TEXTE
106/2021

Aktualisierte statistische Evaluierung räumlicher Muster der Gehalte an Blei, Cadmium und Quecksilber in Moosen in Verbindung zur atmosphärischen Belastung

von:

Prof. Dr. Winfried Schröder, Dr.-Ing. Stefan Nickel
Planwerk – Büro für ökologische Fachplanungen, Nidda

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 106/2021

Projektnummer 146520

FB000566

Aktualisierte statistische Evaluierung räumlicher Muster der Gehalte an Blei, Cadmium und Quecksilber in Moosen in Verbindung zur atmosphärischen Belastung

von

Prof. Dr. Winfried Schröder, Dr.-Ing. Stefan Nickel
Planwerk – Büro für ökologische Fachplanungen, Nidda

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Planwerk – Büro für ökologische Fachplanungen
Unterdorfstraße 3
63667 Nidda

Abschlussdatum:
Mai 2021

Redaktion:
Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Gudrun Schütze

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Aktualisierte statistische Evaluierung räumlicher Muster der Gehalte an Blei, Cadmium und Quecksilber in Moosen in Verbindung zur atmosphärischen Belastung

Ergebnisse aktueller Modellierungen der atmosphärischen Konzentration und Deposition der Metallelemente Cd, Hg und Pb unter der Genfer Luftreinhaltekonvention werden mit den Ergebnissen aus technischen Messungen und aus der Bioindikation mit Moosen verglichen. Diese Modellierungsergebnisse mit Stand 2020 haben mit 0,1° x 0,1° eine höhere räumliche Auflösung als die bis dahin gültigen Modellierungsergebnisse (50 km x 50 km). Dies ist teilweise mit leicht höheren Korrelationen zwischen den Befunden der Modellierung und denen des Moosmonitorings verknüpft. In dieser Studie werden deskriptiv- und korrelationsstatistische Kennwerte ermittelt und Ergebnisse und daraus abzuleitende Empfehlungen zusammenfassend skizziert. Eine statistisch angemessen vertiefte Analyse und Bewertung der hoch aufgelösten Modellierungsergebnisse bedürfen gegenüber der hier durchgeführten Analyse der Anwendung eines breiteren Methodeninventars. Besonders wichtig ist es dafür zudem, die Expositionsdaten der Modellierung (Konzentrationen, Depositionen), der technischen Messungen und der Befunde aus dem Moosmonitoring mit Informationen über die Rezeptoren, die Ökosystemtypen, zu verknüpfen. Nur so lässt sich erreichen, dass die Ergebnisse des vorliegenden Projekts dazu beitragen, die Belastung der Ökosysteme durch atmosphärische Schwermetalleinträge differenzierter als bisher einzuschätzen und so eine gezielte Weiterentwicklung der Risikobewertungen für Deutschland zu ermöglichen.

Abstract: Updated statistical evaluation of spatial patterns of lead, cadmium and mercury content in mosses linked to atmospheric pollution

Results of current modelling of atmospheric concentration and deposition of the metal elements Cd, Hg and Pb are compared with the results of technical measurements and bioindication with mosses. These modelling results with status 2020 have a higher spatial resolution of 0.1° x 0.1° than the modelling results valid up to then (50 km x 50 km). This leads to partly slightly higher correlations between the findings of the modelling and those of the moss monitoring. In this study, descriptive and correlation-statistical parameters are calculated, results and recommendations drawn described. A statistically adequately deepened analysis and evaluation of the high-resolution modelling results requires additional methodological tools, which are outlined in summary. It is particularly important to link the exposure data from modelling, technical measurements and the findings from moss monitoring with information on the receptors, the ecosystem types. This is the only way to ensure that the results of the present project contribute to a more differentiated assessment of the impacts on ecosystems from atmospheric heavy metal inputs than has been the case to date, thus enabling a targeted further development of risk assessments for Germany.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 10

Abkürzungsverzeichnis 14

Zusammenfassung 15

Summary 22

1 Hintergrund und Ziel 29

2 Material und Methoden 32

3 Ergebnisse 38

4 Schlussfolgerungen 50

5 Quellenverzeichnis 53

A Anhang: Deskriptive Statistik 58

A.1 Messdaten zu Schwermetallkonzentrationen in Moosen 58

A.2 Modellierte mittlere Schwermetallkonzentrationen in der Atmosphäre 60

A.3 Modellierte atmosphärische Jahres-Gesamtdepositionen von Schwermetallen 62

A.4 Technische Messdaten zu atmosphärischen Schwermetallkonzentrationen 65

A.5 Technische Messdaten zu atmosphärischen Schwermetalldepositionen 66

B Anhang: Korrelationsanalyse 68

B.1 Korrelationen zwischen modellierten mittleren Konzentrationen von Schwermetallen in der Atmosphäre (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM2015) 68

B.2 Korrelationen zwischen modellierten atmosphärischen Schwermetalldepositionen (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM 2015) 70

B.3 Korrelationen zwischen Mittelwerten der Konzentration aus technischen Messungen von Schwermetallen in der Atmosphäre und Konzentrationen in Moosen 84

B.4 Korrelationen zwischen technischen Messungen der atmosphärischen Schwermetalldeposition und Konzentrationen in Moosen 85

B.5 Graphischer Vergleich der Korrelationskoeffizienten 87

B.6 Signifikanzanalyse der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten 97

C Vergleich des Luftgütemessnetzes des Bundes und der Länder mit dem Messnetz des Moos-Monitorings 2015 105

D Kartenanhang 105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung A1.1: Verteilungen zweier Modellierungen und technisch gemessener atmo-sphärischer Konzentrationen von Cd, Hg und Pb (linke Skalen) sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in Moosen in Deutschland (rechte Skalen)..... 59
Abbildung A.1.2: Verteilungen zweier Modellierungen und technisch gemessener atmosphärischer Depositionen von Cd, Hg und Pb (linke Skalen) sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in Moosen in Deutschland (rechte Skalen)..... 59
Abbildung B.5.1: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1° 87
Abbildung B.5.2: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1° 87
Abbildung B.5.3: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 88
Abbildung B.5.4: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 88
Abbildung B.5.5: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 89
Abbildung B.5.6: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 89
Abbildung B.5.7: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 90
Abbildung B.5.8: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°..... 90
Abbildung B.5.9: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen (EMEP 0,1° x 0,1°) und

Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen 91
Abbildung B.5.10: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen 91
Abbildung B.5.11: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen 92
Abbildung B.5.12: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen 92
Abbildung B.5.13: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen 93
Abbildung B.5.14: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen 93
Abbildung B.5.15: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen 94
Abbildung B.5.16: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen 94
Abbildung B.5.17: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (alle Standorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen 95
Abbildung B.5.18: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (alle Standorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen 95
Abbildung B.5.19: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (Waldstandorte) - Vergleich der

nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen 96
Abbildung B.5.20: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (Waldstandorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen 96
Abbildung D.1: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 106
Abbildung D.2: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 107
Abbildung D.3: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 108
Abbildung D.4: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 109
Abbildung D.5: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 110
Abbildung D.6: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 111
Abbildung D.7: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 112
Abbildung D.8: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 113
Abbildung D.9: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) 114

Abbildung D.10: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer Bulk-Deposition (Ilyin et al. 2020: ANNEX B) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)..... 115
Abbildung D.11: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Bulk-Deposition (Ilyin et al. 2020: ANNEX B) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)..... 116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Datengrundlagen und Methoden 32
Tabelle A.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte der Konzentration von Pb, Cd und Hg in Moosen des MM 2015 (Messdaten 2016 und geostatistische Flächenschätzungen)..... 58
Tabelle A.2.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (EMEP 50 km x 50 km, 2013-2015)..... 60
Tabelle A2.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (EMEP 0,1° x 0,1°, 2014-2016)..... 61
Tabelle A.3.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg (EMEP (50 km x 50 km, 2013-2015)..... 62
Tabelle A.3.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg (EMEP 0,1° x 0,1°, 2014-2016)..... 64
Tabelle A.4: Deskriptiv-statistische Kennwerte der Mittelwerte der Konzentrationen aus technischen Messungen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (2014-2016, bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten)..... 65
Tabelle A.5.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur nassen Deposition von Cd, Hg und Pb (2014-2016, bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten)..... 66
Tabelle A.5.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur Bulk-Deposition von Cd und Pb (2014-2016, aus Ilyin et al. 2020: Tabellen B1-B6 übernommene Daten)..... 67
Tabelle B.1.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015)..... 68

Tabelle B.1.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) 69
Tabelle B.2.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) 70
Tabelle B.2.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) 71
Tabelle B.2.3: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (aus CLC abgeleitete Landnutzung)..... 72
Tabelle B.2.4: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 73
Tabelle B.2.5: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)..... 74
Tabelle B.2.6: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 75
Tabelle B.2.7: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)..... 76
Tabelle B.2.8: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 77

Tabelle B.2.9: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)..... 78
Tabelle B.2.10: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 79
Tabelle B.2.11: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) 80
Tabelle B.2.12: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 81
Tabelle B.2.13: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)..... 82
Tabelle B.2.14: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)..... 83
Tabelle B.4.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für technische Messungen der nassen atmosphärischen Deposition von Pb, Cd und Hg (bei llyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) 85
Tabelle B.4.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für technische Messungen der atmosphärischen Bulk-Deposition von Pb, Cd und Hg (aus llyin et al. 2020: Tabellen B1-B6 übernommene Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) 86
Tabelle B.6.1: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP vs. MM2015: Messdaten und Flächenschätzungen) - Vergleich der Korrelationen bei Verwendung der Auflösungen

0,1° x 0,1° und 50 km x 50 km der modellierten Konzentration und Deposition 97
Tabelle B.6.2: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zu den Messdaten und den geostatistischen Flächenschätzungen der Schwermetallkonzentrationen in Moosen..... 99
Tabelle B.6.3: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur atmosphärischen Schwermetallkonzentration und zur Schwermetalldeposition 100
Tabelle B.6.4: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur nutzungsspezifisch modellierten und zur flächengewichtet berechneten Schwermetalldeposition (alle Standorte des MM2015)..... 101
Tabelle B.6.5: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur nutzungsspezifisch modellierten und zur flächengewichtet berechneten Schwermetalldeposition (nur Waldstandorte des MM2015)..... 102
Tabelle B.6.6: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen bei Verwendung der Jahreswerte und Jahresspannen der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Deposition 103

Abkürzungsverzeichnis

As	Arsen
Cd	Cadmium
CL	Critical Loads
CLC	Corine Land Cover
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
Cu	Kupfer
EMEP	Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe (inoffiziell 'European Monitoring and Evaluation Programme' = EMEP)
GIS	Geografisches Informationssystem
Hg	Quecksilber
ICP	International Cooperative Programme, die der Working Group on Effects der CLRTAP unterstehen und berichten. Von den sechs bestehenden ICPs werden in diesem Bericht Daten ausgewertet, die im *ICP Vegetation* (ICP on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops) und im *ICP Forests* (ICP on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) erhoben bzw. berechnet wurden. Verwiesen wird weiterhin auf die Arbeit des *ICP Modelling and Mapping* (ICP on Modelling and Mapping of Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends).
Level II	Das ICP Forests überwacht den Waldzustand auf zwei Monitoring-Intensitätsstufen: Level I und Level II. Das Level II-Intensivmonitoring umfasst in Deutschland gegenwärtig 68 Standorte in ausgewählten Waldökosystemen mit dem Ziel, Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu klären.
MM2015	Moosmonitoring 2015
MSC-E	Meteorological Synthesizing Centre East des EMEP
N	Stickstoff
Ni	Nickel
Pb	Blei
V	Vanadium
Zn	Zink
Min	Minimum
P20	20. Perzentil
P50	50. Perzentil
P90	90. Perzentil
P98	98. Perzentil
Max	Maximum
MW	Arithmetisches Mittel
SD	Standardabweichung
VT	Verteilung; VT [1] = Normalverteilung; VT [2] = Lognormalverteilung; VT [3] = andere Verteilung

Zusammenfassung

Aktualisierte statistische Evaluierung räumlicher Muster der Gehalte an Blei, Cadmium und Quecksilber in Moosen in Verbindung zur atmosphärischen Belastung

1 Ziel

Mit den von Ilyin et al. (2020) vorgelegten Daten zur atmosphärischen Belastung mit Pb, Cd, Hg, die auf aktualisierten Emissionsdaten (Stand 2018) beruhen und mit einer räumlichen Auflösung von 1° x 1° gegenüber den bisherigen Daten mit einer Auflösung von 50 km x 50 km räumlich deutlich differenzierter sind, sollen die deskriptiv- und korrelationsstatistischen Analysen von Schröder et al. (2019 b) aktualisiert und ergänzt werden. Es soll geprüft werden, ob die Datengrundlagen gemessener Schwermetallkonzentrationen und -depositionen für eine vertiefte statistische Auswertung gemeinsam mit den Daten des Moosmonitorings hinsichtlich räumlicher Korrelationen ausreichen. Dafür soll ein geeignetes methodisches Konzept erarbeitet werden (zur Umsetzung in einem gesonderten Gutachten). Die Ergebnisse des Projekts sollen dazu beitragen, die Belastung der Ökosysteme durch atmosphärische Schwermetalleinträge differenzierter als bisher einzuschätzen als Voraussetzung für eine gezielte Weiterentwicklung der Risikobewertungen für Deutschland. Die Ergebnisse sollen auch dem ICP Vegetation zur Verfügung gestellt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Daten

Gegenstand der Untersuchung waren die nachfolgend zusammengestellten Daten. Diese umfassen quantitative Ergebnisse der Erfassung der atmosphärischen Belastung durch technische Messungen, durch Biomonitoring – hier mit Moosen – und durch Modellierung mit einem chemischen Transportmodell (Global EMEP Multi-media Modeling System, GLEMOS, Version v2.0).

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / des Anhangs genannt)
Modellierte Daten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition						
01 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	ng m^{-3}	●	●	●		Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.1, B.5, B.6)
02 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	µg m^{-2} a^{-1}	●	●	●		Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.2, B.5, B.6)
03 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A)

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / des Anhangs genannt)
						Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.1, B.5, B.6)
04 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.2, B.5, B.6)
05 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten, nach Landnutzungsart gruppiert (B.2, B.5, B.6)
Technische Messdaten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition						
06 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb [2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.3, B.5, B.6) Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
07 Nasse Deposition von Cd, Hg, Pb [2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.4, B.5, B.6) Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
08 Bulk-Deposition von Cd, Hg, Pb [3)]			●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.4, B.5, B.6)

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / des Anhangs genannt)
						Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
09 Bulk-Deposition von Cd, Pb (3 zusätzliche ICP Forests Level II-Standorte und 1 hessischer Standort, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt)	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C)
Bioindikationsdaten						
10 Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, Beprobungsjahr 2016)[4)]	µg/g				●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit modellierten Daten zur atmosphärischen Konzentration (B.1, B.5, B.6) und Deposition (B.2, B.5, B.6) sowie mit technischen Messdaten zur Konzentration (B.3, B.5, B.6) und Deposition (B.4, B.5, B.6) Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C)
11 Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, geostatistische Flächenschätzungen, 3 km x 3 km)	µg/g				●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit modellierten Daten zur atmosphärischen Konzentration (B.1, B.5, B.6) und Deposition (B.2, B.5, B.6) sowie mit technischen Messdaten zur Konzentration (B.3, B.5, B.6) und Deposition (B.4, B.5, B.6) Kartographischer Vergleich mit technischen Messdaten (D)

[1)] http://en.msceast.org/index.php/pollution-assessment/emep-domain-menu/data-hm-pop-menu (27.04.2018)

[2)] Datenlieferung MSC-East vom 24.09.2020 (davon Datensätze 06, 07 = in Ilyin et al. (2020) für die Modellvalidierung verwendete Daten aus Messnetzen des Bundes und der Länder)

[3)] aus Ilyin et al. (2020: ANNEX B) entnommene Werte (= Daten aus Messnetzen der Bundesländer)

[4)] http://www.mapserver.uni-vechta.de/mossEU/login.php (29.09.2020)

Die Daten wurden in mehreren Schritten für die deskriptiv- und korrelationsstatistischen Analysen in einem geografischen Informationssystem (GIS) vorbereitet.

