsarbeit zum besseren Verständnis institutioneller und sonstiger Hemmnisse, die eine weitreichende Umsetzung nachweislich nachhaltiger Agrarpraktiken als Alternative zu Neonikotinoiden und Fipronil (wie auch zahlreicher sonstiger Pestizide) bisher noch verzögern.

Die Tauglichkeit behördlicher Abläufe zur Pestizidzulassung in verschiedenen Ländern ist, unter Berücksichtigung vergangener Irrtümer, eingehend zu prüfen. So fanden beispielsweise Chlorkohlenwasserstoffe wie DDT weltweite Verwendung, bis die Erkenntnis ihrer Persistenz, Bioakkumulation und schädlichen Auswirkung auf Ökosystemfunktionen schließlich in den meisten Ländern zum Verbot geführt hat. Ebenso wurden auch Phosphorsäureester weitgehend verboten, nachdem man verspätet erkannt hatte, dass sie eine beträchtliche Gefahr für die Gesundheit von Menschen und Wildtieren darstellen. Systemische Insektizide wie Neonikotinoide und Fipronil eröffnen ein neues Kapitel in der Liste offenkundiger Versäumnisse der behördlichen Pestizidbewertung und -genehmigung, die die Risiken großflächiger Anwendung von Breitspektrum-Insektiziden nicht hinreichend berücksichtigt.

Danksagung

Für die Manuskripterstellung waren die Diskussionen der International Task Force on Systemic Pesticides (TFSP) während ihrer Plenarversammlungen in Paris (2010), Bath (2011), Cambridge (2012), Montegrotto, Padua (2012), Louvain-la-Neuve (2013) und Legnaro, Padua (2013) außerordentlich hilfreich. Die Autoren werden in alphabetischer Reihenfolge genannt, mit Ausnahme des Erstautors, der auch Korrespondenzautor ist. Alle Autoren arbeiten für öffentliche Einrichtungen oder Universitäten, mit Ausnahme von V. Amaral-Rogers, die für Bug Life arbeitet, eine britische gemeinnützige Organisation zum Erhalt von Wirbellosen, D. W. Gibbons, der für RSPB arbeitet, eine britische gemeinnützige Organisation zum Erhalt von Wildtieren, D. A. Noome, deren unabhängige Arbeit für die TFSP von der Stichting Triodos Foundation finanziert wird, und N. Simon-Delso, der für CARI arbeitet (eine von der belgischen Regierung unterstützte Organisation). Die Beiträge von J. Settele und M. Wiemers wurden im Rahmen des www.legato-project.net verfasst (finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF). Diese Metaanalyse wurde vom Triodos Foundation's Support Fund for Independent Research on Bee Decline and Systemic Pesticides finanziert. Dieser Unterstützungs-Fonds wurde getragen von Spenden der Adessium Foundation (Niederlande), des Act Beyond Trust (Japan), der Universität Utrecht (Niederlande), der Stichting Triodos Foundation (Niederlande), der Gesellschaft für Schmetterlingsschutz (Deutschland), der M. A. O. C. Gravin van Bylandt Stichting (Niederlande), der Zukunftsstiftung Landwirtschaft (Deutschland), der Study Association Storm (Studierendenvereinigung Umweltwissenschaften der Universität

Utrecht), des Deutschen Berufs- und Erwerbsimkerbundes e. V. (Deutschland), der Gemeinschaft der europäischen Buckfastimker e. V. (Deutschland) sowie privat von Bürgern. Die Geldgeber waren nicht an Untersuchungsplanung, Datenerfassung und -analyse, dem Entscheid zur Publikation oder Manuskriptanfertigung beteiligt.

Mögliche Interessenkonflikte

Die Autoren geben keinerlei Interessenkonflikte an.

Open Access

Dieser Artikel wird gemäß der Creative Commons Attribution Lizenz verbreitet, welche jede Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, vorausgesetzt dass Autor(en) und Quelle genannt werden.

