

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 168 (2017)

Heft: 5

Artikel: Metalleinträge in terrestrische Ökosysteme : Analyse von Daten aus Modellierung und Biomonitoring

Autor: Nickel, Stefan / Schröder, Winfried

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097494>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Metalleinträge in terrestrische Ökosysteme: Analyse von Daten aus Modellierung und Biomonitoring

Stefan Nickel

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta (DE)*

Winfried Schröder

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta (DE)

Metalleinträge in terrestrische Ökosysteme: Analyse von Daten aus Modellierung und Biomonitoring

Depositionsmodellierungen und -messungen mit technischen Sammlern und biologischen Akkumulationsindikatoren dienen in Deutschland der räumlichen Differenzierung entsprechender Informationen, die für ganz Europa erhoben werden. Eine integrative, vergleichende Auswertung fehlt jedoch. Deswegen werden in diesem Artikel Ergebnisse zweier chemischer Transportmodelle zur Berechnung der Schwermetalldeposition (LOTOS-EUROS, EMEP) für Deutschland mit Schwermetallkonzentrationen in Blättern, Nadeln und Auflagehorizonten von Böden des intensiven Waldmonitorings ICP Forests Level II und der Umweltprobenbank (UPB) verglichen. Die Nadel- und Blattspiegelwerte der Jahre 2007–2011 aus der UPB zeigten deutliche statistische Zusammenhänge mit den Modellierungen. Die Korrelationen erwiesen sich als probenartenspezifisch, bei Cd-Gehalten in einjährigen Fichtentrieben zudem ökosystemspezifisch. Die UPB-Daten zeigten in der Regel höhere Korrelationen zu den LOTOS-EUROS- als zu den EMEP-Modellierungen. Die Unterschiede waren jedoch statistisch nicht signifikant. Die akkumulierten Elementgehalte von ICP Forests Level II zeigten überwiegend stärkere Korrelationen zu den EMEP-Modellierungen. Im Vergleich mit der UPB sind bei den Level-II-Daten die Korrelationen meistens schwächer. ICP Forests Level II hat den Vorzug, Daten zu Nadelproben unterschiedlicher Altersklassen zu liefern. Relativ hohe altersklassenspezifische Korrelationen ergaben sich insbesondere zwischen den mit LOTOS-EUROS modellierten Pb-Depositionen und zweijährigen Kiefern- und Fichtennadeln. Neben den Nadel-/Blattanalysen wurde ICP Forests Level II auch genutzt, um den Schwermetallgehalt in der Humusaufgabe zu untersuchen. Statistisch signifikante Korrelationen zeigten sich hier zwischen der modellierten Cd-Gesamtdeposition und der Konzentration in OH-Horizonten sowie zwischen der Pb-Gesamtdeposition und den Konzentrationen in OL- und OH-Horizonten. Durch die Integration der Messnetze der Biomonitoringprogramme ICP Forests Level II, UPB und Moos-Monitoring könnte zukünftig die räumliche Aussagekraft der Daten erhöht werden.

Keywords: deposition, bioaccumulation, heavy metals, EMEP, LOTOS-EUROS, ICP Forests, Germany, Europe
doi: 10.3188/szf.2017.0269

* Postfach 1553, DE-49364 Vechta, E-Mail stefan.nickel@uni-vechta.de

Die Genfer Luftreinhaltekonvention von 1979 (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) dient der Verminderung grenzüberschreitender Transporte luftverunreinigender Stoffe mit insgesamt acht stoff(gruppen)-spezifischen Protokollen. Das Aarhus-Protokoll von 1998 zielt beispielsweise darauf ab, die Emission und die atmosphärische Deposition von Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) zu reduzieren. Dazu werden im European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) Emissionsdaten zusammengestellt, die stoffliche Zusammensetzung von Luft und Niederschlägen gemessen, auf diesen Grundlagen der atmosphärische Transport und die Deposition u.a. der drei genannten Schwermetalle in einer räumli-

chen Auflösung von 50 km × 50 km modelliert (Travnikov & Ilyin 2005, Tørseth et al 2012) sowie die Modellierungen schliesslich mit Daten des gegenwärtig 22 (Hg) bzw. 66 (Cd, Pb) Stationen in Europa umfassenden EMEP-Messnetzes validiert (Aas & Breivik 2009, Travnikov et al 2012). Für das Gebiet Deutschlands wird die EMEP-Modellierung durch ein weiteres chemisches Transportmodell, LOTOS-EUROS, ergänzt (Schaap et al 2008, Builtjes et al 2011), das flächendeckende Aussagen zur atmosphärischen Deposition von Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V) und Zink (Zn) in einer gegenüber EMEP höheren räumlichen Auflösung (7 km × 7 km; 25 km × 25 km) liefert. Hinzu kommen Informationen aus dem europäi-



Abb 1 Blick auf den Standort 608 des intensiven Waldmonitorings ICP Forests Level II.

schen Moos-Survey, der im Rahmen des International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (ICP Vegetation; Harmens et al 2010, 2013, 2015) durchgeführt wird. Die Daten aus diesem Moos-Survey werden unter anderem zur Validierung der EMEP-Modellierungen sowie für Kartierungen der Deposition von Stickstoff (N) sowie der Schwermetalle Cd, Hg und Pb auf einem Raster von 5 km × 5 km verwendet (Schröder et al 2011, 2012).

Parallel dazu liefern auch andere Umweltbeobachtungsnetze wie das des intensiven Waldmonitorings ICP Forests Level II (2010; Abbildung 1) oder der Umweltprobenbank (UPB) des Bundes (UBA

2008) regelmässig Informationen zu Schwermetallgehalten in biologischen Rezeptoren wie Blättern, Nadeln oder Horizonten der Humusauflage. Eine integrative, vergleichende Analyse dieser Daten steht bislang aus. In diesem Zusammenhang sollen im vorliegenden Artikel die mit den zwei chemischen Transportmodellen LOTOS-EUROS und EMEP für Deutschland modellierten Depositionsdaten mit Daten aus dem ICP Forests Level II und der UPB verglichen werden. Dabei wird durch deskriptive statistische Verfahren einschliesslich Korrelationsanalysen geprüft, ob die in diesen beiden Beobachtungsnetzen verwendeten biologischen Rezeptoren – in Wäldern gesammelte Blätter, Nadeln und Bodenproben – Aussagen zur Anreicherung atmosphärischer Schwermetalleinträge in Ökosystemen liefern und inwiefern sie eine Ergänzung zur komplementären Bestimmung von Schwermetalleinträgen mit Modellierung und Moos-Monitoring (Nickel & Schröder 2017) darstellen können. Weitere potenziell geeignete Daten aus der zweiten deutschen Bodenzustandserhebung (BZE II) waren für diese Untersuchung noch nicht verfügbar.