2.2 Methoden

Die Datenauswertung erfolgte mit folgenden Methoden:

1. Deskriptive Statistik,
2. Korrelationsanalyse (Pearson, Spearman),
3. Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge,
4. Kartierung räumlicher Verteilungen der Abweichungen modellierter atmosphärischer Metall-Konzentration und -Deposition (EMEP) sowie der Konzentration in Moosen (MM2015) vom jeweiligen bundesweiten Median.

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

Sämtliche Daten sind nicht normalverteilt. Einige Daten sind lognormal verteilt, weitere weisen andere Verteilungen auf. Dies ist bei der Wahl statistischer Kenngrößen wie z.B. die für eine Folgeuntersuchung empfohlene Bestimmung der Mindestprobenzahl zu beachten. Das entsprechend geeignete Korrelationsmaß ist die Rangkorrelation nach Spearman.

3.2 Korrelationsanalyse

Da auch für nicht normalverteilte Daten häufig der Produktmomentkorrelationskoeffizient nach Pearson berechnet wird, wird dieser zusätzlich zu dem der Datenverteilung angemessenen Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman bestimmt und wie folgt kategorisiert: Korrelationen zwischen r = 0,1 und r = 0,3 werden als gering / schwach, zwischen r = 0,3 und r = 0,5 als mittel / moderat und ab r = 0,5 als groß / stark eingestuft (Cohen 1988). Die Berechnungen ergaben für zwei der 19 Modelle keine Zusammenhänge, für acht schwache Korrelationen, für fünf Modelle geringe und mittlere Korrelationen, für ein Modell mittelstarke Zusammenhänge und für ein weiteres schwache, mittlere und starke Korrelationen, für zwei moderate und starke Korrelationen:

Keine Korrelation ließ sich nachweisen für

5. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung) sowie für
6. technische Messungen der nassen atmosphärischen Deposition von Pb, Cd und Hg und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Gering sind die Korrelationen für

7. modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015),
8. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015),

9. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (aus CLC abgeleitete Landnutzung),
10. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (im MM2015 erhobene Landnutzung),
11. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung),
12. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung),
13. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
14. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung).

Gering und mittel sind Korrelationen für

15. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km),
16. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung),
17. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung),
18. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
19. Mittelwerte der Konzentrationen aus technischen Messungen von Pb und Cd und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Schwach, moderat und stark sind Korrelationen für

20. modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Mittel sind die Korrelationen für

21. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung).

Moderat und stark sind Korrelationen für

22. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
23. technische Messungen der atmosphärischen Bulk-Deposition von Pb, Cd und Hg und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

3.3 Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge

Die Distanzanalyse zeigt, dass die Messpunkte der empirischen Datensätze 06-10 (**Tabelle**) zwar nicht deckungsgleich sind. Doch sie weisen eine räumliche Distanz unter 5 km auf. Diese liegt innerhalb der Autokorrelationsreichweite der mit Moosen indizierten Stoffeinträge (Schröder et al. 2019 b). Dies legt nahe, dass die Daten räumlich disparater Messnetze wie in dieser Untersuchung sinnvoll miteinander in statistische Beziehung gesetzt werden können.

3.4 Kartierung räumlicher Verteilungen der Abweichungen modellierter atmosphärischer Metall-Konzentration und -Deposition (EMEP) sowie der Konzentration in Moosen (MM2015) vom jeweiligen bundesweiten Median

Die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd- und Pb-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Gesamtdeposition EMEP (0,1° x 0,1°) (Datensätze 03, 04 in der **Tabelle**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in der **Tabelle**) sind räumlich sehr ähnlich strukturiert. Hingegen trifft dies für Hg nicht zu.

Die räumliche Verteilung der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Datensatz 06 in der **Tabelle**) (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in der **Tabelle**) zeigt, dass für Hg eine seriöse Beurteilung auf Grund der geringen Messpunktdichte nicht möglich ist. Diese ist bei Cd deutlich höher und ermöglichen die Feststellung, dass das Muster der Abweichungen der Ergebnisse aus technischen Messungen vom jeweiligen Median demjenigen des aus den Moosdaten erzeugten Musters nicht besonders ähnlich ist. Für Pb zeigt sich bei ausreichend erscheinender Messpunktdichte - außer in Brandenburg und Schleswig-Holstein - eine gewisse Übereinstimmung der Abweichungsmuster.

Die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median technisch gemessener nasser Deposition (Datensatz 07 in der **Tabelle**) (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in der **Tabelle**) zeigt, dass für Cd ein Vergleich der Abweichungsmuster dadurch erschwert ist, als für die technisch gemessene nasse Cd-Deposition (Datensatz 07 in der **Tabelle**) nur wenige und das Gebiet Deutschlands schlecht abdeckende Stationen zur Verfügung stehen. Diese zeigen ein deutlich anderes Abweichungsmuster als die Moosdaten. Dasselbe gilt für Hg und Pb (Datensatz 07 in der Tabelle) sowie für die technisch erfasste Bulk-Deposition von Cd und Pb (Datensatz 08 in der **Tabelle**).

4 Schlussfolgerungen

Die Studie deckt nur einen kleinen Teil der erforderlichen Analysen ab. Ergänzende Analysen vorhandener Daten werden skizziert. Zudem werden Modellierungen mit LOTOS-EUROS und dem Global EMEP Multi-media Modeling System auf Grundlage identischer Daten zu Emissionen und Meteorologie angeregt. Deren Ergebnisse sollten mit empirischen Daten aus Depositionsmessnetzen

(EMEP, Bund, Länder) und aus dem Moos-Monitoring validiert werden. Diese Expositionsdaten wären dann mit der sehr differenzierten Waldökosystemtypenklassifikation räumlich zu verknüpfen und zu einer Erweiterung ihrer bisherigen Zustandsbewertung zu nutzen.

Summary

Updated statistical evaluation of spatial patterns of lead, cadmium and mercury content in mosses linked to atmospheric pollution

1 Objective

The objective of this study is to update and complement the descriptive and correlation statistical analyses of Schröder et al. (2019 b) with the data on atmospheric exposure to Pb, Cd, Hg presented by Ilyin et al. (2020), which are based on updated emission data (as of 2018) and are spatially much more differentiated with a spatial resolution of 1° x 1° compared to the previous data with a resolution of 50 km x 50 km. It will be examined whether the data basis of measured heavy metal concentrations and depositions is sufficient for an in-depth statistical evaluation together with the moss monitoring data with respect to spatial correlations. A suitable methodological concept is to be developed for this purpose (for implementation in a separate report). The results of the project should contribute to a more differentiated assessment of the burden on ecosystems from atmospheric heavy metal inputs than has been possible up to now as a prerequisite for the targeted further development of risk assessments for Germany. The results will also be made available to the ICP Vegetation.

2 Material and Methods

2.1 Data

The subject of the study was the data compiled below. These include quantitative results of the recording of atmospheric pollution by technical measurements, by biomonitoring - here with mosses - and by modeling with a chemical transport model (Global EMEP Multi-media Modeling System, GLEMOS, version v2.0).

Data sets	Unit	2013	2014	2015	2016	Aim / Method (the relevant sections of the text / supplement are given in brackets)
Modelled atmospheric concentration and deposition data						
01 Mean concentration of Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	ng m^{-3}	●	●	●		Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with bioindication data (B.1, B.5, B.6)
02 Total annual deposition of Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	µg m^{-2} a-1	●	●	●		Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with bioindication data (B.2, B.5, B.6)
03 Mean concentration of Cd, Hg, Pb (EMEP 0.1° x 0.1°)[2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Descriptive statistics (A)

Data sets	Unit	2013	2014	2015	2016	Aim / Method (the relevant sections of the text / supplement are given in brackets)
						Correlation analytical comparison with bioindication data (B.1, B.5, B.6)
04 Total annual deposition of Cd, Hg, Pb (EMEP 0.1° x 0.1°)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with bioindication data (B.2, B.5, B.6)
05 Total annual deposition of Cd, Hg, Pb (EMEP 0.1° x 0.1°, use-specific)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Correlation analytical comparison with bioindication data grouped by land use type (B.2, B.5, B.6)
Technical measurement data on atmospheric concentration and deposition						
06 Mean concentration of Cd, Hg, Pb [2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with bioindication data (B.3, B.5, B.6) Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric depositions (C) Cartographic comparison with bioindication data (D)
07 Wet deposition of Cd, Hg, Pb [2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with bioindication data (B.4, B.5, B.6) Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric depositions (C) Cartographic comparison with bioindication data (D)
08 Bulk deposition of Cd, Hg, Pb [3)]			●	●	●	Descriptive statistics (A)

Data sets	Unit	2013	2014	2015	2016	Aim / Method (the relevant sections of the text / supplement are given in brackets)
						Correlation analytical comparison with bioindication data (B.4, B.5, B.6) Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric depositions (C) Cartographic comparison with bioindication data (D)
09 Bulk deposition of Cd, Pb (3 sites of the ICP Level II and 1 Hessian site, Northwest German Forest Research Institute)	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric depositions (C)
Bioindication data						
10 Concentrations of Cd, Hg, Pb in mosses (Moss Monitoring 2015, sampling year 2016)[4)]	µg/g				●	Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with modelled data on atmospheric concentration (B.1, B.5, B.6) and deposition (B.2, B.5, B.6) as well as with technical measured data on concentration (B.3, B.5, B.6) and deposition (B.4, B.5, B.6) Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric depositions (C)
11 Concentrations of Cd, Hg, Pb in mosses (Moss Monitoring 2015, geostatistical area estimates, 3 km x 3 km).	µg/g				●	Descriptive statistics (A) Correlation analytical comparison with modelled data on atmospheric concentration (B.1, B.5, B.6) and deposition (B.2, B.5, B.6) as well as with technical measured data on concentration (B.3, B.5, B.6) and deposition (B.4, B.5, B.6)

Data sets	Unit	2013	2014	2015	2016	Aim / Method (the relevant sections of the text / supplement are given in brackets)
						Cartographic comparison with technical measurement data (D)

[1)] http://en.msceast.org/index.php/pollution-assessment/emep-domain-menu/data-hm-pop-menu (27.04.2018)
[2)] Data delivery MSC-East of 24.09.2020 (data sets 06, 07 = data from measurement networks of UBA and the federal states used in Ilyin et al. (2020) for model validation).
[3)] Values taken from Ilyin et al. (2020: ANNEX B, = data from measurement networks of the federal states).
[4)] http://www.mapserver.uni-vechta.de/mossEU/login.php (29.09.2020)

The data was prepared in several steps for descriptive and correlation statistical analyses in a geographic information system (GIS).

2.2 Methods

The data evaluation was carried out using the following methods:

1. Methods of descriptive statistics,
2. Correlation analysis (Pearson, Spearman),
3. Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric deposition,
4. Mapping of spatial distributions of the deviations of modelled atmospheric metal concentrations concentration and deposition (EMEP) and the concentration in mosses (MM2015) from respective nationwide median.

3 Results

3.1 Descriptive statistics

All data are not normally distributed. Some data are log-normally distributed, others have different distributions. This should be considered when choosing statistical parameters such as the recommended minimum sample size for a follow-up study. The correspondingly suitable correlation measure is the rank correlation according to Spearman.

3.2 Correlation analysis

Since the product moment correlation coefficient according to Pearson is often calculated even for non-normally distributed data, this is determined in addition to the Spearman rank correlation coefficient appropriate to the data distribution and is categorised as follows Correlations between r = 0.1 and r = 0.3 are classified as low / weak, between r = 0.3 and r = 0.5 as medium / moderate and from r = 0.5 on as high / strong (Cohen 1988). The calculations showed no correlations for two of the 19 models, weak correlations for eight, low and medium correlations for five models, medium-strong correlations for one model and weak, medium and strong correlations for another, moderate and strong correlations for two:

No correlation could be detected for

1. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at open land sites (land use surveyed in MM2015) as well as for
2. technical measurements of wet atmospheric deposition of Pb, Cd and Hg and geostatistical area estimates of concentrations in mosses (MM 2015, 3 km x 3 km).

Low correlations were found for

3. modelled mean concentrations of Cd, Hg and Pb in the atmosphere (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015),
4. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015),
5. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) in all land use types (CLC-derived land use),
6. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) in all land use types (land use surveyed in MM2015),
7. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at coniferous forest sites (land use derived from CLC),
8. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at mixed forest sites (land use surveyed in MM2015).,
9. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at forest sites (land use derived from CLC) and for
10. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at forest sites (land use surveyed in MM2015).

Low and medium correlations were found for

11. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg and Pb (EMEP) and geostatistical area estimates of concentrations in mosses (MM 2015, 3 km x 3 km),
12. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at coniferous forest sites (land use surveyed in MM2015),
13. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at mixed forest sites (land use derived from CLC),
14. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at deciduous forest sites (land use derived from CLC) and for
15. mean concentrations from technical measurements of Pb, Cd and Hg and geostatistical area estimates of concentration in mosses (MM 2015, 3 km x 3 km).

Weak, moderate and strong correlations were computed for

16. 16. modelled mean concentrations of Cd, Hg and Pb in the atmosphere (EMEP) and geostatistical area estimates of concentration in mosses (MM 2015, 3 km x 3 km).

Moderate correlations were detected for

17. modelled total annual atmospheric depositions of Cd, Hg, and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at deciduous forest sites (land use surveyed in MM2015).

Moderate and strong correlations were found for

18. modelled total annual atmospheric depositions of Cd and Pb (EMEP) and measured concentrations in mosses (MM 2015) at open land sites (land use derived from CLC) as well as for
19. technical measurements of bulk atmospheric deposition of Pb and Cd and geostatistical area estimates of concentration in mosses (MM 2015, 3 km x 3 km).

3.3 Analysis of the distances between measuring points of the technical and biological monitoring of atmospheric deposition

The distance analysis shows that the measuring points of the empirical data (data sets 6 - 10 in the **Table**) are not congruent. But they show a spatial distance of less than 5 km. This lies within the autocorrelation range of the concentrations in moss (Schröder et al. 2019 b). This suggests that the data from spatially disparate monitoring networks such as those used in this study can be meaningfully correlated statistically.