Literaturverzeichnis

- Bonmatin J-M, Giorio C, Girolami V, Goulson D, Kreutzweiser D, Krupke C, Liess M, Long E, Marzaro M, Mitchell E, Noome D, Simon-Delso N, Tapparo A (2014) Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. *Environ Sci Pollut Res.* doi:[10.1007/s11356-014-3332-7](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3332-7)
- Chagnon M, Kreutzweiser DP, Mitchell EAD, Morrissey CA, Noome DA, van der Sluijs JP (2014) Risks of large scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environ Sci Pollut Res.* doi:[10.1007/s11356-014-3277-x](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3277-x)
- Di Prisco G, Cavaliere V, Annoscia D, Varricchio P, Caprio E, Nazzi F, Gargiulo G, Pennacchio F (2013) Neonicotinoid clothianidin adversely affects insect immunity and promotes replication of a viral pathogen in honey bees. *Proc Natl Acad Sci USA* 110:18466–18471. doi:[10.1073/pnas.1314923110](https://doi.org/10.1073/pnas.1314923110)
- Furlan L and Kreutzweiser DP (2014) Alternatives to neonicotinoid insecticides for pest control: case studies in agriculture and forestry. *Environ Sci Pollut Res.* doi:[10.1007/s11356-014-3628-7](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3628-7)
- Gewehr M (2012) Pesticidal mixtures. Eur Patent EP 2 481 284 A2
- Gibbons D, Morrissey C and Mineau P (2014) A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. *Environ Sci Pollut Res.* doi:[10.1007/s11356-014-3180-5](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3180-5)
- Iwasa T, Motoyama N, Ambrose JT, Roe RM (2004) Mechanism for the differential toxicity of neonicotinoid insecticides in the honey bee, *Apis mellifera*. *Crop Prot* 23:371–378. doi:[10.1016/j.cropro.2003.08.018](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.08.018)
- Köhler H-R, Triebkorn R (2013) Wildlife ecotoxicology of pesticides: can we track effects to the population level and beyond? *Science* 341:759–765. doi:[10.1126/science.1237591](https://doi.org/10.1126/science.1237591)
- Liess M, Foit K, Becker A, Hassold E, Dolciotti I, Kattwinkel M, Duquesne S (2013) Culmination of low-dose pesticide effects. *Environ Sci Technol* 47:8862–8868
- Maxim L, Van der Sluijs JP (2013) Seed-dressing systemic insecticides and honeybees. Chapter 16, pp. 401–438. In: European Environment Agency (ed) Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation. European Environment Agency (EEA) report 1/2013, Copenhagen
- Pisa L, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin J-M, Downs C, Goulson D, Kreutzweiser D, Krupke C, Liess M, McField M, Morrissey C, Noome DA,

Settele J, Simon-Delso N, Stark J, van der Sluijs, van Dyck H, Wiemers M (2014) Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environ Sci Pollut Res*. doi:10.1007/s11356-014-3471-x

Satchivi NM, Schmitzer PR (2011) Synergistic herbicide/insecticide composition containing certain pyridine carboxylic acids and certain insecticides. US Patent US 2011/0207606

Simon-Delso N, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin JM, Chagnon M, Downs C, Furlan L, Gibbons DW, Giorio C, Girolami V, Goulson D, Kreutzweiser DP, Krupke C, Liess M, Long E, McField M, Mineau P, Mitchell EAD, Morrissey CA, Noome DA, Pisa L, Settele J, Stark JD, Tapparo A, van Dyck H, van Praagh J, van der Sluijs

JP, Whitehorn PR and Wiemers M (2014) Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. *Environ Sci Pollut Res*. doi:10.1007/s11356-014-3470-y

Spangenberg JH, Görg C, Thanh Truong D, Tekken V, Bustamante JV, Settele J (2014) Provision of ecosystem services is determined by human agency, not ecosystem functions. Four case studies. *Int J Biodivers Sci Ecosyst Serv Manag* 10:40–53

Whitehorn PR, O'Connor S, Wackers FL, Goulson D (2012) Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production. *Science* 336:351–352

This paper was originally published in the journal edited by [Springer](#), «[Environmental Science and Pollution Research](#)» as:

“[Van der Sluijs, J.P., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L.P., Bijleveld van Lexmond, M.F.I.J., Bonmatin, J-M., Chagnon, M., Downs, C.A., Furlan, L., Gibbons, D.W., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D.P., Krupke, C., Liess, M., Long, E., McField, M., Mineau, P., Mitchell, E.A.D., Morrissey, C.A., Noome, D.A., Pisa, L., Settele, J., Simon-Delso, N., Stark, J.D., Tapparo, A., Van Dyck, H., van Praagh, J., Whitehorn, P.R., Wiemers, M. \(2015\). «Conclusions of the Worldwide Integrated Assessment on the risks of neonicotinoids and fipronil to biodiversity and ecosystem functioning». «Environmental Science and Pollution Research», 22, 148-154.”](#)

Übersetzung ins Deutsche dank der freiwilligen Übersetzerin *Anke Reckermann*. PerMondo hat dieses Projekt mit Hilfe von Mondo Agit geleitet.

PERMONDO
Translations for non-profit