Material und Methoden

Die integrative Auswertung stützt sich auf Depositionsberechnungen für den Zeitraum 2007–2011 mit den Modellen von EMEP und LOTOS-EUROS (Tabelle 1). LOTOS-EUROS berechnet die trockene Deposition rezeptorspezifisch für folgende neun Landnutzungsklassen: Laubwald, Nadelwald, Acker, Grasland, Dauerkultur, Ödland, Wasserfläche, Siedlung, Sonstige. Die Gesamtdeposition ergibt sich zuzüglich der aus Messungen abgeleiteten nassen Deposition. Für die Untersuchung wurde das ent-

Quelle	Umfang/Probenart	Elemente	Einheit	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
LE	Modell, 7 km × 7 km	Cd, Pb	µg/(m ² ×J)					●	●	●	●	●		
LE	Modell, 25 km × 25 km	As, Cr, Cu, Ni, Zn	µg/(m ² ×J)							●	●	●		
EMEP	Modell, 50 km × 50 km	Cd, Pb	µg/(m ² ×J)					●	●	●	●	●		
UPB	Konzentration in Nadeln/Blättern	Cd, Pb	µg/g					●	●	●	●	●		
UPB	Konzentration in Nadeln/Blättern	As, Cr, Cu, Ni, Zn	µg/g							●	●	●		
Level II	Konzentration in Nadeln/Blättern/Horizontalen der Humusauflage	Cd, Pb	µg/g					●	●	●	●	●		
Level II	Konzentration in Nadeln/Blättern	Cu, Zn	µg/g							●	●	●		

Tab 1 Daten für die integrative Analyse von Raten atmosphärischer Deposition sowie Schwermetallkonzentrationen in Blättern, Nadeln und Horizonten der Humusauflage. LE: LOTOS-EUROS, EMEP: European Monitoring and Evaluation Programme, UPB: Umweltprobenbank des Bundes, Level II: ICP Forests Level II.

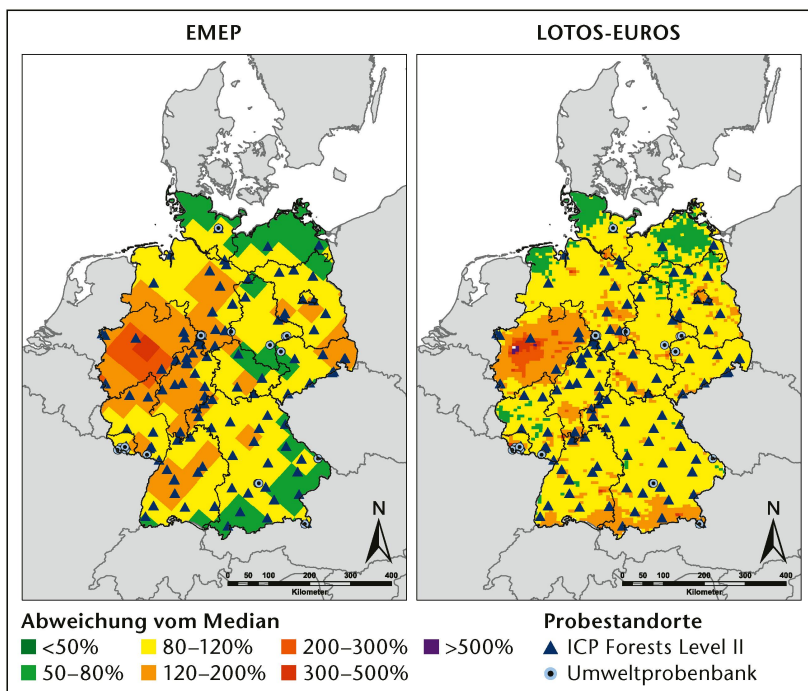


Abb 2 Abweichung der modellierten Pb-Gesamtdeposition (Mittelwerte der Jahre 2009–2011) aus EMEP (links) bzw. LOTOS-EUROS (rechts) vom jeweiligen deutschlandweiten Median sowie Monitoringstandorte des ICP Forests Level II und der Umweltprobenbank.

sprechend der Landnutzungsverteilung in jedem LOTOS-EUROS-Raster gewichtete Mittel der trockenen Deposition (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) sowie für Pb und Cd zudem auch die nutzungsspezifische trockene Deposition, unterschieden nach Laub- und Nadelwald, verwendet. Detailliertere Angaben zum EMEP-Depositionsmodell finden sich in Tørseth et al (2012), Travníkov & Ilyin (2005) und Travníkov et al (2012) sowie zum Modell LOTOS-EUROS in Bultjes et al (2011) und Schaap et al (2008).

Die integrative Analyse dieser Depositionsmo- dellierungen (EMEP, LOTOS-EUROS) erfolgt in Ver- bindung mit Informationen über gemessene Schwer- metallkonzentrationen in Blättern und Nadeln des ICP Forests Level II und der UPB sowie in Horizon- ten der Humusauflage in Wäldern von ICP Forests Level II (Tabelle 1). In der deutschen UPB¹ werden unter anderem Blätter und Nadeln von Bäumen in repräsentativen terrestrischen Ökosystemen nach Standardarbeitsanweisungen gesammelt und verän- derungsfrei gelagert (UBA 2008; Abbildung 2). Die Proben werden in der Regel jährlich entnommen und auf umweltrelevante Stoffe im Hinblick auf eine biologische, physikalische und chemische Charak- terisierung nach harmonisierten Verfahren analysiert. Für den Modellierungszeitraum 2007–2011 wa- ren Daten zu sieben Schwermetallen und zu vier repräsentativen Ökosystemen (Waldökosysteme bzw. Knicks [Wallhecken] in Agrarlandschaften, Forst- ökosysteme, naturnahe terrestrische Ökosysteme [Waldökosysteme in Nationalparks] sowie ballungs- raumnahe Ökosysteme) verfügbar. Diese enthalten Informationen zu Schwermetallgehalten in einjäh-

rigen Trieben von Fichte (*Picea abies*) und Waldkie- fer (*Pinus sylvestris*) sowie in Blättern der Buche (*Fa- gus sylvatica*) und Pyramidenpappel (*Populus nigra* «Italica»).