3.4 Mapping of spatial distributions of the deviations of modelled atmospheric metal concentrations and deposition (EMEP) and the concentration in mosses (MM2015) from respective nationwide median

The spatial distributions of deviations from the nationwide Cd and Pb median of modeled atmospheric concentration and total deposition EMEP (0.1° x 0.1°) (datasets 03, 04 in the **Table**) and geostatistically estimated concentrations in mosses (MM2015) (dataset 11 in the **Table**) have a very similar spatial structure. In contrast, this is not true for Hg.

The spatial distribution of deviations from the nationwide Cd, Hg and Pb median of technically measured atmospheric concentrations (dataset 06 in the **Table**) (Ilyin et al. 2020) and geostatistically estimated concentrations in mosses (MM2015) (dataset 11 in the **Table**) shows that for Hg a serious assessment is not possible due to the low measurement point density. This is significantly higher for Cd, allowing the observation that the pattern of deviations of the results from technical measurements from the respective median is not particularly similar to that of the pattern generated from the moss data. For Pb, if the density of measurement points appears to be sufficient, there is some agreement in the pattern of deviations, except in Brandenburg and Schleswig-Holstein.

The spatial distributions of the deviations from the nationwide Cd, Hg, and Pb median of technically measured wet deposition (dataset 07 in the **Table**) (Ilyin et al. 2020) and geostatistically estimated concentrations in mosses (MM2015) (dataset 11 in the **Table**) shows that for Cd a comparison of the deviation patterns is hampered by the fact that for technically measured wet Cd deposition (dataset 07 in the **Table**) only few stations covering the area of Germany poorly are available. These show a clearly different deviation pattern than the moss data. The same is true for Hg and Pb (data set 07 in the **Table**) and for the technically measured bulk deposition of Cd and Pb (data set 08 in the **Table**).

4 Conclusions

The study covers only a small part of the required analyses. Supplementary analyses of existing data are outlined. In addition, modelling with LOTOS-EUROS and the Global EMEP Multi-media Modelling

System based on identical data on emissions and meteorology is suggested. Their results should be validated with empirical data from deposition monitoring networks (EMEP, federal government, Länder) and from moss monitoring. These exposure data would then be spatially linked with the very differentiated forest ecosystem type classification and used to expand their previous status assessment.

1 Hintergrund und Ziel

Hintergrund

Schwermetalle und ihre Verbindungen können sich schädlich auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme auswirken (Schröder et al. 2018 b). Deshalb sind sie Gegenstand nationaler und internationaler Regelungen wie z.B. der Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP). Dafür erhebt das Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe (inoffiziell 'European Monitoring and Evaluation Programme' = EMEP) Daten über die atmosphärische Deposition von z.B. Pb, Cd, Hg durch technische Messungen (Amodio et al. 2014; Hansen et al. 2013) oder durch Modellierung mit chemischen Transportmodellen (Jacob 1999; Jacobson 2005;). Das ICP Vegetation erhebt im Abstand von fünf Jahren Konzentrationen u.a. von Schwermetallen in Moosen als Bioindikation atmosphärischer Belastungen (Frahm 1998; Rühling 1994; Schröder et al. 2017, 2019 b; Steinnes 1997). Diese drei Verfahrensansätze sind zueinander komplementär und weisen jeweils spezifische Vor- und Nachteile auf. Bestehende Unsicherheiten in den Emissionsdaten (Emissionshöhe, Vollständigkeit) bilden gegenwärtig den Hauptgrund dafür, dass atmosphärische Schwermetalldepositionen nicht mit hinreichender Genauigkeit modelliert werden können (Engardt et al. 2017; Schröder et al. 2014). Ebenso bedingten geringe Raster-Auflösungen (z.B. 50 km mal 50 km; Tørseth et al. 2012) bisher, dass Abschätzungen des Risikos von Struktur- und Funktionsänderungen in den der Deposition ausgesetzten Rezeptoren (Pflanzen, Tiere, Böden, Gewässer, Ökosysteme) oder Überschreitungen kritischer Wirkschwellen (Critical Loads – CL; ICP Modeling & Mapping 2004-2013, Nagel & Gregor 1999) mit Unsicherheiten behaftet waren. Komplementär hierzu liefert das Biomonitoring mit poikilohydren (wechselfeuchten) Moosen, welche sich in ihrem Wassergehalt dem Feuchtezustand ihrer Umgebung angleichen, ein aus der Anreicherung von Stoffen abgeleitetes, mithin indirektes Maß zur Charakterisierung von Hintergrundbelastungen durch atmosphärische Schwermetall- und Stickstoffdeposition in räumlich dichten Messnetzen (Bealey et al. 2008; Hoodaj et al 2012; Markert et al. 2003; Mohr 2007). Zur Verwirklichung der Ziele der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP) werden die Vorteile der Bioindikation mit Moosen im Europäischen Moosmonitoring (European Moss Survey des ICP Vegetation) genutzt, um empirische Nachweise für den grenzüberschreitenden Ferntransport von Luftschadstoffen in Europa zu erbringen, räumliche Muster und zeitliche Trends der atmosphärischen Stoffdeposition europaweit zu ermitteln, die Lage und Ausdehnung besonders belasteter Gebiete zu identifizieren sowie bestehende Unsicherheiten in Depositionsmodellierungen und ihre Ursachen (z.B. nicht berücksichtigte Emissionsquellen) aufzuspüren und ggf. zu lokalisieren (ICP Vegetation 2020; Nickel 2019; Nickel & Schröder 2018; Nickel et al. 2018; Schröder & Nickel 2018).

Die komplementäre Nutzung von Daten aus dem Europäischen Moosmonitoring erfolgte in Deutschland bereits für Vergleiche mit verschiedenen chemischen Transportmodellen berechneten Karten der atmosphärischen Deposition (Schröder et al. 2017, 2019 b), so z.B. für Cadmium (Cd)-, Quecksilber (Hg)- und Blei (Pb)-Depositionen (Modell: EMEP/MSC-E, 50 km x 50 km, 2005, 2015, Ilyin et al. 2016), Cd- und Pb-Depositionen (Modell: LOTOS-EUROS (LE), 7 km x 7 km, 2005, Schaap et al. 2018 a), Arsen (As)-, Kupfer (Cu)-, Nickel (Ni)-, Vanadium (V)-, Zink (Zn)-Depositionen (LE, 25 km x 25 km, 2005, Schaap et al. 2017). Inzwischen stehen von EMEP deutlich höher aufgelöste Depositionsdaten für die drei prioritären Schwermetalle Pb, Cd und Hg der CLRTAP zur Verfügung. So beträgt die aktuelle Auflösung des EMEP-Depositionsgitters 0,1° × 0,1°, wobei sowohl gemittelte nutzungsunspezifische als auch nutzungsspezifische Stoffeinträge berechnet wurden.

Geeignete technische Messungen für die Jahre nach 2012 liegen nur von verhältnismäßig wenigen Standorten in Deutschland vor, wobei die Messmethoden der jeweiligen Messnetze des Bundes oder der Länder im Gegensatz zum EMEP-Depositionsmonitoring und zum Moosmonitoring untereinander meistens nicht harmonisiert sind (Ausnahme sind Messungen für die EU-Berichterstattung). Im deutschen Moosmonitoring 2015 / 2016 wurden u.a. Metallkonzentrationen im Moos an 400 Standorten eines systematischen Messnetzes mit harmonisierten Methoden erhoben (Schröder et al. 2019 b). In vergleichende statistische Auswertungen modellierter Depositionsraten mit Konzentrationen in Moosen in dieser Studie gingen modellierte Depositionsdaten (EMEP, CLRTAP) ein, die inzwischen nicht mehr dem Stand des Wissens entsprechen. Deshalb sollen in dem hier beschriebenen Projekt ausgewählte Aspekte der in Schröder et al. (2019 b) durchgeführten statistischen Auswertungen mit den aktuellen Daten zur atmosphärischen Belastung (Ilyin et al. 2020) wiederholt und durch zusätzliche Auswertungen ergänzt werden.

Seit 2018 stehen aktualisierte, regionalisierte Daten der Schwermetallemission in Deutschland zur Verfügung, die an das EMEP-Programm der CLRTAP übermittelt wurden. Diese Daten nutzte das Meteorological Synthesizing Centre East (MSC-E) des EMEP Programms in einer gemeinsamen nationalen Fallstudie mit dem Umweltbundesamt (UBA), um flächendeckende Karten der Konzentrationen der drei Metalle in der Atmosphäre sowie Karten der Gesamtdeposition für die Jahre 2014, 2015, 2016 zu erarbeiten. Letztere liegen sowohl als flächengewichtete Mittel pro EMEP-Grid als auch nutzungsspezifisch vor (Ilyin et al. 2020). Diese Ergebnisse sollen in die statistischen Auswertungen dieses Projekts einbezogen werden. Die aktuellen Messdaten zur Konzentration (in der Atmosphäre) und Deposition von Pb, Cd und Hg an Messstellen des Bundes und der Länder, die in einer Stationsdatenbank des UBA vorliegen, wurden zu Projektbeginn durch das MSC-E bereitgestellt (**Tabelle 1**).

Ziel

Mit diesen neuen, räumlich deutlich differenzierteren Daten zur atmosphärischen Belastung mit Pb, Cd, Hg (Ilyin et al. 2020) sollen die deskriptiv- und korrelationsstatistischen Analysen von Schröder et al. (2019 b) aktualisiert und ergänzt werden. Im Einzelnen soll analysiert werden,

- ob sich die räumliche Korrelation durch die verbesserten Datengrundlagen zur modellierten atmosphärischen Schwermetallbelastung (EMEP, Konzentration/ Deposition) gegenüber der Analyse in Schröder et. al. (2019 a) verbessert haben und
- welche Kennzahlen der atmosphärischen Belastung (Konzentration/ Deposition, welche Jahressummen) die höchste Korrelation mit den Konzentrationen im Moos aufweisen.

Des Weiteren sollen Ergebnisse technischer Messungen zu Metallkonzentrationen in der Atmosphäre sowie zur nassen und bulk-Schwermetalldeposition des Bundes und der Länder mit den Karten der geostatistischen Flächenschätzung der Schwermetallkonzentrationen aus dem Moosmonitoring 2015 räumlich verknüpft und geprüft werden, ob die Datenbasis gemessener Konzentrations- und Depositionswerte für Korrelationsanalysen mit den Konzentrationen im Moos (2015) ausreicht. Es soll ein geeignetes methodisches Konzept erarbeitet werden, um diese Daten zusammen mit Moosdaten hinsichtlich räumlicher Korrelation auszuwerten.

Zusätzlich soll beispielhaft für die Landnutzungsart Wald überprüft werden, ob sich eine höhere Korrelation zwischen modellierter Deposition und Konzentrationen in Moosen ergibt, wenn nur für diese Landnutzungsart ausgewiesene Mess- und Modellwerte verwendet werden.

Kernfragen der Studie sind:

- Wird eine höhere räumliche Korrelation zwischen der Konzentration/ Deposition der Metalle und den Konzentrationen in Moosen erreicht, wenn statt der im alten Projekt verwendeten EMEP Daten (mittlere Gesamtdeposition von Pb, Cd, Hg der Jahre 2013 – 2015 im 50 km x 50 km-Raster) die aktuellen Depositionsdaten (gemeinsame Fallstudie des UBA mit EMEP MSC-E, mittlere Gesamtdeposition der Jahre 2014 – 2016, 0.1°x 0.1° Auflösung) verwendet werden.
- Hilft die Berücksichtigung landnutzungsspezifischer Depositionskarten von EMEP, Unterschiede in den räumlichen Mustern der modellierten Deposition und der Konzentrationen in Moosen zu erklären?
- Wie können die Ergebnisse technischer Messungen von Bund und Ländern in gemeinsame Auswertungen von Moosdaten und modellierten Depositionsdaten einbezogen werden? Welche Methoden werden für räumliche Korrelationsanalysen empfohlen, um die bestmögliche Einschätzung der tatsächlichen Belastung der terrestrischen Ökosysteme zu erreichen?

Die Ergebnisse des Projekts sollen dazu beitragen, die Belastung der Ökosysteme durch atmosphärische Schwermetalleinträge differenzierter als bisher einzuschätzen als Voraussetzung für eine gezielte Weiterentwicklung der Risikobewertungen für Deutschland. Die Ergebnisse sollen auch dem ICP Vegetation zur Verfügung gestellt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Daten

Die in Ilyin et al. (2020) verwendeten Daten umfassen Messwerte zu Luft-Konzentrationen (Cd, Hg, Pb; 2014, 2015, 2016) und nassen Depositionen (Cd, Pb; 2014, 2015, 2016) von den 6 EMEP-Stationen des UBA-Messnetzes und bis zu 196 weiteren Stationen in Deutschland, deren Messwerte dem UBA von den Bundesländern übermittelt wurden. Dazu gehören insbesondere Stationen aus hydrologischen Messnetzen sowie Untersuchungsstandorte des intensiven forstlichen Umweltmonitorings (ICP Forests Level II). Diese Daten wurden am 24.09.2020 von MSC-East für das in diesem Bericht vorgestellte Projekt zur Verfügung gestellt und entsprechenden bei Ilyin et al. (2020) verwendeten technischen Messdaten. Eine konsolidierte Datendokumentation (revidierte Anhänge A.1 und A.2 des Berichts von Ilyin et al. (2020) wurde vom MSC-East am 05.10.2020 zur Verfügung gestellt. In den Anhängen B.1 bis B.6 des Berichts von Ilyin et al. (2020) sind ebenfalls zahlreiche andere Stationen mit Werten zur Bulk Deposition aufgeführt, die bei Ilyin et al. (2020) zur Modellvalidierung zwar nicht verwendet wurden und insofern in den Depositionsdaten von MSC-East nicht enthalten sind, jedoch als separater Datensatz in der folgenden Studie ergänzend ausgewertet wurden.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Datengrundlagen und Methoden

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / Anhangs genannt)
Modellierte Daten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition						
01 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	ng m^{-3}	●	●	●		Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.1, B.5, B.6)
02 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]	µg m^{-2} a^{-1}	●	●	●		Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.2, B.5, B.6)
03 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.1, B.5, B.6)
04 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.2, B.5, B.6)
05 Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch)[2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten, nach Landnutzungsart gruppiert (B.2, B.5, B.6)
Technische Messdaten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition						
06 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb [2)]	ng m^{-3}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A)

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / Anhangs genannt)
						Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.3, B.5, B.6), Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
07 Nasse Deposition von Cd, Hg, Pb [2)]	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.4, B.5, B.6), Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
08 Bulk-Deposition von Cd, Hg, Pb [3)]			●	●	●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (B.4, B.5, B.6), Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C) Kartographischer Vergleich mit Bioindikationsdaten (D)
09 Bulk-Deposition von Cd, Pb (3 zusätzliche ICP Forests Level II-Standorte und 1 hessischer Standort, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt)	µg m^{-2} a^{-1}		●	●	●	Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C)
Bioindikationsdaten						
10 Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, Beprobungsjahr 2016)[4)]	µg/g				●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit modellierten Daten zur atmosphärischen Konzentration (B.1, B.5, B.6) und Deposition (B.2, B.5, B.6) sowie mit technischen Messdaten zur Konzentration (B.3, B.5, B.6) und Deposition (B.4, B.5, B.6) Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des

Datensätze	Einheit	2013	2014	2015	2016	Ziel / Methode (in Klammern werden die betreffenden Abschnitte des Textes / Anhangs genannt)
						biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge (C)
11 Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, geostatistische Flächenschätzungen, 3 km x 3 km)	µg/g				●	Deskriptive Statistik (A) Korrelationsanalytischer Vergleich mit modellierten Daten zur atmosphärischen Konzentration (B.1, B.5, B.6) und Deposition (B.2, B.5, B.6) sowie mit technischen Messdaten zur Konzentration (B.3, B.5, B.6) und Deposition (B.4, B.5, B.6) Kartographischer Vergleich mit technischen Messdaten (D)

[1)] http://en.msceast.org/index.php/pollution-assessment/emep-domain-menu/data-hm-pop-menu (27.04.2018)

[2)] Datenlieferung MSC-East vom 24.09.2020 (davon Datensätze 06, 07 = in Ilyin et al. (2020) für die Modellvalidierung verwendete Daten aus Messnetzen des Bundes und der Länder)

[3)] aus Ilyin et al. (2020: ANNEX B) entnommene Werte, = Daten aus Messnetzen der Bundesländer

[4)] http://www.mapserver.uni-vechta.de/mossEU/login.php (29.09.2020)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Daten. Diese umfassen quantitative Ergebnisse der in **Abschnitt 1** genannten Methoden zur Erfassung der atmosphärischen Belastung: technische Messungen, durch Biomonitoring – hier mit Moosen – und durch Modellierung mit dem Global EMEP Multi-media Modeling System, GLEMOS, Version v2.0). Die modellierten Belastungsmuster schlüsseln sich auf in mittlere Konzentrationen und Jahres-Gesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb in einer Auflösung von 50 km x 50 km für die Jahre 2013-2015 sowie in einer Auflösung von 0,1° x 0,1° für die Jahre 2014-2016. Die Jahres-Gesamtdepositionen liegen vor als entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtete Depositionsraten Eintragsraten sowie bei der Auflösung 0,1° x 0,1° zusätzlich als nutzungsspezifische, d.h. für jede Landnutzungsklasse des CORINE Land Cover Datensatzes (CLC) berechnete Raten.

2.2 Datenaufbereitung

Die in **Tabelle 1** zusammengestellten Daten wurden in folgenden vier Schritten für die deskriptiv- und korrelationsstatistischen Analysen in einem geografischen Informationssystem (GIS) vorbereitet:

1. Die technischen Messdaten zur atmosphärischen Konzentration und nassen Deposition (Datensätze 06 und 07 in **Tabelle 1**, in Ilyin et al. 2020 für die Modellvalidierung verwendete Daten) und zur Bulk-Deposition (Datensatz 08 in **Tabelle 1,** in Ilyin et al. 2020, ANNEX B, Tables B1-B6 dokumentierte Daten) wurden mit den Koordinaten der Stationsdatenbank des UBA[1] verknüpft.

2. Die arithmetischen Mittelwerte der modellierten atmosphärischen Konzentrationen (Datensatz 01 in **Tabelle 1**) und Jahres-Gesamtdeposition wurden für die Jahresspannen: 2013-2014, 2014-2015, 2013-2015 (EMEP 50 km x 50 km) (Datensatz

[1] Stationsdatenbank des UBA: https://www.env-it.de/stationen/public/open.do

01 in **Tabelle 1**) sowie 2014-2015, 2015-2016, 2014-2016 (EMEP 0,1° x 0,1°) (Datensätze 04, 05 in **Tabelle 1**) berechnet.

3. Räumliche Verknüpfung der Moosmonitoring-Standorte (Datensatz 10 in **Tabelle 1**) bzw. geostatistischen Flächenschätzung (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) mit der modellierten Konzentration (Datensätze 01, 03 in **Tabelle 1**) und Deposition (Datensätze 02, 04, 05 in **Tabelle 1**) und Berechnung des Medianwertes je EMEP-Grid. Dabei wurden die modellierte atmosphärische Konzentration, die entsprechend der Landnutzungsverteilung in jedem EMEP-Grid gewichtete atmosphärische Deposition sowie der anhand der an jedem Monitoringstandort vorhandenen Informationen zur Landnutzung (aus 1. CLC und 2. der kartierten Vegetation abgeleitet) zugeordneten landnutzungsspezifisch modellierten Konzentration / Deposition verwendet.
4. Die Standorte der Luftmessnetze des Bundes und der Länder mit den unter 1. angeführten Koordinaten aus der Stationsdatenbank des UBA (Datensätze 06, 07, 08 in **Tabelle 1**) wurden mit den geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentrationen im Moos (Datensätze 11 in **Tabelle 1**) räumlich verknüpft.

2.3 Methoden

A Methoden der deskriptiven Statistik

Die mit dem Statistikpaket R (R Core Team 2018) ausgewerteten Daten wurden nach Shapiro & Wilk (1965) auf Normalverteilung untersucht. Im Vergleich zu anderen Tests auf Normalverteilung (z.B. Kolmogorow-Smirnow-Test, Chi-Quadrat-Test) zeichnet sich der Shapiro-Wilk-Test durch seine hohe Teststärke in zahlreichen Testsituationen aus, insbesondere bei der Überprüfung von kleineren Stichproben mit n < 50. Der Test auf Normalverteilung nach Shapiro & Wilk (1965) wird in dieser Untersuchung als Vortest für weitere, nicht im Gutachtenauftrag vorgesehene aber notwendige statistische Analysen aufgefasst werden, die in **Kapitel 4** empfohlen werden.

Folgende Verteilungen werden in dieser Studie unterschieden: VT [1] Normalverteilung, VT [2] Lognormalverteilung und VT [3] andere Verteilung. Zudem wurden für die Datenverteilungen folgende Lagemaße ermittelt: Minimum (Min); 20. Perzentil (P20), 50. Perzentil (P50), 90. Perzentil (P90), 98. Perzentil (P98), Maximum (Max), arithmetisches Mittel (MW), Standardabweichung (SD). Die Ergebnisse sind tabellarisch im **Anhang A** zusammengestellt und werden in **Kapitel 3** zusammengefasst.

B Korrelationsanalyse

Die Stärke und Richtung des Zusammenhangs zweier Merkmale wird per Korrelationsanalyse ermittelt. In dieser Untersuchung wurden die Zusammenhänge nach Pearson (**Gl. 2**) und Spearman (**Gl. 1**) berechnet. Während der Korrelationskoeffizient nach Pearson die lineare Beziehung zwischen zwei stetigen Variablen untersucht und die metrischen Abstände verarbeitet, basiert der Spearman'sche Koeffizient auf der Rangfolge der Messwerte, unabhängig von den Abständen zwischen den Werten (Sachs & Hederich 2009). Einheitliche Richtlinien zur Bewertung der Korrelationskoeffizienten gibt es in der Literatur nicht. Die in dieser Untersuchung nach **Gleichung 1 und 2** berechneten Korrelationen werden z.B. von 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), sehr stark (>= 0,8). Cohen (1988) stuft gröber ein: Demnach sind Korrelationen zwischen r = 0.1 und r = 0.3 als gering / schwach, zwischen r = 0.3 und r = 0.5 als mittel / moderat und ab r = 0.5 als groß / stark einzustufen. Nachtigall & Wirtz (2004) sehen Korrelationen bis 0.5 als gering, 0.7 als moderat und 0.9 als hoch an. In den empirischen

Sozialwissenschaften, deren Methodologie derjenigen der Ökologie ähnlich ist (Jenssen et al. 2019; Schröder & Nickel 2020), wird die Stärke statistischer Zusammenhänge nach Cohen (1988) eingestuft. Dass hierbei nur drei Kategorien verwendet werden, kommt einer konzisen textlichen Darstellung entgegen.

Korrelationskoeffizient (Spearman) $r_s =$ $$1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n}(R_{xi} - R_{yi})^2}{n(n^2-1)}$$ **(Gl. 1)**

Korrelationskoeffizient (Pearson) $r_p =$ $$\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$ **(Gl. 2)**

Die Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten wurde nach **Gl. 3** in Anlehnung an Sachs und Hedderich (2009, S. 640) berechnet.

$$x^2 = \sum_{i=1}^{k}(n_i - 3)(z_i - z)^2 \qquad \textbf{(Gl. 3)}$$

mit: χ^2 = Prüfwert

k = Freiheitsgrad (Anzahl der Koeffizienten)

n_i = Anzahl der Probenahmen

z_i = Transformierter Korrelationskoeffizient nach Fisher

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

Die Unterschiedlichkeit der Korrelationskoeffizienten wird anhand einer zuvor definierten Irrtumswahrscheinlichkeit (α) getestet, welche auf α = 0,05 festgesetzt wurde. Die Signifikanz steigt im Allgemeinen mit der Größe der Stichprobe. Solange χ^2 größer ist als der hypothetische z-Wert nach Sachs & Hedderich (2009), kann der Unterschied der Korrelationskoeffizienten als signifikant interpretiert werden.

Bei Auswertungen mit Berücksichtigung der landnutzungsspezifischen Deposition sind zwei verschiedene Zuordnungen der Landnutzung zu Messpunkten des Moosmonitoring zu unterscheiden: Zum einen erfolgte die Zuordnung der Landnutzung an diesen Standorten nach Corine Land Cover (bei den statistischen Auswertungen gekennzeichnet mit „CLC“), zum anderen wird die Landnutzung berücksichtigt, die bei der Moosprobeentnahme direkt vor Ort festgestellt und in das Probenahmeprotokoll aufgenommen wird (gekennzeichnet mit „Veg“). Beispielsweise kann an einem Moosstandort nach CLC die Landnutzung „Laubwald“ zuzuordnen sein, während vor Ort (Veg) die Landnutzung Mischwald festgestellt wurde. Für die Korrelationsberechnung zwischen atmosphärischer Belastung (Konzentration/Deposition) und Schwermetallkonzentrationen im Moos wurde dann zum einen die nutzungsspezifisch modellierten Depositionsdaten von EMEP für Laubwald (CLC), zum anderen für Mischwald (Veg) herangezogen.

C Analyse der Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings atmosphärischer Stoffeinträge

Die in **Tabelle 1** aufgeführten empirisch erhobenen Daten – das sind die technischen Messdaten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition (Datensätze 06 Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb, 07 Jahres-nasse Deposition von Cd, Hg, Pb und 08 und 09 Bulk-Deposition von Cd, Pb;

Tabelle 1) und die Bioindikationsdaten (Datensätze Nr. 10, 11: Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen; **Tabelle 1**) – entstammen nicht räumlich deckungsgleichen Messnetzen. Für die Beurteilung der Ergebnisse der Korrelationsanalysen von Daten aus räumlich nicht kongruenten Messnetzen ist die räumliche Entfernung zwischen ihren Standorten bedeutsam. Deswegen wurden die jeweils geringsten Distanzen zwischen den Stationen der Messnetze des Bundes und der Länder mit Daten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition und den Standorten des Moos-Monitorings 2015 berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in **Anhang C** zusammengestellt und werden in **Kapitel 3** zusammengefasst.

D Kartierung räumlicher Verteilungen der Abweichungen modellierter atmosphärischer Metall-Konzentration und -Deposition (EMEP) sowie der Konzentration in Moosen (MM2015) vom jeweiligen bundesweiten Median

Der Vergleich der kartierten räumlichen Differenzierung der Daten dieser Untersuchung (**Tabelle 1**) umfasste folgende vier Varianten:

1. Räumliche Verteilungen der Abweichungen von den bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median *modellierter atmosphärischer Konzentration und Gesamtdeposition* (EMEP 0,1° x 0,1°) (Datensätze 03, 04, 05 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) (**Abb. D.1-D.3**),

2. Räumliche Verteilungen der Abweichungen von den bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median *technisch gemessener atmosphärischer Konzentration* (Ilyin et al. 2020) (Datensatz 06 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) (**Abb. D.4-D.6**),

3. Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median *technisch gemessener nasser Deposition* (Ilyin et al. 2020) (Datensatz 07 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) (**Abb. D.7-D.9**) sowie

4. Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd- und Pb-Mediane *technisch gemessener Bulk-Deposition* (Ilyin et al. 2020**: Annex B**) (Datensatz 08 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) (**Abb. D.10-D.11**)

Die Abweichungen wurden auf Basis der relativen Abweichungen vom Medianwert gemäß der **Gleichungen 4 und 5** berechnet, bei den technischen Messdaten erfolgten die Berechnung der Abweichungen vom Medianwert der modellierten Konzentration und Deposition.

$$Conc_{dev} = \left(\left(Conc_{x,y} - Conc_{median}\right) / Conc_{median}\right) * 100 \qquad \textbf{(Gl. 4)}$$

$$Depo_{dev} = \left(\left(Depo_{x,y} - Depo_{median}\right) / Depo_{median}\right) * 100 \qquad \textbf{(Gl. 5)}$$

Für die Kartenvergleiche wurden bei allen drei Schwermetallen die Mittelwerte der atmosphärischen Konzentration der Jahresspanne 2015-2016 (Datensatz **03** in **Tabelle 1**) und die Mittelwerte der Deposition der Jahresspanne 2014-2016 (Datensatz 04 in **Tabelle 1**) verwendet, da hier die Korrelationen etwas öfter stärker sind als bei den entsprechenden einzelnen Jahreswerten (**Anhang Tabelle B.6.6**). Die Korrelationen wurden nach Spearman berechnet, da Log-Normalverteilung in den wenigsten Fällen vorhanden sind (**Anhang A**). Die Ergebnisse werden in den **Abbildungen D.1-D.11** veranschaulicht und in **Abschnitt 3** zusammengefasst.

3 Ergebnisse

Die in den Anhängen detailliert dokumentierten Ergebnisse werden entsprechend der zu Ihrer statistischen Analyse verwendeten Methoden in folgenden fünf Blöcken zusammengefasst: A Deskriptive Statistik, B Korrelationsanalyse, C Entfernungen zwischen Messpunkten des technischen und des biologischen Monitorings, D Vergleich kartierter räumlicher Differenzierungen, E Zusammenfassung mit Blick auf Ziele und Kernfragen der Untersuchung.

A Deskriptive Statistik

Alle Ergebnisse der deskriptiv-statistischen Auswertung der zu untersuchenden Daten (**Tabelle 1**) sind in **Anhang A** dokumentiert.

A.1 Messdaten zu Schwermetallkonzentration in Moosen

Tabelle A.1 enthält die deskriptiv-statistischen Kennwerte der Konzentration von Pb, Cd und Hg in Moosen des MM 2015 (Messdaten 2016 aus Datensatz 10 in **Tabelle 1** und geostatistische Flächenschätzungen aus Datensatz 11 in **Tabelle 1**). Demnach zeigt sich, dass die Mediane der empirisch erhobenen Moosdaten bei Unterschieden zwischen den Metallen mit denen der aus diesen Messdaten berechneten geostatistischen Flächenschätzungen weitgehend übereinstimmen. Hingegen weichen die berechneten Perzentile (P20, P90, P98), die Minima und Maxima sowie die Standardabweichung der Messwerte und der daraus geostatistisch berechneten Flächenschätzungen erheblich voneinander ab. Normalverteilung liegt weder bei den Messdaten noch bei den daraus abgeleiteten Flächenschätzungen vor.