Im intensiven Waldmonitoring des ICP- Forests-Level-II-Programms werden je nach erhobe- ner Bestimmungsgröße in Deutschland an bis zu 90 Standorten unter anderem Daten zur Blatt-/Na- delchemie sowie zu Schwermetallgehalten der Bo- denfestphase erhoben (Abbildung 2). Die Probenent- nahmen und -analysen erfolgen alle zwei Jahre entsprechend der harmonisierten Methodik des ICP Forests (2010). Die vom Thünen-Institut für den Mo- dellierungszeitraum 2007–2011 bereitgestellten Da- ten² enthalten von bundesweit 63 Level-II-Flächen Blattproben von Buche, Traubeneiche (*Quercus pet- raea*) und Stieleiche (*Quercus robur*) sowie Nadeln von Fichte und Waldkiefer, mit Konzentrationsangaben zu Cd, Cu, Pb und Zn. Die Nadelproben umfassen je nach Alter des Nadeljahrganges diesjährige, vorjäh- rige und zweijährige Triebe (BMVEL 2006). Die Probenbezeichnung «vorjährige Triebe» ist synonym zu «einjährige Triebe» der UPB. Proben von Lärche (*La- rix decidua*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) wurden aufgrund der gerin- gen Stichprobenumfänge von der Betrachtung aus- geschlossen. Des Weiteren wurden Cd- und Pb-Ge- halte in verschiedenen Horizonten der Humusauflage von 36 Level-II-Standorten herangezogen.

Die Auswertung mit dem Statistikpaket R (R Core Team 2013) beruht auf Vergleichen deskriptiv- statistischer Kennzahlen, Korrelationsanalysen und inferenz-statistischen Verfahren. Hierzu wurden die geografischen Informationen zur modellierten at- mosphärischen Schwermetalldeposition (LOTOS- EUROS, EMEP) zunächst mit den Daten zur Schwer- metallakkumulation aus der UPB und dem Level- II-Monitoring mithilfe von Standard-GIS-Funktion- en (Overlay, Spatial Join) räumlich verknüpft.

LOTOS-EUROS bildet zwar die meteorologi- sche Dynamik, aber – basierend allein auf Emis- sionsdaten des Jahres 2005 – keinen zeitlichen Trend der Schwermetalldeposition im Betrachtungszeit- raum 2007–2011 ab. Für den korrelationsanalyti- schen Vergleich mit LOTOS-EUROS wurden daher die Blatt-/Nadelspiegelwerte der Jahre 2007–2011 trendbereinigt (Bezugsjahr 2010). Nadel-/Blattspie- gelwerte grösser oder kleiner der dreifachen sowie Gehalte in Horizonten der Humusauflage grösser oder kleiner der zweifachen Standardabweichung wurden als Ausreisser eliminiert.

Zur Quantifizierung der statistischen Zusam- menhänge zwischen den Modellierungs- und Moni-

¹ Umweltprobenbank des Bundes: [www.umweltprobenbank.de/ de/documents/investigations/analytes](http://www.umweltprobenbank.de/de/documents/investigations/analytes) (22.12.2016) und Sta- tionsdatenbank des Umweltbundesamtes: www.env-it.de/stati- onen/public/open.do (22.12.2016)

² www.futmon.org/data (22.12.2016)

toringdaten wurde aufgrund der geringen Stichprobenumfänge und fehlender Normalverteilung der Korrelationskoeffizient nach Kendall r_τ (R Core Team 2013, Package «Kendall», Version 2.2) verwendet und nach Mann-Kendall auf Signifikanz getestet. Die Korrelationskoeffizienten werden nach Brosius (2013) eingestuft als sehr schwach (<0.2), schwach (0.2 bis 0.4), mittel (0.4 bis 0.6), stark (0.6 bis 0.8) oder sehr stark (>0.8).

Für die Vergleiche der beiden Depositionsmodellierungen mit den entsprechenden Messwerten aus der UPB wurde untersucht, inwieweit die Korrelationen element-, probenarten- oder ökosystemspezifisch sind (Cd, Pb). Das bei LOTOS-EUROS gegenüber EMEP erweiterte Stoffspektrum ermöglichte für die Jahre 2009–2011 einen Vergleich zudem für As, Cr, Cu, Ni und Zn.

Die Vergleiche mit den Blatt-/Nadelspiegelwerten aus der Level-II-Datenbank (LOTOS-EUROS: Cd, Cu, Pb, Zn; EMEP: Cd, Pb) dienten der Prüfung, inwieweit die statistischen Beziehungen zu den Modellierungen probenarten- bzw. altersklassenspezifisch sind, und die Vergleiche mit den Schwermetallkonzentrationen in Horizonten der Humusaufgabe, inwieweit diese horizonspezifisch sind. Für LOTOS-

EUROS wurden zudem die Korrelationen mit den nutzungsspezifischen Depositionsmodellierungen (Laub- oder Nadelwald) berechnet.

Für den Vergleich der beiden Modellierungen (EMEP, LOTOS-EUROS) wurde für Cd und Pb ermittelt, inwieweit sich die Korrelationskoeffizienten in Bezug auf die beiden Modelle unterscheiden und ob diese Unterschiede statistisch signifikant sind. Die Signifikanz der Unterschiede wurde in Anlehnung an Sachs & Hedderich (2009) nach Gleichung 1 für $\alpha = 0.05$ bestimmt. Für den Test wurden die ursprünglich ermittelten Korrelationskoeffizienten (Kendall) nach Sachs & Hedderich (2009) in den transformierten Korrelationskoeffizienten nach Fisher überführt und dann in die folgende Gleichung eingesetzt.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - 3)(z_i - z)^2 \quad (1)$$

mit:

χ^2 = Prüfwert

k = Freiheitsgrad (Anzahl der Koeffizienten)

n_i = Anzahl der Proben

z_i = Transformierter Korrelationskoeffizient nach Fisher

z = Hypothetischer z-Wert nach Sachs & Hedderich (2009)

Probenart	EMEP		LOTOS-EUROS						
	Cd	Pb	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Blätter									
Buche	0.23 (28)	0.43** (28)	0.21 (14)	0.29* (28)	0.14 (14)	0.25 (14)	-0.36 (14)	0.44** (28)	0.27 (14)
– Forstökosysteme	0.69* (8)	0.64* (8)	–	0.71* (8)	–	–	–	0.64* (8)	–
– Naturnahe Ökosysteme	0.43* (14)	0.56* (14)	–	0.60** (14)	–	–	–	0.30 (14)	–
– Agrarökosysteme ^{1), 3)}	0.07 (6)	0.47 (6)	–	-0.33 (6)	–	–	–	-0.60 (6)	–
Pyramidenpappel	0.26 (18)	0.44* (17)	0.17 (9)	0.36* (18)	0.61* (9)	0.44 (9)	0.33 (9)	0.63** (17)	-0.17 (9)
Nadeln									
Fichte	0.16 (35)	0.27* (34)	-0.15 (17)	0.19 (35)	-0.07 (17)	0.10 (17)	-0.43* (17)	0.29* (34)	0.44* (17)
– Forstökosysteme	0.40 (8)	0.43 (8)	–	0.64* (8)	–	–	–	0.43 (8)	–
– Naturnahe Ökosysteme	0.36 (14)	0.21 (14)	–	0.49* (14)	–	–	–	0.30 (14)	–
– Agrarökosysteme ^{2), 3)}	-0.73 (6)	0.07 (6)	–	-0.87* (6)	–	–	–	-0.33 (6)	–
– Ballungsraumnahe Ökosysteme ³⁾	0.29 (6)	0.33 (6)	–	0.33 (6)	–	–	–	-0.20 (6)	–
Waldkiefer ³⁾	-0.07 (6)	0.73 (6)	-1.00 (3)	0.47 (6)	0.33 (3)	-1.00 (3)	0.33 (3)	-0.20 (6)	0.33 (3)

Tab 2 Korrelationskoeffizienten (Kendall) r_τ für die Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten (Cd und Pb: Zeitraum 2007–2011; As, Cr, Cu, Ni und Zn: Zeitraum 2009–2011) in Blatt- und Nadelproben der Umweltprobenbank und den rasterhaft modellierten Gesamtdepositionen (EMEP und LOTOS-EUROS). Beispiel: 0.23 = Korrelationskoeffizient r_τ nach Kendall; (28) = Stichprobengröße; fett = signifikante Korrelationen; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. 1) Knicks (Wallhecken) in der Agrarlandschaft; 2) Forstökosysteme in der Agrarlandschaft, 3) wegen zu kleiner Stichprobengröße ausgeschlossen von Interpretation.

Ergebnisse

Umweltprobenbank (UPB)

Zwischen den gemessenen Cd-Gehalten in Laubblättern (Buche, Pappel) der UPB und den mit LOTOS-EUROS modellierten Cd-Depositionen bestehen positive, aber schwache Korrelationen ($r_\tau = 0.29$ bis 0.36 ; Tabelle 2). Wird die Stichprobe nach Ökosystemtypen aufgeteilt, zeigen sich zumindest bei der Buche in den Forstökosystemen bzw. naturnahen terrestrischen Ökosystemen (Waldökosysteme in Nationalparks) starke statistische Zusammenhänge ($r_\tau = 0.60$ bis 0.71). Im Vergleich zu LOTOS-EUROS gilt dies auf etwas niedrigerem Niveau auch für die EMEP-Modellierung mit mittleren bis starken Zusammenhängen ($r_\tau = 0.43$ bis 0.69). Die Überprüfung der Unterschiedlichkeit der Korrelationskoeffizienten nach Gleichung 1 ergibt jedoch, dass die Differenzen nicht signifikant sind. Auch die Korrelationen bei den einjährigen Trieben der Fichte erweisen sich zumindest bei LOTOS-EUROS als ökosystemspezifisch mit mittleren bis starken Beziehungen ($r_\tau = 0.49$ bis 0.64) in naturnahen Ökosystemen und in Forstökosystemen. Die Korrelationen zwischen

den Cd-Konzentrationen und den EMEP-Daten waren sämtlich nicht signifikant ($\alpha = 0.05$).

Wie bei Cd sind die Korrelationen auch bei Pb probenartenspezifisch, wobei die Blattspiegelwerte (Buche, Pappel) mit beiden Depositionsmodellierungen ausgeprägter korrelieren (mittlere bis starke Korrelation) als die Nadelspiegelwerte (Fichte; schwache Korrelation). Der Vergleich zwischen den Modellen zeigt, dass die Korrelationskoeffizienten zwischen den Blatt-/Nadelspiegelwerten der UPB und LOTOS-EUROS etwas höher sind ($r_\tau = 0.29$ bis 0.63) als bei EMEP ($r_\tau = 0.27$ bis 0.44). Die Unterschiede der Korrelationskoeffizienten sind allerdings nach Gleichung 1 wiederum nicht signifikant. Zumindest bei der Buche zeigt sich auch bei Pb, dass die ökosystemspezifische Betrachtung höhere Korrelationskoeffizienten liefert als die allein probenartenspezifische. Dies gilt wie bei Cd für die Forstökosysteme ($r_\tau = 0.64$) und bei EMEP auch für die naturnahen Ökosysteme ($r_\tau = 0.56$). Hinsichtlich As, Cr, Cu, Ni und Zn sind nur zwei der 20 untersuchten Korrelationen statistisch signifikant: die Cr-Konzentrationen in Blättern der Pyramiden-Pappel ($r_\tau = 0.61$, $p < 0.05$) und die Zn-Konzentrationen in einjährigen

Probenart	EMEP		LOTOS-EUROS ¹⁾		LOTOS-EUROS ²⁾			
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cu	Zn
Blätter								
Buche	0.21* (46)	0.40** (39)	-0.03 (32)	0.22 (32)	-0.03 (46)	0.26* (39)	0.00 (36)	0.04 (42)
Stieleiche	-0.20 (6)	0.40 7(6)	-0.11 (5)	0.32 (5)	0.33 (6)	0.2 (6)	-0.33 (6)	0.20 (6)
Traubeneiche	-0.03 (14)	0.64** (13)	0.01 (10)	0.13 (10)	0.14 (14)	-0.06 (13)	-0.09 (12)	-0.3 3(12)
Nadeln								
Fichte	0.28** (77)	0.30** (68)	0.18 (50)	0.02 (50)	0.21** (77)	0.19* (68)	-0.03 (77)	0.02 (97)
- diesjährige Triebe	0.27* (33)	0.34** (31)	0.18 (23)	-0.23 (23)	0.24* (33)	0.04 (31)	-0.04 (29)	0.00 (39)
- vorjährige Triebe	0.24 (27)	0.11 (22)	0.21 (14)	-0.03 (14)	0.15 (27)	0.20 (22)	-0.07 (25)	0.14 (25)
- zweijährige Triebe	0.21 (17)	0.44* (15)	0.12 (13)	0.24 (13)	0.23 (17)	0.58** (15)	-0.11 (23)	0.13 (23)
Waldkiefer	0.08 (126)	0.20** (108)	0.38** (74)	0.44** (74)	0.34** (126)	0.18** (108)	0.34** (79)	0.33** (79)
- diesjährige Triebe	0.11 (53)	0.20 (47)	0.43** (27)	0.45** (27)	0.37** (53)	0.22* (47)	0.32* (28)	0.30* (28)
- vorjährige Triebe	0.09 (51)	0.29** (45)	0.40** (25)	0.48** (14)	0.35** (51)	0.20* (45)	0.41** (27)	0.41** (27)
- zweijährige Triebe	0.03 (16)	0.03 (16)	0.37** (22)	0.47** (22)	0.36* (22)	0.56** (16)	0.49** (24)	0.35* (24)