Abbildung A.1.1 veranschaulicht statistische Verteilungscharakteristika der untersuchten Datensätze 01, 03, 06, 10 der **Tabelle 1**, d.h. für Verteilungen zweier Modellierungen (hohe und niedrige räumliche Auflösung) und technisch gemessener atmosphärischer Konzentrationen von Cd, Hg und Pb sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in Moosen in Deutschland. Für Hg wird deutlich, dass sowohl technische Messungen als auch Modellierungen eine geringe Varianz aufweisen. Das liegt zum einen an den Verteilungscharakteristika von Hg in der Umwelt. Zum anderen deckt das technische Hg-Messnetz extrem wenige Standorte ab, so dass potenziell vorhandene räumliche Konzentrations- und Depositionsunterschiede nicht erfasst werden. In diesem Punkt ist das Moosmonitoring-Netz dem technischen Monitoring überlegen und sollte deshalb zur Validierung der Modellierungen genutzt werden.

Abbildung A.1.2 enthält die statistischen Verteilungen zweier Modellierungen und technisch gemessener atmosphärischer Deposition sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in deutschlandweit gesammelten Moosen (Datensätze 02, 04, 07 und 10 der **Tabelle 1**. Hier entsprechen die Varianzen den in **Abbildung A1.1** gezeigten Verteilungen.

A.2 Modellierte mittlere Schwermetallkonzentrationen in der Atmosphäre

Tabelle A.2.1 umfasst die deskriptiv-statistischen Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre für das EMEP-Raster mit 50 km x 50 km Maschenweite jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie ferner für die Jahresintervalle 2013-2014 und 2013-2015 (Datensatz 01, **Tabelle 1**). Festzustellen ist, dass sämtliche Lage- und Streuungsmaße zwischen den Einzeljahren und den Jahresintervallen bei Unterschieden zwischen den Metallen stoffspezifisch nur geringe Abweichungen voneinander aufweisen. Cd und Hg nehmen über die Jahre im Gegensatz zu Pb leicht ab. Alle Daten sind weder normal noch lognormal verteilt.

Tabelle A2.2 enthält die deskriptiv-statistischen Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre im EMEP-Raster mit einer räumlichen Auflösung von 0,1° x 0,1° jeweils für die Jahre 2014, 2015 und 2016 sowie ferner für die

Jahresintervalle 2014-2015, 2015-2016 sowie 2014-2016 (Datensatz 03, **Tabelle 1**). Generell ist zu beobachten, dass sämtliche Lage- und Streuungsmaße zwischen den Einzeljahren und den Jahresintervallen bei Unterschieden zwischen den Metallen stoffspezifisch nur geringe Abweichungen voneinander aufweisen. Cd und Hg zeigen keinen Trend, bei Pb sind leichte Abnahmen zu verzeichnen. Die Verteilung der Daten ist ausnahmslos weder normal noch lognormal.

A.3 Modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Schwermetallen

Tabelle A.3.1 dokumentiert die deskriptiv-statistische Kennwerten modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg im EMEP-Raster mit einer Maschenweite von 50 km x 50 km für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die Intervalle 2014-2015 sowie 2013-2015 (Datensatz 02, **Tabelle 1**). Sämtliche Kenngrößen variieren zwischen den Einzeljahren und den Jahresintervallen bei Unterschieden zwischen den Metallen stoffspezifisch gering. Für die drei Metalle sind leichte Rückgänge über die Jahre zu verzeichnen. Die Daten sind ausnahmslos weder normal noch lognormal verteilt.

Tabelle A.3.2 enthält die deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg (EMEP 0,1° x 0,1°, 2014-2016) (Datensatz 04, **Tabelle 1**). Die statistischen Kennwerte sind über alle einzelnen Jahre und Jahresintervalle bei Unterschieden zwischen den Metallen stoffspezifisch sehr ähnlich. Cd und Hg unterliegen keinem Trend, Pb nimmt über die Jahre leicht ab. Die Daten sind alle weder normal noch lognormal verteilt.

A.4 Technische Messdaten zu mittleren atmosphärischen Schwermetallkonzentrationen

Die deskriptiv-statistischen Kennwerte der technischen Messdaten zur mittleren Konzentration von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (Datensatz 06, **Tabelle 1**) zeigen bei Unterschieden zwischen den Metallen geringe stoffspezifische Variation über die Einzeljahre und Jahresintervalle. Cd und Pb nehmen im Zeitverlauf etwas ab, bei Hg gilt dies nur für das Minimum der Messwerte (**Tabelle A.4**).

A.5 Technische Messdaten zu atmosphärischen Schwermetalldepositionen

Die in **Tabelle A.5.1** gelisteten deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur nassenDeposition von Cd, Hg und Pb (2014-2016) (Datensatz 07; **Tabelle 1**) variieren beträchtlich zwischen den Jahren und Jahresintervallen. Über die Jahre sinkende Werte zeigen Cd und Pb, hingegen weist Hg keinen Trend auf. Einige Daten sind lognormal verteilt (Hg-Deposition 2015, 2016, 2014-2015, 2015-2016, 2014-2016, Pb-Deposition 2016, 2015-2016, 2014-2016). Der Rest ist weder normal noch lognormal verteilt.

Die deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur Bulk-Deposition von Cd und Pb (2014-2016; Datensatz 08 in **Tabelle 1**) heben sich von den zuvor dargestellten Ergebnissen ab (**Tabelle A.5.2**): Die Cd-Deposition nimmt – gemessen an P50 – nicht ab. Hingegen sinkt das Minimum, während das Maximum und die Standardabweichung deutlich ansteigen. Unklar ist die Situation auch im Falle der Pb-Deposition: Min, P20, MW und P90 sinken, P50 und die anderen Kennwerte steigen. Normalverteilung liegt nicht vor, Lognormalverteilung bei der Cd-Deposition 2015-2016 sowie bei der Pb-Deposition 2015, 2015-2016 und 2014-2016.

B Korrelationsanalyse

Die textliche Zusammenfassung der Ergebnisse betrachtet nur statistisch signifikante Korrelationen, wobei deren Stärke in drei Stufen nach Cohen (1988) eingestuft wird. Demnach sind Korrelationen zwischen r = 0.1 und r = 0.3 als gering / schwach, zwischen r = 0.3 und r = 0.5 als mittel / moderat und ab r = 0.5 als groß stak einzustufen. Weitere Einstufungen werden in **Kapitel 2** (Abschnitt *Korrelationsanalyse*) genannt.

B.1 Korrelationen zwischen modellierten mittleren Konzentrationen von Schwermetallen in der Atmosphäre (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM2015)

Die Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen modellierten mittleren Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015; Datensätze 01, 03; **Tabelle 1)** sind überwiegend schwach (Cohen 1988) und überwiegend (sehr) signifikant (**Tabelle B.1.1**). Die aktuellen, räumlich höher aufgelösten Daten zeigen für Pb leicht schwächere statistische Zusammenhänge als die räumlich geringer aufgelösten Daten. Die nach Cohen (1988) als schwach, moderat und stark einzustufenden statistischen Zusammenhänge zwischen modellierten mittleren Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Cd-, Hg- und Pb-Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km; Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**) sind überwiegend (sehr) signifikant (**Tabelle B.1.2**).

B.2 Korrelationen zwischen modellierten atmosphärischen Schwermetalldepositionen (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM 2015)

Die nach Cohen (1988) fast ausschließlich schwachen Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015; Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**) sind überwiegend statistisch (sehr) signifikant (**Tabelle B.2.1**). In Tabelle B 2.1 weist die Cd-Deposition in den Fällen, in denen Korrelationen festgestellt wurden, im groben Raster die höhere Korrelation auf. Im Falle von Pb ist es umgekehrt. Für Hg konnten keine Korrelationen gefunden werden. Die statistisch sehr signifikanten Zusammenhänge (Spearman, Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km; Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**) sind nach Cohen (1988) als schwach und als moderat einzustufen und überwiegend stärker ausgeprägt bei Berücksichtigung der aktuellen, räumlich höher aufgelösten Daten (**Tabelle B.2.2**). Bei 4 von 6 Wertepaaren für Cd weist in Tabelle B.2.2 die gröbere Auflösung der Deposition die höhere Korrelation auf. Bei Pb ist es umgekehrt. Für Hg konnten keine Korrelationen gefunden werden.

Die statistisch (sehr) signifikanten Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen nutzungsspezifisch modellierten atmosphärischen Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**) (aus CLC abgeleitete Landnutzung; **Tabelle B.2.3**) sind nach Cohen (1988) schwach und fallen für die nicht nutzungsspezifisch modellierten Depositionsdaten bei Cd geringer und bei Pb höher aus. Die in **Tabelle B.2.4** zusammengestellten Korrelationskoeffizienten (Spearman, Pearson) für nutzungsspezifisch modellierte atmosphärische Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**) (im MM2015 erhobene Landnutzung) sind überwiegend sehr signifikant und nach Cohen (1988) schwach ausgeprägt. Die nutzungsspezifischen Daten liefern im Gegensatz zu den nicht nutzungsspezifischen Daten für Hg plausible Korrelationskoeffizienten, die wie die Werte für Cd und Pb statistisch sehr signifikant sind. Die auf nutzungsspezifischer Datengrundlage

berechneten Korrelationen sind im Vergleich zu der undifferenzierten Datengrundlage für Pb etwas höher (Ausnahme: Korrelationen nach Pearson für Cd).

Greift man für die Moosdaten nicht auf die Landnutzungsinformationen „Nadelwald“ zurück, die als Metainformationen für jeden Moosprobenentnahmeort erhoben werden, sondern nutzt die Landnutzungsinformation aus Corine Landcover, so ergeben sich viele unplausible Ergebnisse und schwache statistische Zusammenhänge. Die nutzungsspezifischen Koeffizienten sind für Pb geringer als diejenigen, die sich aus einer nicht nutzungsdifferenzierten Datengrundlage ergeben (**Tabelle B.2.5**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Die Korrelationen (Spearman, Pearson) für nutzungsspezifisch modellierte atmosphärische Depositionen von Cd, Hg, (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung) sind überwiegend nicht signifikant oder unplausibel, für Pb moderat ausgeprägt und statistisch sehr signifikant, für Hg signifikant und schwach ausgeprägt (**Tabelle B.2.6**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

Die Korrelationskoeffizienten (Spearman, Pearson) für nutzungsspezifisch modellierte atmosphärische Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten gemäß CLC sind überwiegend statistisch nicht signifikant oder nicht plausibel. Die statistisch signifikanten Befunde sind schwach und moderat ausgeprägt **Tabelle B.2.7**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Wenn die Landnutzungsinformation „Mischwald“ aus dem Moosdatensatz verwendet wird, erhöht sich der Anteil plausibler Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen nutzungsspezifisch modellierter atmosphärischer Deposition von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung) nicht – im Gegenteil. Nur in 18 von 72 Fällen konnten schwache, statistisch (sehr) signifikante Zusammenhänge ermittelt werden (**Tabelle B.2.8**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

Etwa ein Drittel der Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen der nutzungsspezifisch modellierten atmosphärischen Deposition von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sind statistisch (sehr) signifikant und schwach ausgeprägt, die anderen zwei Drittel moderat (**Tabelle B.2.9;** Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Verwendet man die an den Moosprobenentnahmestellen erhobenen Landnutzungsinformationen anstelle der CLC-Daten, dann liegt die Stärke der sehr signifikanten statistischen Zusammenhänge, die für ein Sechstel der untersuchten Fälle (meist Pb) nachweisbar und moderat ist, auf demselben Niveau (**Tabelle 2.10**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

Die Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen nutzungsspezifisch modellierter atmosphärischer Deposition von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung ohne Differenzierung von Laub- und Nadelwäldern) sind für Cd und Pb schwach ausgeprägt und mehrheitlich statistisch (sehr) signifikant. Für Hg lassen sich keine statistisch signifikanten Zusammenhänge ermitteln (**Tabelle B.2.11**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Verwendet man anstelle der CLC-Daten die im Moosmonitoring erhobenen Landnutzungsdaten, so steigt die Stärke der statistischen Zusammenhänge etwas, bleibt aber schwach. Für Hg lassen sich keine statistisch signifikanten Zusammenhänge finden (**Tabelle B.2.12**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

Die Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für nutzungsspezifisch modellierte atmosphärische Depositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) enthält (sehr) signifikante z.T. moderate bis starke Koeffizienten. Jedoch gilt das nur für rund ein Viertel der untersuchten Zusammenhänge an Offenlandstandorten (**Tabelle B.2.13**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

Keinerlei statistisch signifikante Zusammenhänge lassen sich finden, wenn statt der CLC-Daten die Landnutzungsdaten des Moosmonitorings verwendet werden (**Tabelle B.2.14**; Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**).

B.3 Korrelationen zwischen Mittelwerten der Konzentration aus technischen Messungen der von Schwermetallen in der Atmosphäre und Konzentrationen in Moosen

Die Hälfte der Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen technischen Messungen der mittleren Konzentration von Pb, Cd und Hg (bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) (Datensätze 06, 11 in **Tabelle 1**) ist schwach und moderat (Pb) und (sehr) signifikant (**Tabelle B.3**). Für die anderen Kombinationen ergab sich kein plausibler Zusammenhang.

B.4 Korrelationen zwischen technischen Messungen der atmosphärischen Schwermetalldeposition und Konzentrationen in Moosen

Die Korrelationen zwischen technischen Messungen der nassen Deposition von Pb, Cd und Hg (bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) (Datensätze 07, 11 in **Tabelle 1**) wurden untersucht, ergaben aber keine statistisch signifikanten Zusammenhänge (**Tabelle B.4.1**). Die Korrelationen (Spearman, Pearson) zwischen den Ergebnissen technischer Messungen der atmosphärischen Bulk-Deposition von Pb, Cd und Hg (aus Ilyin et al. 2020: Tabellen B1-B6 übernommene Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km) (Datensätze 08, 11 in **Tabelle 1**) sind dagegen statistisch sehr signifikant und nach Cohen (2002) vereinzelt moderat und ansonsten stark im Falle von Pb und Cd (hier nur für 2014; **Tabelle B.4.2**).

B.5 Graphischer Vergleich der Korrelationskoeffizienten

Die in den Abschnitten B.1 bis B.4 tabellarisch dokumentierten Korrelationen wurden auch graphisch aufbereitet. **Abbildung B.5.1** zeigt die Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Messdaten des MM2015 im Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1° (Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**). Es zeigt sich, dass die höhere räumliche Auflösung für Cd und Hg sehr schwache aber im Vergleich zur Auflösung 50 km x 50 km signifikante Korrelationen, bei Pb aber leicht stärkere statistische Zusammenhänge als im Falle des 50 km x 50 km-Rasters erbringt. Für die nach Pearson berechneten Korrelationen zeigen sich bei Cd und Hg ein ähnliches Bild und für Pb leicht stärkere statistische Zusammenhänge als im Falle der geringeren räumlichen Auflösung (Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**) (**Abbildung B.5.2**).

Die Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 sind bei einer räumlichen Auflösung von 0,1° x 0,1° für Cd weder höher noch niedriger und für Hg und Pb höher als bei einer Auflösung von 50 km x 50 km (Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildung B.5.3**). Die Pearson-Koeffizienten sind für Cd, Hg und Pb bei feinerer Auflösung höher als bei gröberer (Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildung B.5.4**).

Die Zusammenhänge (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und Messdaten des MM2015 sind für Cd bei höherer räumlicher Differenzierung etwas weniger ausgeprägt als bei der gröberen Auflösung. Für Pb gilt das Gegenteil (**Abbildung B.5.5**) (Datensätze 02, 04, 10 in **Tabelle 1**). Bei den Pearson-Korrelationen zeigt sich ein

uneinheitliches Bild beim Vergleich der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. (**Abbildung B.5.6)** (Datensätze 02, 04, 10 in **Tabelle 1**).

Die Korrelationen nach Spearman zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 im Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1° zeigen für Cd bei der gröberen Auflösung höhere Korrelationen, für Hg bei der gröberen Auflösung teilweise sehr geringe, aber signifikante Korrelationen und für Pb bei der feineren höhere Korrelationen als bei der gröberen Auflösung (Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildungen B.5.7**). Bei den entsprechenden Korrelationen nach Pearson (Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**) zeigt sich für Cd bei der gröberen Auflösung kein klarer Trend, für Hg keine signifikanten Korrelationen und für Pb wiederum bei der feineren Auflösung höhere Korrelationen (**Abbildung B.5.8**). Die Korrelationen (Pearson und Spearman) zwischen atmosphärischen Konzentrationen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 sind für Cd, Hg und Pb bei den geostatistischen Flächenschätzungen höher als bei den punktuell gemessenen Konzentrationen in Moosen (Datensätze 03, 10, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildungen B.5.9 und B.5.10**). Dieselbe Feststellung gilt für die Korrelationen (Pearson und Spearman) zwischen atmosphärischen Depositionen (EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen (MM 2015) zumindest bei Cd und Pb, während Hg dagegen keinerlei Korrelationen zeigt (Datensätze 04, 10, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildungen B.5.11 und B.5.12**).

Die gemessenen Elementkonzentrationen in den Moosen korrelieren bei Cd und Pb mit der modellierten Deposition stärker als mit den modellierten Konzentrationen in der Luft. Bei Hg sind allein für die modellierten Konzentrationen in der Luft signifikante Korrelationen zu den Daten des Moosmonitorings feststellbar. (Datensätze 03, 04, 10 in **Tabelle 1**). Dies gilt für die Spearman-Koeffizienten wie für die Pearson-Koeffizienten (**Abbildung B.5.13 und B.5.14**). Diese Einheitlichkeit trifft nicht zu für die Spearman-Koeffizienten für den Zusammenhang geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 und modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen (Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildung B.5.15**). Ausnahmslos stärkere Beziehungen misst der Pearson-Koeffizient zwischen modellierter Luftkonzentration von Cd und Pb zu den geostatistischen Flächenschätzungen der Elementgehalten in den Moosen (2015) als zwischen diesen und den Depositionen (Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildung B.5.16**). Die Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (alle Standorte) sind im Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen im Falle der anhand der im Moosmonitoring erhobenen Landnutzungsdaten getroffenen Zuordnung der nutzungsspezifisch modellierten Deposition am höchsten (**Abbildung B.5.17** auf Grundlage der Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Die Korrelationen (Pearson) folgen nur für Pb und Hg diesem Muster, während bei Cd die gewichtete Deposition die höchste Korrelation aufweist (**Abbildung B.5.18** auf Grundlage der Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**). Uneinheitlicher gestalten sich die statistischen Zusammenhänge für Waldstandorte (**Abbildung B.5.19** und **Abbildung B.5.20** auf Grundlage der Datensätze 04, 05, 10 der **Tabelle 1**).

B.6 Signifikanzanalyse der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten

Bei Auswertungen von Daten ist es von großer Bedeutung, ob die aus ihnen abgeleiteten statistischen Kennziffern wie z.B. Korrelationskoeffizienten statistisch signifikant sind oder nicht. Denn die Ausprägung der statistischen Signifikanz entspricht dem Informationsgehalt von Messungen vor dem Hintergrund zufälliger Verteilungen. Das Signifikanzniveau bzw. die Irrtumswahrscheinlichkeit besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Fehler 1. Art auftritt,

dass die Nullhypothese abgelehnt wird, obwohl sie richtig ist. Je kleiner die Irrtumswahrscheinlichkeit ist, desto höher ist die Informationsqualität (Cassidy et al. 2019).

In den **Tabellen B.6.1** bis **B.6.6** werden die Ergebnisse kategorisiert zusammengestellt, die sich aus der Analyse der Unterschiede von Korrelationskoeffizienten auf statistische Signifikanz hin ergeben. **Tabelle B.6.1** (auf Grundlage der Datensätze 01, 02, 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**) enthält die Ergebnisse von 72 Vergleichen der Korrelationen zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°, Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messungen und Flächenschätzungen) einerseits und EMEP-Modellierung (50 km x 50 km; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messungen und Flächenschätzungen) andererseits. Dargestellt ist, ob die EMEP-Modellierung mit hoher Auflösung zu einem signifikant größeren oder signifikant kleineren Korrelationskoeffizienten führt, oder ob der Unterschied nicht signifikant ist. Keine signifikanten Unterschiede lassen sich dabei für 17 Fälle feststellen, während 21 signifikante Unterschiede vorliegen. Davon sind in 17 Fällen die Korrelationen bei Nutzung der räumlich höher aufgelösten Daten stärker als bei den gröber aufgelösten Konzentrations- und Depositionsdaten. In 34 Fällen ist aufgrund der Datenlage keine Aussage möglich.

Tabelle B.6.2 informiert darüber, dass Korrelationen zwischen EMEP-Modellierungen (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (geostatistische Flächenschätzung der Konzentration in Moosen) (Datensätze 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**) in 60 von 72 Fällen signifikant größer sind als zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen). Demnach werden bei Nutzung der aktualisierten Depositions- und Konzentrationswerte für Cd und Pb in Kombination mit den Daten der geostatistischen Flächenschätzung durchweg höhere Korrelationen ermittelt. Nicht so deutlich sind die in **Tabelle B.6.3** (auf Grundlage der Datensätze 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**) dokumentierten Befunde: Sie belegen, dass Korrelationskoeffizienten zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration) und Moosmonitoring-Daten in 21 von 73 Fällen signifikant größer, in neun von 72 Fällen nicht signifikant unterschiedlich und in 18 Fällen signifikant kleiner sind als zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Deposition) und Moosmonitoring-Daten.

Tabelle B.6.4 ist zu entnehmen, dass die Korrelationen zwischen nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°, nutzungsspezifische Deposition; Zuordnung der an den Moosstandorten nutzungsspezifisch modellierten Depositionen nach zwei verschiedenen Methoden:1. nach der an dem Moosstandort aus CLC ableitbaren Landnutzung und 2. entsprechend der im MM2015 an den Moosstandorten im Gelände erhobenen Landnutzung („Veg“) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen) (Datensätze 05, 10 in **Tabelle 1**) in 21 von 72 Fällen signifikant größer, in 9 von 72 Fällen nicht signifikant unterschiedlich und in 18 von 72 Fällen signifikant kleiner sind als die Zusammenhänge zwischen nicht nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; entsprechend der Landnutzungsverteilung gewichtete Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen (Datensätze 04, 10 in **Tabelle 1**) sind.

Tabelle B.6.5 zeigt, dass die Korrelationskoeffizienten zwischen nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen) (Datensätze 05, 10 in **Tabelle 1**) bei alleiniger Betrachtung der Waldstandorte in 5 von 72 Fällen signifikant größer, 22 von 72 nicht signifikant unterschiedlich und 12 signifikant kleiner sind als diejenigen zwischen nicht nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen). Hierbei basieren die Zuordnungen der jeweiligen nutzungsspezifischen Modellierungen an den Moosstandorten zum einen auf den aus Corine Land Cover an den Moosstandorten abgeleiteten

Landnutzung und zum anderen auf den im MM2015 an den Moosstandorten im Gelände erhobenen Landnutzung („Veg“).

Tabelle B.6.6 informiert auf Grundlage der Datensätze 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**) darüber, ob die Korrelationskoeffizient zwischen Mittelwerten der Jahresspannen der EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten signifikant größer, nicht signifikant unterschiedlich oder signifikant kleiner sind als diejenigen zwischen den zuzuordnenden Jahreswerten der EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten. In den meisten Fällen gibt es keine statistisch signifikanten Unterschiede.

C Vergleich des Luftgütemessnetzes des Bundes und der Länder mit dem Messnetz des Moos-Monitorings 2015

Abbildung C.1 zeigt die statistische Verteilung der geringsten Abstände zwischen den Stationen des Luftgütemessnetzes des Bundes und der Länder und den Standorten des MM2015. Diese Messpunkt-Distanzanalyse zeigt, dass die Messpunkte der in **Tabelle 1** zusammengestellten empirischen Datensätze 06, 07, 08, 09, 10 zwar nicht deckungsgleich sind. Doch 56 Standortpaare (= 112 Standorte) weisen eine räumliche Distanz unter 5 km auf. Diese liegt innerhalb der Autokorrelationsreichweite der mit Moosen indizierten Stoffeinträge (Schröder et al. 2019 b). Dies legt nahe, dass die Daten räumlich disparater Messnetze wie in dieser Untersuchung sinnvoll miteinander in statistische Beziehung gesetzt werden können.

D Kartierung räumlicher Verteilungen der Abweichungen modellierter atmosphärischer Metall-Konzentration und -Deposition (EMEP) sowie der Konzentration in Moosen (MM2015) vom jeweiligen bundesweiten Median

Sogenannte Durchschnittswerte wie Median und arithmetisches Mittel verdichten die in mehreren Messwerten enthaltene Informationen in einem statistischen Kennwert. Dieser Zentralwert der Datenverteilung kann z.B. die mittlere oder durchschnittliche Deposition von Cd, Hg und Pb für Deutschland, für einzelne Bundesländer oder naturräumliche Einheiten zusammenfassend kennzeichnen. Er verbirgt allerdings die räumlichen Abweichungen von ihm. Diese werden in den Karten des Anhang D dargestellt. Ihr Vergleich kann auftragsbedingt nicht etwa durch Korrelationsstatistik quantitativ erfolgen, sondern muss auf einige nicht quantifizierte Beschreibungen beschränkt werden.

Die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd- und Pb-Median *modellierter atmosphärischer Konzentration und Gesamtdeposition* (EMEP 0,1° x 0,1°) (Datensätze 03, 04 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) (**Abbildungen D.1 und D.3**) sind räumlich sehr ähnlich strukturiert. Hingegen trifft dies für Hg nicht zu (**Abbildung D.2**).

Die räumliche Verteilung der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median *technisch gemessener atmosphärischer Konzentration* (Datensatz 06 in **Tabelle 1**) (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) wird in den **Abbildungen D.4-D.6** dargestellt. Im Falle von Hg (**Abbildung D.5**) ist eine seriöse Beurteilung auf Grund der geringen Messpunktdichte nicht möglich. Diese ist bei Cd (**Abbildung D.4**) deutlich höher und ermöglichen die Feststellung, dass das Muster der Abweichungen der Ergebnisse aus technischen Messungen vom jeweiligen Median demjenigen des aus den Moosdaten erzeugten Musters nicht besonders ähnlich ist. Für Pb zeigt **Abbildung D.6** bei ausreichend erscheinender Messpunktdichte - außer in Brandenburg und Schleswig-Holstein - eine gewisse Übereinstimmung der Abweichungsmuster.

Die **Abbildungen D.7-D.9** veranschaulichen die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median *technisch gemessener nasser atmosphärischer Deposition* (Datensatz 07 in **Tabelle 1**) (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**). Für Cd ist ein Vergleich der Abweichungsmuster dadurch erschwert, als für die technisch gemessene nasse Cd-Deposition (Datensatz 07 in **Tabelle 1**) nur wenige und das Gebiet Deutschlands schlecht abdeckende Stationen zur Verfügung stehen. Diese zeigen ein deutlich anderes Abweichungsmuster als die Moosdaten (**Abbildung D.7**). Dasselbe gilt für Hg (Datensatz 07 in **Tabelle 1**) (**Abbildung D.8**) und Pb (Datensatz 07 in **Tabelle 1**) (**Abbildung D.9**) sowie für die technisch erfasste Bulk-Deposition von Cd und Pb (Datensatz 08 in **Tabelle 1**) (**Abbildungen D.10 und D.11**).

E Zusammenfassung mit Blick auf Ziele und Kernfragen der Untersuchung

Die deskriptiv-statistische Auswertung zeigt, dass sämtliche Daten nicht normalverteilt sind. Die im einzelnen bestimmten Verteilungscharakteristika müssten bei der Wahl statistischer Kenngrößen wie z.B. die für eine Folgeuntersuchung empfohlene Bestimmung der Mindestprobenzahl zu beachtet werden. Zwar sind die Messpunkte der empirischen Datensätze nicht räumlich deckungsgleich. Doch sie weisen eine räumliche Distanz auf, die innerhalb der Autokorrelationsreichweite der mit Moosen indizierten Stoffeinträge liegt (Schröder et al. 2019 b). Deswegen können diese Daten wie in dieser Untersuchung sinnvoll miteinander in statistische Beziehung gesetzt werden, was das Hauptziel dieser Untersuchung war.

Die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd- und Pb-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Gesamtdeposition EMEP (0,1° x 0,1°) (Datensätze 03, 04 in **Tabelle 1**) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) (Datensatz 11 in **Tabelle 1**) sind räumlich sehr ähnlich strukturiert. Hingegen trifft dies für Hg nicht zu.

Die räumliche Verteilung der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) zeigt, dass für Hg eine seriöse Beurteilung auf Grund der geringen Messpunktdichte nicht möglich ist. Diese ist bei Cd deutlich höher und ermöglichen die Feststellung, dass das Muster der Abweichungen der Ergebnisse aus technischen Messungen vom jeweiligen Median demjenigen des aus den Moosdaten erzeugten Musters nicht besonders ähnlich ist. Für Pb zeigt sich bei ausreichend erscheinender Messpunktdichte - außer in Brandenburg und Schleswig-Holstein - eine gewisse Übereinstimmung der Abweichungsmuster.

Die räumlichen Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-, Hg- und Pb-Median technisch gemessener nasser Deposition und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015) zeigt, dass für Cd ein Vergleich der Abweichungsmuster dadurch erschwert ist, als für die technisch gemessene nasse Cd-Deposition nur wenige und das Gebiet Deutschlands schlecht abdeckende Stationen zur Verfügung stehen. Diese zeigen ein deutlich anderes Abweichungsmuster als die Moosdaten. Dasselbe gilt für Hg und Pb sowie für die technisch erfasste Bulk-Deposition von Cd und Pb.