Tab 3 Korrelationskoeffizienten (Kendall) r_τ für die Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten (Cd und Pb; Zeitraum 2007–2011; Cu und Zn; Zeitraum 2009–2011) in Blatt- und Nadelproben des ICP Forests Level II und den rasterhaft modellierten Gesamtdepositionen (EMEP und LOTOS-EUROS). Beispiel: 0.21 = Korrelationskoeffizient r_τ nach Kendall; (46) = Stichprobengrösse; fett = signifikante Korrelationen; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$. 1) Nutzungsspezifische Deposition (Laub-/Nadelwälder) aus LOTOS-EUROS, 2) Entsprechend der Landnutzungsverteilung in jedem LOTOS-EUROS-Rasterelement gewichtetes Mittel der Schwermetalldeposition.

Trieben der Fichte ($r_r = 0.44$, $p < 0.05$). Von der Interpretation aufgrund der geringen Stichprobengrößen ($n \leq 6$) ausgeschlossen werden müssen: Korrelationen bei den Blatt-/Nadelspiegelwerten in Agrarökosystemen bzw. ballungsraumnahen Ökosystemen und bei den einjährigen Trieben der Waldkiefer. Gleiches gilt für die negative, da unplausible Korrelation im Falle der Ni-Konzentrationen in Fichtentrieben.

ICP Forests Level II

Die Korrelationskoeffizienten sind bei allen vier untersuchten Schwermetallen deutlich element- und probenartenspezifisch, bei den Kiefernadeln zudem oft altersklassenspezifisch (Tabelle 3). Anders als bei der UPB treten beim ICP Forests Level II die höchsten Korrelationen für Cd nicht bei den Blatt-, sondern bei den Nadelproben auf. Zum entsprechend der Nutzungsverteilung gewichteten Mittel aus LOTOS-EUROS finden sich schwache bis mittlere altersklassenspezifische Korrelationen bei den Kiefernproben ($r_r = 0.37$ bis 0.43) und zur EMEP-Deposition bei Fichte ($r_r = 0.28$, $p < 0.01$) und Buche ($r_r = 0.21$, $p < 0.05$). Die Unterschiede der Korrelationen (EMEP, LOTOS-EUROS) sind gemäss Gleichung 1 nur bei der Fichte als statistisch signifikant anzusehen ($p < 0.05$). Die Korrelationen bei Trauben- und Stieleiche sind nicht signifikant, insbesondere auch aufgrund der geringen Stichprobenzahl. Die Korrelationskoeffizienten der nutzungsspezifischen LOTOS-EUROS-Modellierung für Laub- und Nadelwald entsprechen bei allen Probenarten in etwa denen des gewichteten Mittels.

Auch zwischen den Pb-Gehalten in Blättern/Nadeln des ICP-Forests-Level-II-Programms und der modellierten Gesamtdeposition stellen sich wie bei der UPB die statistischen Relationen deutlich probenartenspezifisch, bei den Nadelspiegelwerten zudem altersklassenspezifisch dar. Bei Fichte, Kiefer und Buche zeigen sich schwache, aber signifikante Korrelationen sowohl mit dem EMEP-Modell als auch dem gewichteten Mittel aus LOTOS-EUROS (Ta-

belle 3). Die höchsten Korrelationskoeffizienten zeigen sich bei den zweijährigen Trieben der Fichte (LOTOS-EUROS, gewichtetes Mittel: $r_r = 0.58$; EMEP: $r_r = 0.44$). Dieser Unterschied ist nach Gleichung 1 allerdings als nicht signifikant einzustufen. Bei der Waldkiefer findet man die stärksten Korrelationen zwischen Pb-Gehalten in zweijährigen Trieben und LOTOS-EUROS ($r_r = 0.47$ – 0.56) bzw. teilweise auch bei den einjährigen Trieben (LOTOS-EUROS, gewichtetes Mittel: $r_r = 0.48$; EMEP: $r_r = 0.29$). Traubeneiche und Buche zeigen stärkere Korrelationen mit dem EMEP-Modell ($r_r = 0.40$ – 0.64) als mit LOTOS-EUROS. Wie bei Cd stellen sich die statistischen Zusammenhänge zur nutzungsspezifischen Deposition aus LOTOS-EUROS nur bei der Waldkiefer als signifikant dar.

Bei Cu wurden statistisch signifikante, schwache Korrelationen allein für die Waldkiefer ermittelt. Diese sind zudem altersklassenspezifisch, wobei die höchsten (= mittleren) Korrelationen bei vorjährigen ($r_r = 0.41$) und bei zweijährigen Kiefernadeln ($r_r = 0.49$) auftreten. Alle anderen Biomonitoring zeigen negative oder nicht signifikante Korrelationen. Für Zn gilt das Gleiche wie für Cu.

Die Zusammenhänge zwischen den Depositionsmodellierungen (LOTOS-EUROS, EMEP) und den Schwermetallgehalten in Böden sind deutlich horizontspezifisch. Überwiegend sind schwache Korrelationen festzustellen (Tabelle 4). Bei den Cd-Konzentrationen zeigen sich statistisch signifikante Korrelationen lediglich in Bezug auf den OH-Horizont. Die Korrelationen zu LOTOS-EUROS ($r_r = 0.31$, $p < 0.01$) fallen etwas höher aus als zu EMEP ($r_r = 0.27$, $p < 0.01$). Gemäss Gleichung 1 sind die Unterschiede der Koeffizienten als nicht signifikant einzustufen. Alle weiteren Horizonte der Bodenaufgabe weisen keine signifikanten oder aber negative Zusammenhänge mit den Depositionsmodellierungen auf.

Die höchsten Korrelationen zwischen den Pb-Gehalten in den Auflagehorizonten und den modellierten Depositionen zeigen sich in Bezug auf den OL-Horizont ($r_r = 0.24$ – 0.38) und den OH-Horizont ($r_r = 0.23$ – 0.32). In beiden Fällen sind die Korrelationen mit LOTOS-EUROS höher als bei EMEP. Die Unterschiede der Korrelationskoeffizienten sind allerdings nach Gleichung 1 nicht signifikant. Für die Beziehung zwischen LOTOS-EUROS und den Pb-Gehalten im OF-Horizont ergibt sich ein schwacher Zusammenhang ($r_r = 0.21$, $p < 0.05$). Bei allen anderen Korrelationen finden sich sehr schwache oder negative Zusammenhänge.

Methodenkritische Diskussion

Da vergleichbare integrative Analysen zwischen unterschiedlichen Depositionsmodellierungen und Blatt-/Nadelspiegelwerten bzw. Schwerme-

Probenart	EMEP		LOTOS-EUROS	
	Cd	Pb	Cd	Pb
OL – Wenig zersetzte organische Auflage	0.09 (58)	0.24** (58)	-0.04 (58)	0.38** (58)
OF – Fermentierte organische Auflage	0.04 (86)	0.15* (85)	0.12 (86)	0.21** (85)
OFH – Fermentierte/humifizierte organische Auflage	-0.06 (25)	0.26 (25)	0.02 (25)	-0.20 (25)
OH – Humifizierte organische Auflage	0.27** (61)	0.23* (60)	0.31** (61)	0.32 (60)

Tab 4 Korrelationskoeffizienten (Kendall) r_r für die Beziehung zwischen Cd- und Pb-Gehalten in Horizonten der Bodenaufgabe des ICP Forests Level II und der mit EMEP und LOTOS-EUROS berechneten Gesamtdeposition (Zeitraum 2007–2011). Beispiel: 0.09 = Korrelationskoeffizient r_r nach Kendall; (58) = Stichprobengröße; fett = signifikante Korrelationen; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

tallgehalten in Horizonten der Humusaufgabe derzeit nur spärlich vorhanden sind, muss die folgende Diskussion überwiegend methodenkritisch ausfallen. Die vorliegende Arbeit wertet Daten aus, die sich auf Deutschland beziehen, diesen Raum aber mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung erfassen. Ob sich räumlich feiner und gröber aufgelöste Daten in ihren räumlichen und zeitlichen Trends ähneln, lässt sich als (Auto-)Korrelation bzw. als Regression quantifizieren (Turner 1990, Schröder et al 2012). Sie zeigen an, ob davon ausgegangen werden kann, dass die Messergebnisse durch gleiche Faktoren beeinflusst werden. Die das Mess- oder Modellierungsergebnis beeinflussenden Faktoren lassen sich zum Teil in den Regressionsmodellen spezifizieren. Die unerklärten Anteile, die Residuen, werden insofern in die Datenauswertung einbezogen, als deren räumliche Autokorrelationsstrukturen in die Kartierung eingehen. Die unerklärten Anteile sind auf Faktoren zurückzuführen, die sich nicht spezifizieren lassen, die jedoch wirksam und räumlich strukturiert sind. Das ist typisch für komplexe Phänomene, die sich nicht direkt messen lassen, sondern nur über teilidentische Indikatoren und entsprechend empirisch unvollkommen fassen lassen. Die Datenerhebung erfolgt nach klaren und standardisierten Vorgaben, wobei sie bei der UPB besonders streng sind. Daher wird der Einfluss schlechter oder heterogener Datenqualität auf das Untersuchungsergebnis als gering eingestuft. Leider konnten die Daten aus den Depositionsmessnetzen der Bundesländer in die vorliegende Untersuchung nicht einbezogen werden, weil diese methodisch nicht harmonisiert erhoben werden und nicht verfügbar waren. Die Frage nach der Übertragbarkeit der Untersuchung kann ebenfalls nur in einer Folgearbeit erfolgen. Die dazu anhand derselben Methodik mit Daten aus einer Vergleichsregion, z.B. der Schweiz, zu testende Null-Hypothese wäre, dass sich die Ergebnisse nicht unterscheiden. Die Ergebnisse der Untersuchung werden zur Politikberatung genutzt, in Deutschland durch das Umweltbundesamt im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention. Eine tiefer gehende Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Daten wäre eine eigene, wissenschaftstheoretische Arbeit, wie sie zum Beispiel von Schröder & Pesch (2013) vorgelegt wurde.

Die Analyse zeigte deutliche statistische Zusammenhänge zwischen den Daten der UPB und den Depositionsmodellierungen, insbesondere bei den Blattspiegelwerten. Die UPB ist damit für integrative Auswertungen und Vergleiche mit chemischen Transportmodellen prinzipiell geeignet. Die Korrelationen waren sämtlich probenartenspezifisch, beim Cd-Gehalt in einjährigen Fichtentrieben und in Buchenblättern zudem ökosystemspezifisch, was ähnlich wie beim europäischen Moos-Survey (Nickel & Schröder 2017) auf den Einfluss der Beschaf-

fenheit der umgebenden Nutzung (Meyer et al 2014) zurückzuführen sein könnte. LOTOS-EUROS zeigte in der Regel höhere Korrelationen zu den Daten der UPB als die EMEP-Modellierungen, d.h., die Übereinstimmung in Bezug auf die Schwermetallbelastung ist besser.

Im Vergleich zur UPB zeigten die Elementgehalte des ICP Forests Level II ein entgegengesetztes Bild: Hier waren die Korrelationen zwischen der Gesamtdeposition und den Schwermetallkonzentrationen in Nadeln ausgeprägter, und es zeigten sich oft stärkere Korrelationen zur EMEP-Modellierung. Im Vergleich mit der UPB resultierten bei den Level-II-Daten überwiegend schwächere statistische Zusammenhänge, trotz der grösseren Stichprobenumfänge. Allerdings hat das intensive Waldmonitoring ICP Forests Level II den Vorzug, Daten zu Nadelproben unterschiedlicher Altersklassen zu liefern. Besonders hohe altersklassenspezifische Korrelationen ergaben sich zwischen den mit LOTOS-EUROS berechneten Pb-Depositionen und 2-jährigen Kiefern- und Fichtennadeln. Einer bestimmten Altersklasse aufgrund der hier vorgelegten Resultate generell den Vorzug als Biomonitor zu geben, ist jedoch nicht möglich.