Hauptziel dieser Untersuchung war es, mit neuen, räumlich deutlich differenzierteren Daten zur atmosphärischen Belastung mit Pb, Cd, Hg (Ilyin et al. 2020) die korrelationsstatistischen Analysen von Schröder et al. (2019 b) zu aktualisieren und zu ergänzen. Zu diesem Zweck wurden Pearson- und Spearman-Korrelationen zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°) der Metallkonzentration in der Atmosphäre und der atmosphärischen Metalldeposition einerseits und Moosmonitoring-Daten (Messungen und Flächenschätzungen) andererseits berechnet und geprüft, ob sie signifikant größer oder kleiner oder nicht signifikant unterschiedlich sind als diejenigen Korrelationen zwischen EMEP-Modellierung (50 km x 50 km) der Konzentration und

Deposition zum einen und Moosmonitoring-Daten (Messungen und Flächenschätzungen) zum anderen. Die Berechnungen ergaben für zwei der 19 Modelle keine Zusammenhänge, für acht schwache Korrelationen, für fünf Modelle geringe und mittlere Korrelationen, für ein Modell mittelstarke Zusammenhänge und für ein weiteres schwache, mittlere und starke Korrelationen, für zwei moderate und starke Korrelationen:

Keine Korrelation ließ sich nachweisen für

1. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung) sowie für
2. technische Messungen der nassen atmosphärischen Deposition von Pb, Cd und Hg und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Gering sind die Korrelationen für

3. modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015),
4. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015),
5. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (aus CLC abgeleitete Landnutzung),
6. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (im MM2015 erhobene Landnutzung),
7. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung),
8. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung),
9. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
10. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung).

Gering und mittel ausgeprägt sind die Korrelationen für

11. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km),
12. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung),
13. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung),

14. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
15. Mittelwerte der Konzentrationen aus technischen Messungen von Pb, Cd und Hg und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Schwach, moderat und stark sind Korrelationen für

16. modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Mittel sind die Korrelationen

17. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung).

Moderat und stark sind Korrelationen für

18. modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung) sowie für
19. technische Messungen der atmosphärischen Bulk-Deposition von Pb, Cd und Hg und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km).

Über den Untersuchungsauftrag hinausgehende Berechnungen der Korrelationen (Pearson, Spearman) zwischen den Messdaten aus dem technischen und biologischen Monitoring unter Berücksichtigung von Informationen zum Stationscharakter (alle versus Background) und der Entfernung zwischen den Standorten ergeben folgende Befunde, wobei die Fallzahlen für die untersuchten Wertepaare mit n = 3 bis n = 33 überwiegend sehr gering sind:

1. Zwischen den technisch gemessenen Luft-Konzentrationen und den Moosdaten bestehen bei Cd und Hg keine, bei Pb starke signifikante Zusammenhänge (r = 0,59-0,69; Pearson), wobei der Korrelationskoeffizient erheblich durch die Stichprobengröße beeinflusst wird. Inwieweit die umgebende Landnutzung an den Luftgütemessstellen oder die Entfernung zwischen den Stationen des technischen und biologischen Monitorings einen Einfluss auf die Korrelationsstärke hat, kann aufgrund der gegebenen geringen Fallzahlen nicht verlässlich beurteilt werden. Der Vergleich der Jahre 2015/16 mit den Moosdaten der Jahre 2015/16 erbringt höhere Korrelationen als der Vergleich mit den Daten des Jahres 2014.
2. Die gemessene nasse Deposition zeigt mit den Konzentrationen in den Moosen starke Korrelationen bei Pb (r = 0,77 - 0,85; Pearson) und mittlere bis starke bei Cd (r = 0,43 – 0,50; Spearman), bei Hg keine signifikanten Zusammenhänge, was im Vergleich etwa zu Pb nicht nur auf eine zu kleine Stichprobe zurückzuführen ist. Mit Verringerung des Abstandes zwischen den Stationen des technischen und biologischen Monitorings nimmt bei Cd und Pb der Korrelationskoeffizient trotz der Verkleinerung des Stichprobenumfangs zu. Die Vergleiche mit der nassen Deposition des Jahres 2016 erbringen im Vergleich zu den anderen Jahren die stärksten Korrelationen. Der Einfluss der umgebenden Landnutzung lässt sich anhand der zur Verfügung stehenden Daten nicht näher bestimmen.
3. Die gemessene Bulk-Deposition korreliert bei Hg und Pb nicht und bei Cd stark (r = 0,78 - 0,92; Pearson) mit den Moosdaten. Der Abstand zwischen den Stationen der Luft-Messnetze und des Moosmonitorings hat entscheidenden Einfluss auf die

Korrelationshöhe: Je näher die Standorte zusammen liegen, desto stärker die statistischen Zusammenhänge. Bei Entfernungen unter 2000 m errechnet sich ein Korrelationskoeffizient von 1 (Spearman), welcher aufgrund der geringen Fallzahlen (n = 4) jedoch nicht signifikant ist. Bei Beschränkung des Vergleichs auf die Hintergrundstationen der Luftgütemessnetze deutet sich im Bereich 5000-10000 m Abstand trotz Verringerung der Fallzahlen eine zumeist höhere (hier jedoch nicht signifikante) Korrelation zwischen den technischen Messdaten und den Bioindikationsdaten an.

4. Insgesamt scheinen - bei aller Unsicherheit aufgrund der geringen Fallzahlen - die Korrelationen zwischen den Messwerten höher zu sein als zwischen den technischen Messdaten und den geostatistischen Flächenschätzungen. Weitere statistische Analysen und eine Konzeption einer Messnetzoptimierung, aufbauend auf den in Abschnitt 4 skizzierten Ansätzen und früheren Arbeiten zur Optimierung der bundesweiten Depositionsmessung (Fränzle et al. 1987), sind erforderlich und aussichtsreich.

4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung legt in Ergänzung zu den Ergebnissen und Empfehlungen von Ilyin et al. (2020) folgende Schlussfolgerungen nahe:

1. Die bisher erfolgte Aktualisierung und Regionalisierung der Emissionsdaten als Grundlage der EMEP-Modellierung sowie die Erhöhung der räumlichen Auflösung von Daten über die Konzentration von Metallen in der Atmosphäre und ihre Abscheidung an der Erdoberfläche (atmosphärische Deposition) führt nicht durchgängig zu einer Erhöhung der Korrelationen mit den räumlich hoch aufgelösten Elementkonzentrationen in Moosen. Auch die höher aufgelösten Modellierungen bleiben in ihrer Aussagekraft von der Qualität der Eingangsdaten (Emissionen, Meteorologie, Landnutzung, weitere Randbedingungen) sowie intrinsischen Modellunsicherheiten abhängig. Bei fortbestehenden Unsicherheiten insbesondere der zur Modellierung verwendeten Emissionsdaten (Emissionshöhe, Vollständigkeit) führt die Verfeinerung der Raster-Auflösung nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der Modellierungsgenauigkeit.
2. Die empirische Grundlage zur Überprüfung der Modellierung von Luftkonzentrations- und Depositionswerten ist insofern schwach, als die Datenbasis aus technischen Messnetzen räumlich hinsichtlich Anzahl und geografischer Verteilung sowie hinsichtlich der gemessenen Elemente nicht ausreichend ist.
3. Aus der unter Ziffer 2 genannten Sachlage sollte der Schluss gezogen werden, die Vorteile der Daten aus dem Moosmonitoring (kostengünstiges Verfahren zur Beobachtung großräumiger Trends in räumlich dichten Messnetzen und mithin zur Verbesserung von Chemischen Transportmodellen und Emissionsinventaren) und der Daten der technischen Luftkonzentrationsmessungen und Depositionssammlung in die Validierung der Konzentrations- und Depositionsmodellierung komplementär einzubeziehen.
4. Aus Ziffer 3 leitet sich der konkrete Vorschlag ab, die Möglichkeiten der integrativen Nutzung von technischen Messdaten und Bioindikationsdaten zur Verbesserung der empirischen Grundlage für Vergleiche mit Modellierungsdaten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition wie folgt zu prüfen:

    a) Integration zunächst aller verfügbarer Daten aus technischen Messungen der atmosphärischen Konzentration und Deposition sowie der Landnutzungsdaten der Stationsdatenbank des UBA mit anschließender Qualitätskontrolle, Analyse ihrer methodischen Genese/Vergleichbarkeit und Verwendbarkeit (es wird erwartet, dass die umgebende Landnutzung einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der statistischen Zusammenhänge zwischen den modellierten Depositionen und den Daten aus technischen Messungen hat);

    b) Räumliche Verknüpfung der Daten aus technischen Messungen mit den Flächenschätzungen der Schwermetallgehalte in Moosen (einschließlich der auf verschiedene Blattflächenindizes / Nutzungen umgerechneten Verbreitungskarten);

    c) Regressionsanalyse (techn. Messdaten vs. Flächenschätzungen) und ggf. Berechnung von Regressionskarten der atmosphärischen Konzentration und/oder Deposition;

    d) Analyse der Residuen auf räumliche Autokorrelation und ggf. Berechnung von Residuenkarten, wobei vorläufige Variogrammanalysen auf Basis der in dieser Studie

verwendeten Daten bereits ergaben, dass die Residuen räumlich zwar schwach, aber für eine räumliche Verallgemeinerung ausreichend autokorreliert sind;

e) Berechnung von Regression-Kriging-Karten der atmosphärischen Konzentration und Deposition auf der Basis der technischen Messdaten und Bioindikationsdaten als Grundlage für korrelationsanalytische und kartographische Vergleiche mit entsprechenden Modellierungen – je nach Datenlage für die gesamte Fläche Deutschlands oder Teilregionen;

f) Überprüfung der Möglichkeiten zur Überführung der in den Moosen gemessenen Stoffgehalte über regressionsstatistisch abgeleitete Umrechnungsfunktionen (techn. Messdaten vs. Schwermetallgehalte in Moosen) in Depositionsraten, welche - komplementär zu den technischen Messungen – in einem vergleichsweise dichten Moosmessnetz den modellierten Depositionen gegenübergestellt werden könnten; Voraussetzung ist eine ausreichend hohe Anzahl benachbarter Stations-/Wertepaare (< 2000 m, besser < 1000 m), welche mit den in dieser Studie untersuchten 31 bzw. 16 Stationspaaren (mit zahlreichen Fehlwerten und Ausreißern) bislang nicht erreicht wurde; daher sollte für alle als geeignet befundenen technischen Messstellen auch geprüft werden, ob das Messnetz des Moos-Monitorings durch neue Standorte erweitert werden kann, d.h. vor Ort ermittelt werden, ob eines der drei in Deutschland gesammelten Moosarten (*Pleurozium schreberi, Pseudoscleropodium purum, Hypnum cupressiforme*) in einem Abstand von weniger als 2000 m (besser < 1000 m) an den für die integrative Analyse gewählten Stationen der Messnetze des Bundes und der Länder vorkommen;

g) Berechnung der Mindestprobenanzahl für die Messdaten der atmosphärischen Deposition aus technischen Sammlern und Moosen, die für die Validierung der chemischen Transportmodelle zur Berechnung der atmosphärischen Deposition eingesetzt werden und Erarbeitung konkreter Vorschläge zur räumlichen Ergänzung der in Deutschland vorhandenen Messnetze zur Erfassung der Schwermetallkonzentration in der Atmosphäre und der atmosphärischen Deposition.

In dem zu erarbeitenden Konzept sollten die Daten- und Messnetzanforderungen spezifiziert sowie die Methodenbausteine zur integrativen Nutzung von technischen Messdaten und Bioindikationsdaten für die Überprüfung modellierter atmosphärischer Konzentrationen und Depositionen in Deutschland beschrieben werden. Hierbei kann neben dem Ansatz zur Berechnung von Mindestprobenanzahlen zurückgegriffen werden auf Methoden für die Einrichtung und Optimierung von Umweltmessnetzen, die im Auftrag des Umweltbundesamtes in mehreren Forschungsprojekten entwickelt wurden. Dabei zielten Brümmer et al. (1987), Fränzle und Kuhnt (1983), Gawlik und Muntau (1999), Kuhnt et al. (1992) sowie Kuhnt und Muntau (Eds, 1994) auf die Auswahl von zu untersuchenden Böden und deren Lokalisierung. Verfahren zur Analyse und Ergänzung bestehender Depositionsmessnetze mit technischen Sammlern und Bioindikatoren (Moose, Fichtennadeln) entwickelten Außenthal et al. (1991) für das Bundesland Schleswig-Holstein. Für das Bundesgebiet wurden in Ergänzung zu der Auswahl der Hauptforschungsräume für das Ökosystemforschungsprogramm der Bundesrepublik Deutschland (Fränzle et al. 1987 b) Methoden zur Lokalisierung der Ergänzungsstationen des UBA-Immissionsmessnetzes entwickelt (Fränzle et al. 1987 a). Hierbei wurden geostatistische Verfahren kombiniert mit Methoden zur Bestimmung der ökologischen Repräsentanz mit Hilfe einer ökologischen

Raumgliederung / Ökosystemtypisierung sowie mit einem Maß für die räumliche Verteilung von Messstandorten. Dieses basiert auf dem Vergleich der tatsächlichen mittleren Entfernung der Standorte zu ihrem nächsten Nachbarn mit der theoretischen bei Verteilung im Raum.

5. Verknüpfung der Daten zur Exposition (Moosmonitoring, gemessene und modellierte Daten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition von Metallelementen) mit Daten über die Rezeptoren, d.h. mit Ökosystemtypen (Schröder et al. 2019 a).
6. Im Zusammenhang mit dem Vorschlag unter Ziffer 4 sollte auch die Modellierung insofern harmonisiert werden, als die LOTOS EUROS- und EMEP-Modellierung mit identischen Datensätzen erfolgt (Emissionen, Landnutzung und Meteorologie als Eingangsdaten und Daten des Moosmonitoring und der technischen Konzentrations- und Depositionsmessungen zur Validierung). Dies ermöglicht eine Analyse der Unterschiede in den räumlichen Belastungsmustern aufgrund intrinsischer Modellunsicherheiten besser, als wenn - wie derzeit üblich - verschiedene Eingangsdatensätze verwendet werden. Für die Frage, ob und inwieweit LOTOS-EUROS bei Cd und Pb eine Ergänzung oder Alternative zum EMEP-Modell darstellen kann, sollte neben direkten Vergleichen der Modellierungen auch ermittelt werden, welche Modellergebnisse die besseren Korrelationen zu den empirischen Daten aus dem technischen und biologischen Monitoring hervorbringt.
7. Nur durch einen integrativen Untersuchungsansatz wie unter den Ziffern 4 und 5 skizziert lässt sich erreichen, dass die Ergebnisse der Expositionsabschätzung mit Modellierungen, technischen Messungen und Moosmonitoring dazu beitragen, die Belastung der Ökosysteme durch atmosphärische Schwermetalleinträge differenzierter als bisher einzuschätzen und so eine gezielte Weiterentwicklung der Einstufung der expositionsbedingten ökologischen Belastungen und Risiken für Deutschland zu ermöglichen.
8. Zu einer methodisch unproblematischen Gesamtschau der mit unterschiedlichen Verfahren der Expositionscharakterisierung erzeugten Ergebnisse gelangt man, wenn diese in Perzentile (z.B. P10, P20, …) klassiert und den (z.B. 10) Perzentilen Rangwerte (z.B. von 1-10) zuordnet. Diese lassen sich im GIS räumlich und messgrößenspezifisch zu einer Synopse aggregieren. Es wird empfohlen, diese Belastungseinstufung und die aktualisierten, räumlich differenzierten Daten mit den Ergebnissen der Einstufung der Ökosystemintegrität repräsentativer Ökosysteme in Deutschland (Jenssen et al. 2021 a; Jenssen et al. 2021 b; Nickel et al. 2019; Schlutow & Schröder 2021; Schröder et al. 2019 b) und Critical Loads (Schlutow et al. 2021 a, 2021 b; Schröder et al. 2018 b) zu verknüpfen. Dies wäre ein signifikanter Fortschritt.