Die oft fehlenden Signifikanzen der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen EMEP und LOTOS-EUROS sowie den entsprechenden Schwermetallgehalten in den Blatt- und Nadelproben der UPB bzw. des ICP Forests Level II sowie den Auflagehorizonten der Böden ergibt sich aus der Grösse der Unterschiede in Kombination mit einer zu geringen Fallzahl.

Vergleicht man die Ergebnisse mit Zusammenhangsmassen zu Schwermetallgehalten in Moosen und modellierter Deposition (EMEP, LOTOS-EUROS) mit Koeffizienten nach Spearman r_s zwischen 0.31 und 0.81 (Nickel & Schröder 2017), zeigen sich bei den Blatt- und Nadelspiegelwerten der UPB und des ICP Forests Level II schwächere statistische Abhängigkeiten. Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung aufgrund von Einflussfaktoren, die für Moose nicht relevant sind wie der Beitrag der Wurzelaufnahme aus dem Boden und der Tatsache, dass die meisten Schwermetalle wieder aus den Blatt-/Nadel-Oberflächen freigesetzt, d.h. nur bedingt akkumuliert werden (Ceburnis & Steinnes 2000). Im Gegensatz zum europäischen Moos-Survey sind die Messnetze der UPB und des ICP Forests Level II bei weitaus weniger Standorten naturräumlich wenig repräsentativ und berücksichtigen auch die Flächenproportionen der Bundesländer nicht.

Über die Nadel-/Blattanalysen hinaus wurden auch Daten zu Schwermetallgehalten in Auflagehorizonten aus dem Level-II-Programm untersucht. Signifikante Korrelationen zeigten sich hier zwischen modellierter Cd-Gesamtdeposition und Konzentrationen in OH-Horizonten sowie zwischen der Pb-Gesamtdeposition und entsprechenden Konzentra-

tionen in OL- und OH-Horizonten. Damit wiesen die Level-II-Daten der Auflagehorizonte in Deutschland schwächere statistische Zusammenhänge auf als ähnliche für Norwegen durchgeführte Vergleiche zwischen EMEP-Depositionen (Mittel der Jahre 2003 bis 2005) und gemessenen Schwermetallkonzentrationen in den obersten 3 cm des A-Horizontes des Jahres 2005 (Cd: $r_s = 0.50$; Pb: $r_s = 0.67$, Nickel et al 2014).

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass Emissionskataster in Verbindung mit einer räumlich hoch aufgelösten Depositionsmodellierung sich nicht nur durch ein räumlich differenziertes Biomonitoring mit Moosen, sondern auch durch ein Monitoring mit Bättern/Nadeln ergänzen lässt, um damit die zeitliche Aussagekraft der Biomonitoringdaten zu erhöhen. Ob dieses vor allem im Sinne eines im Vergleich zu den Moosen zeitlich höher aufgelösten ergänzenden Biomonitorings genutzt werden kann, sollte im Weiteren untersucht werden. Die UPB bietet dafür aufgrund der jährlichen Auflösung gute Voraussetzungen, die Daten des Level-II-Programms wären nur mit zweiter Priorität zu empfehlen. Neben den Schwermetallgehalten in Blättern und Nadeln sollten auch die Eigenschaften des Probenentnahmestandortes und seiner Umgebung (z.B. orografische Höhe, Niederschlag, Landnutzung, Bevölkerungsdichte) Gegenstand weiterer Analysen (UPB, Level II) sein. Schliesslich wären zur Überprüfung von Depositionsmodellierungen insbesondere auch methodisch harmonisierte Depositionsmessungen im ICP Forests Level II sinnvoll. ■

Eingereicht: 21. Juli 2016, akzeptiert (mit Review): 18. Januar 2017

Dank

Die vorliegende Untersuchung ist Teil des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsprojekts «Auswirkungen der Schwermetall-Emissionen auf Luftqualität und Ökosysteme in Deutschland – Quellen, Transport, Eintrag, Gefährdungspotenzial». Förderkennzeichen: FuE 3713 63 253.

Literatur

- AAS W, ALLEMAN LY, BIEBER E, GLADTKE D, HOUDRET JL ET AL (2009) Comparison of methods for measuring atmospheric deposition of arsenic, cadmium, nickel and lead. *J Environ Monit* 11: 1276–1283.
- AAS W, BREIVIK K (2009) Heavy metals and POP measurements 2007. Kjeller: Norwegian Institute Air Res, EMEP/CCC-Report 3/2009. 117 p.
- BMVEL (2006) Arbeitsanleitung für die zweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) – Kapitel VI Beprobung von Nadeln und Blättern. Berlin: Bundesministerium Verbraucherschutz Ernährung Landwirtschaft, 2 ed. 20 p.
- BROSIOUS F (2013) SPSS 21. Heidelberg: Mitp. 1052 p.
- BUILTJES P, HENDRIKS E, KOENEN M, SCHAAP M, BANZHAF S ET AL (2011) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Dessau: Umweltbundesamt, UBA-Texte 38/2011. 154 p.
- CEBURNIS D, STEINNES E (2000) Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of canopy. *Atmos Environ* 34: 4265–4271.
- HARMENS H, NORRIS D A, STEINNES E, KUBIN E, PIISPANEN J ET AL (2010) Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial and temporal trends in Europe. *Environ Pollut* 158: 3144–3156.
- HARMENS H, FOAN L, SIMON V, MILLS G (2013) Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: A review. *Environ Pollut* 173: 245–254.
- HARMENS H, MILLS G, HAYES F, NORRIS D, SHARPS K (2015) Twenty-eight years of iCP Vegetation. An overview of its activities. *Ann Bot* 5: 31–43.
- ICP FORESTS (2010) Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg: International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP-Forests). 577 p.
- MEYER M, PESCH R, SCHRÖDER W, STEINNES E, UGGERUD H T (2014) Spatial patterns and temporal trends of heavy metal concentrations in moss and surface soil specimens collected in Norway between 1990 and 2010. *Environ Sci Eur* 26: 1–18.
- NICKEL S, HERTEL A, PESCH R, SCHRÖDER W, STEINNES E ET AL (2014) Modelling and mapping spatio-temporal trends of heavy metal accumulation in moss and natural surface soil monitored 1990–2010 throughout Norway by multivariate generalized linear models and geostatistics. *Atmos Environ* 99: 85–93.
- NICKEL S, SCHRÖDER W (2017) Bestimmung von Schwermetalleinträgen in Waldgebiete mit Modellierung und Moosmonitoring. *Schweiz Z Forstwes* 168: 92–99. doi: 10.3188/szf.2017.0092
- R CORE TEAM (2013) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- SACHS L, HEDDERICH J (2009) Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Berlin: Springer, 13 ed. 813 p.
- SCHAAP M, SAUTER F, TIMMERMANS R M A, ROEMER M, VELDERS G ET AL (2008) The LOTOS-EUROS model: description, validation and latest developments. *Int J Environ Pollut* 32: 270–290.
- SCHRÖDER W, HOLY M, PESCH R, ZECHMEISTER G H, HARMENS H ET AL (2011) Mapping atmospheric depositions of cadmium and lead in Germany based on EMEP deposition data and the European Moss Survey 2005. *Environ Sci Eur* 23: 1–9.
- SCHRÖDER W, PESCH R, HARMENS H, FAGERLI H, ILYIN I (2012) Does spatial auto-correlation call for a revision of latest heavy metal and nitrogen deposition maps? *Environ Sci Eur* 24: 1–15.
- SCHRÖDER W, PESCH R (2013) Hypothesenprüfung in der Landschaftsökologie. In: Schröder W, Fränzle O, Müller F, editors. *Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung*. Weinheim: Wiley. pp. 1–10.
- TØRSETH K, AAS W, BREIVIK K, FJAERAA A M, FIEBIG M ET AL (2012) Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009. *Atmos Chem Phys* 12: 5447–5481.
- TRAVNIKOV O, ILYIN I (2005) Regional model MSCE-HM of heavy metal transboundary air pollution in Europe. Moscow: Meteorological Synthesizing Centre, East, EMEP/MSCE-Technical report 6/2005. 59 p.

TRAVNIKOV O, ILYIN I, ROZOVSKAYA O, VARYGINA M, AAS W ET AL (2012) Long-term changes of heavy metal transboundary pollution of the environment (1990–2010). EMEP contribution to the revision of the Heavy Metal Protocol. Moscow: Meteorological Synthesizing Centre, East, EMEP Status Report 2/2012. 63 p.

TURNER MG (1990) Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landsc Ecol* 4: 21–30.

UBA (2008) Umweltprobenbank des Bundes – Konzeption (Stand: Oktober 2008). Berlin: Umweltbundesamt. 27 p.

Apports métalliques dans l'écosystème terrestre: analyse de données issues de modélisations et de biosurveillance

Les modélisations et mesures de dépôts avec des collecteurs techniques et des indicateurs biologiques d'accumulation servent en Allemagne à différencier spatialement les informations qui sont relevées pour toute l'Europe. Une analyse intégrative et comparative manque toutefois. Pour cette raison, les résultats de deux modèles de transports chimiques pour le calcul de dépôts de métaux lourds (LOTOS-EUROS, EMEP) en Allemagne sont comparés dans le présent article aux concentrations en métaux lourds dans les feuilles, aiguilles et horizon superficiel des sols de l'inventaire forestier intensif, ICP Forests Level II, et de la banque d'échantillons de l'environnement (Umweltprobenbank, UPB). Les valeurs pour les aiguilles et feuilles des années 2007–2011 de l'UPB démontrent une relation statistique évidente avec les modélisations. Les corrélations se sont révélées spécifiques pour les échantillons et, en plus, pour la teneur en Cd pour des pousses annuelles d'épicéa spécifiques pour l'écosystème. Les corrélations pour les données UPB étaient généralement plus fortes avec les modélisations LOTOS-EUROS qu'avec celles d'EMEP. Les différences ne sont toutefois pas statistiquement significatives. Les teneurs accumulées d'éléments d'ICP Forests Level II montrent généralement de plus fortes corrélations avec les modélisations EMEP. En comparaison avec l'UPB, les corrélations avec les données Level II sont généralement plus faibles. ICP Forests Level II a l'avantage de livrer des données pour des échantillons d'aiguilles de différentes classes d'âge. De fortes corrélations spécifiques aux classes d'âge ont été obtenues entre les dépôts de Pb modélisés par LOTOS-EUROS et les aiguilles âgées de 2 ans de pin et d'épicéa. L'ICP Forests Level II a été utilisé, outre pour les analyses des aiguilles et des feuilles, pour examiner la teneur en métaux lourds de la couche d'humus. Corrélations significatives ont été trouvées pour Cd entre les dépôts totaux modélisés et les concentrations dans les horizons OH ainsi que pour Pb entre les dépôts totaux modélisés et les concentrations dans les horizons OH et OL. Grâce à l'intégration des réseaux de biosurveillance (ICP Forests Level II, UPB et du suivi des mousses), les interprétations spatiales des données pourront être renforcées.

Metal deposition into terrestrial ecosystems: evaluating data from modelling and biomonitoring

In Germany, atmospheric deposition of heavy metals derived by modelling and measurements using biological and technical samplers are used to spatially differentiate respective European data. However, a comparative analysis is still missing. Therefore, this article compares results from deposition modelling derived by LOTOS-EUROS and EMEP with data on heavy metals concentrations in leaves, needles and organic surface soil collected by intensive forest monitoring (ICP Forests Level II) and the Environmental Specimen Bank (ESB). The concentrations in leaves and needles collected during the years 2007–2011 for the specimen bank revealed clear correlations with the modelled values. They were specific for the matrices sampled and, in case of Cd concentrations in one year old spruce needles, for ecosystem types. Thereby, the correlations with LOTOS-EUROS were stronger than those with EMEP. Yet, these differences could not be proved to be significant. Most data retrieved from ICP Forests Level II monitoring showed stronger correlations with EMEP. They are lower than those calculated from specimen bank data. The advantage of ICP Forests Level II data is that it yields concentrations for different age groups of needles. Rather high correlations were found especially between LOTOS-EUROS results and Pb concentrations in two year old needles collected from pine and spruce. Additionally to leaves and needles, Forests Level II data were used to analyze heavy metal concentrations in organic soil layers. Significant correlations were computed for Cd between the modelled total deposition and respective concentrations in OH soil layers and for Pb between modelled total deposition and OL and OH soil layers. The different biomonitoring networks should be connected more tightly to enhance the spatial significance of their common data.