5 Quellenverzeichnis

Amodio M, Catino S, Dambruoso PR, de Gennaro G, Di Gilio A, Giungato P, Laiola E, Marzocca A, Mazzone A, Sardaro A, Tutino M 2014. Atmospheric Deposition: Sampling Procedures, Analytical Methods, and Main Recent Findings from the Scientific Literature. Advances in Meteorology, Volume 2014, Article ID 161730, 27 pp.

Außenthal R, Fränzle O, Gliesmann S, Heinrich U, Jensen-Huß K, Kirchhoff M, Rudolph H-J 1991. Erarbeitung und Erprobung einer Konzeption für die ökologisch orientierte Planung auf der Grundlage der regionalisierenden Umweltbeobachtung am Beispiel Schleswig-Holsteins. Untersuchungen der atmosphärischen Deposition in Schleswig-Holstein. Forschungsbericht 109 02 033 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Teilband zum Abschlussbericht, Kiel.

Bealey WJ, Long S, Spurgeon DJ, Leith I, Cape JN 2008. Review and implementation study of biomonitoring for assessment of air quality outcomes. Science Report - SC030175/SR2. Environment Agency, Bristol, pp. 1-170.

Brosius, F. (2013): SPSS 21. Mitp/bhv, Heidelberg.

Brümmer G, Fränzle, O, Kuhnt G, Kukowski H, Vetter L 1987. Fortschreibung der OECD-Prüfrichtlinie `Adsorption/Desorption' im Hinblick auf die Übernahme in Anhang V der EG-Richtlinie 79/831: Auswahl repräsentativer Böden im EG-Bereich und Abstufung der Testkonzeption nach Aussagekraft und Kosten. Forschungsbericht 106 02 045 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Abschlussbericht, Kiel.

Cassidy S, Dimova R, Giguère B, Spence J, Stanley D 2019. Failing grade: 89% of introduction-to-psychology textbooks that define or explain statistical significance do so incorrectly. Advances in Methods and Practices in Psychological Science. doi:10.1177/2515245919858072.

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.

Engardt M, Simpson D, Schwikowski M, Granat L 2017. Deposition of sulphur and nitrogen in Europe 1900–2050. Model calculations and comparison to historical observations Model. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 69:1-20.

Frahm JP 1998. Moose als Bioindikatoren. Wiesbaden: Quelle & Meyer GmbH & Co., 187 S.

Fränzle O, Klein A, Zölitz R 1987 a. Lokalisierung der Ergänzungsstationen des UBA-Immissionsmessnetzes. Forschungsbericht 101 04 043/02 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Abschlussbericht Teilvorhaben II, Kiel.

Fränzle O, Kuhnt D, Kuhnt G, Zölitz R 1987 b. Auswahl der Hauptforschungsräume für das Ökosystemforschungsprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 101 04 043/02 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Abschlussbericht Teilvorhaben I, Kiel.

Fränzle O, Kuhnt G 1983. Regional repräsentative Auswahl der Böden für eine Umweltprobenbank. Exemplarische Untersuchung am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 106 05 028 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. Abschlussbericht, Kiel.Gawlik BM, Muntau H 1999. Eurosoils II. Laboratory Reference Materials for Soil-related Studies. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999, ISBN 92-828-7882-1 © European Communities, 1999

Hansen K, Thimonier A, Clarke N, Staelens J, Zlinda D, Waldner P, Marchetto A 2013. Atmospheric deposition to forests. In: Ferretti M, Fischer R (eds): Forest monitoring. Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview on North America and Asia. Developments in Environmental Science 12:337-374.

Hoodaji M, Ataabadi M, Najafi P 2012. Biomonitoring of Airborne Heavy Metal Contamination. In: Mukesh K (ed): Air pollution – monitoring, modelling, health, control. IntechOpen. https://www.intechopen.com/books/air-pollution-monitoring-modellinghealth-and-control/biomonitoring-of-airborne-heavy-metal-contamination [Aufgerufen am: 13.06.2018].

ICP Modeling and Mapping (ed.) 2004-2013. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels. Print version German Federal Environmental Agency UBA-Texte 52/2004. Updated version 04/2013. URL: www.icpmapping.org [Aufgerufen am: 20.07.2015].

ICP Vegetation (International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops) 2020. Monitoring of atmospheric deposition of heavy metals, nitrogen and POPs in Europe using bryophytes. Monitoring manual 2020 survey. United Nations Economic Commission for Europe Convention on long-range transboundary air pollution. Bangor, Dubna:1-27.

Ilyin I, Rozovskaya O, Travnikov O, Varygina M, Aas W, Pfaffhuber KA 2016. Assessment of heavy metal transboundary pollution, progress in model development and mercury research. EMEP Status Report 2/2016. Meteorological Synthesizing Centre - East, Moscow, Russian Federation. http://www.msceast.org/reports/2_2016.pdf [Aufgerufen am 28.08.2018].

Ilyin I, Travnikov O, Schütze, G, Feigenspan S, Uhse K 2020. Country-scale assessment of heavy metal pollution: A case study for Germany. Meteorological Synthesizing Centre – East, Moscow, Russia; German Environment Agency, Dessau, Germany. Technical Report 1/2020:1-121.

Jacob D 1999. Introduction to Atmospheric Chemistry (1st ed.). Princeton University Press, pp. 75-85.

Jacobson MZ 2005. Fundamentals of Atmospheric Modelling. (2nd ed.), Cambridge, UK: Cambridge University Press, 656 pp.

Jensen U, Netscher S, Weller K (Hrsg) 2019. Forschungsdatenmanagement sozialwissenschaftlicher. Umfragedaten. Grundlagen und praktische Lösungen für den Umgang mit quantitativen Forschungsdaten. Verlag Barbara Burdich, Opladen, Berlin, Toronto. 233 S.

Jenssen M, Nickel S, Schütze G, Schröder, W 2021 a. Reference states of forest ecosystem types and feasibility of biocenotic indication of ecological soil condition as part of ecosystem integrity and services assessment. Environmental Sciences Europe 33(18):1-18. https://doi.org/10.1186/s12302-021-00458-2

Jenssen M, Nickel S, Schröder W 2021 b. Methodology for classifying the ecosystem integrity of forests in Germany using quantified indicators. Environmental Sciences Europe. DOI: 10.1186/s12302-021-00478-y (in press).

Kuhnt G, Muntau H (Ed) 1994. Euro-soils. Identification, collection, treatment and characterization, special publication no. 1.94.60. Joint Research Centre. European Commission, ISPRA.

Markert BA, Breure AM, Zechmeister HG (eds) 2003. Bioindicators and biomarkers: Principles, concepts, and applications. Amsterdam: Elsevier, 1014 pp.

Mohr K 2007. Biomonitoring von Stickstoffimmissionen. Möglichkeiten und Grenzen von Bioindikationsverfahren. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 19:255-264.

Nachtigall C, Wirtz M A 2004. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik (3. Aufl.). Weinheim: Juventa Verlag.

Nagel HD, Gregor HD (Hrsg.) 1999. Ökologische Belastungsgrenzen - Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Berlin: Springer.

Nickel S 2019. Methodologie integrativer Analyse, Modellierung und Management umweltwissenschaftlicher Daten für landschaftsökologische Forschung und Lehre am Beispiel der Exposition von Wäldern gegenüber atmosphärischen Stoffeinträgen und daraus resultierender Veränderungen der Ökosystemintegrität in Kombination mit dem Klimawandel. Habilitationsschrift, Universität Vechta.

Nickel S, Schröder W 2018. Kleinräumige Untersuchungen zum Einfluss des Kronentraufeffekts auf Element-konzentrationen in Moosen. In: Schröder W, Fränzle O, Müller F (Hg): Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. Kap. V-1.10. 25. Erg.Lfg., Wiley-VCH, Weinheim:1-35.

Nickel S, Schröder W, Völksen B 2019. Validating the map of current semi-natural ecosystem types in Germany and their upscaling using the Kellerwald-Edersee National Park as an example. Environmental Sciences Europe 31(90):1-20.

Nickel S, Schröder W, Schmalfuss R, Saathoff M, Harmens H, Mills G, Frontasyeva MV, Barandovski L, Blum O, Carballeira A, de Temmerman L, Dunaev AM, Ene A, Fagerli H, Godzik B, Ilyin I, Jonkers S, Jeran Z, Lazo P, Leblond S, Liiv S, Mankovska B, Nunez Olivera E, Piispanen J, Poikolainen J, Popescu I V, Qarri F, Santamaria JM,Schaap M,Skudnik M,Špiric Z, Stafilov T, Steinnes E, Stihi C, Suchara I, Uggerud HT, Zechmeister HG 2018. Modelling spatial patterns of correlations between concentrations of heavy metals in mosses and atmospheric deposition in 2010 across Europe. Environmental Sciences Europe 30(53):1-17.

R Core Team (2018): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/ (14.08.2020).

Rühling Å (ed) 1994. Atmospheric heavy metal deposition in Europe – estimation based on moss analysis. Nordic Council of Ministers. NORD 9:1-53.

Sachs, L.; Hedderich, J. (2009): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Springer, Berlin.

Schaap M, Hendriks C, Jonkers S, Builtjes P 2018 a. Impacts of Heavy Metal Emission on Air Quality and Ecosystems across Germany – Sources, Transport, Deposition and potential Hazards, Part 1: Assessment of the atmospheric heavy metal deposition to terrestrial ecosystems in Germany, Texte 106/2018, Umweltbundesamt, Dessau Roßlau.

Schaap M, Hendriks C, Kranenburg R, Kuenen J, Segers A, Schlutow A, Nagel HD, Ritter A, Banzhaf S 2018 b. PINETI-III: Modellierung und Kartierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystemspezifischen Gefährdung von Biodiversität in Deutschland. Abschlussbericht FKZ 3714 64 2010149. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 149 S.

Schlutow A, Schröder W, Nickel S 2021 a. Atmospheric Deposition and Element Accumulation in Moss Sampled across Germany 1990-2015: Trends and Relevance for Ecological Integrity and Human Health. Atmosphere 12(2): 193:1-30. https://doi.org/10.3390/atmos12020193.

Schlutow A, Schröder W, Scheuschner T 2021 b. Assessing the relevance of atmospheric heavy metal deposition with regard to ecosystem integrity and human health in Germany. Environmental Sciences Europe 33(7):1-34. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00391-w.

Schröder W, Nickel S 2019. Spatial structures of heavy metals and nitrogen accumulation in moss specimens sampled between 1990 and 2015 throughout Germany. Environmental Science Europe 31(33):1-15

Schröder W, Nickel S 2018 a. Mapping percentile statistics of element concentrations in moss specimens collected from 1990 to 2015 in forests throughout Germany. Atmospheric Environment 190:161-168.

Schröder W, Nickel S 2020. Research data management as an integral part of the research process of empirical disciplines using landscape ecology as an example. Data Science Journal 19(26): 1-14. DOI: https://doi.org/10.5334/dsj-2020-026.

Schröder W, Nickel S, Schlutow A, Nagel H-D, Scheuschner T 2018 b: Auswirkungen der Schwermetall - Emissionen auf Luftqualität und Ökosysteme in Deutschland - Quellen, Transport, Eintrag,

Gefährdungspotenzial. Teil 2: Integrative Datenanalyse, Erheblichkeitsbeurteilung und Untersuchung der gegenwärtigen Regelungen und Zielsetzungen in der Luftreinhaltung und Vergleich mit ausgewählten Anforderungen, die sich in Bezug auf den atmosphärischen Schadstoffeintrag aus den verschiedenen Rechtsbereichen ergeben. Abschlussbericht, Forschungskennzahl 3713 63 253, UBA-FB 002635. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-TEXTE 107/2018:1-257.

Schröder W, Nickel S, Schönrock S, Schmalfuß R, Wosniok W, Meyer M, Harmens H, Frontasyeva MV, Alber R, Aleksiayenak J, Barandovski L, Blum O, Carballeira A, Dam M, Danielsson H, de Temmermann L, Dunaev AM, Godzik B, Hoydal K, Jeran Z, Pihl Karlsson G, Lazo P, Leblond S, Lindroos J, Liiv S, Magnússon SH, Mankovska B, Núñez-Olivera E, Piispanen J, Poikolainen J, Popescu IV, Qarri F, Santamaria JM, Skudnik M, špiric Z, Stafilov T, Steinnes E, Stihi C, Suchara I, Thöni L, Uggerud HT, Zechmeister HG 2017. Bioindication and modelling of atmospheric deposition in forests enable exposure and effect monitoring at high spatial density across scales. Annals of Forest Science 74, 31:1-23.

Schröder W, Nickel S, Jenssen M, Hofmann G, Schlutow A, Nagel H-D, Burkhard B, Dworczyk C, Elsasser P, Lorenz M, Meyerhoff J, Weller P, Altenbrunn K 2019 a. Anwendung des Bewertungskonzepts für die Ökosystemintegrität unter Berücksichtigung des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen. UBA-Texte 97/2019:1-504

Schröder W, Nickel S, Völksen B, Dreyer A, Wosniok W 2019 b. Nutzung von Bioindikationsmethoden zur Bestimmung und Regionalisierung von Schadstoffeinträgen für eine Abschätzung des atmosphärischen Beitrags zu aktuellen Belastungen von Ökosystemen. UBA-Texte 91/2019 B1:1-189, Bd. 2:1-296.

Schröder W, Pesch R, Schönrock S, Harmens H, Mills G, Fagerli H 2014. Mapping correlations between nitrogen concentrations in atmospheric deposition and mosses for natural landscapes in Europe. Ecological Indicators 36:563-571.

Shapiro S S; Wilk M B 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika 52(3/4):591-611.

Steinnes E 1977. Atmospheric Deposition of Trace Elements in Norway Studied by Means of Moss Analysis. Kjeller Report, KR 154, Institute for Atomenegri, Kjeller, Norway.

Torseth K, Aas W, Breivik K, Fjaeraa AM, Fiebig M, Hjellbrekke AG, Myhre CL, Solberg S, Yttri KE 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. Atmospheric Chemistry and Physics 12:5447-5481.

Anhang: Statistische Datenanalysen - Tabellen, Diagramme, Karten

Kürzel der verwendeten Datensätze (Legende zu den Anhängen A-D)

Modellierte Daten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition	
01	Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]
02	Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 50 km x 50 km)[1)]
03	Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]
04	Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°)[2)]
05	Jahres-Gesamtdeposition von Cd, Hg, Pb (EMEP 0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch)[2)]
Technische Messdaten zur atmosphärischen Konzentration und Deposition	
06	Mittlere Konzentration von Cd, Hg, Pb [2)]
07	Nasse Deposition von Cd, Hg, Pb [2)]
08	Bulk-Deposition von Cd, Hg, Pb [3)]
09	Bulk-Deposition von Cd, Pb (3 zusätzliche ICP Forests Level II-Standorte und 1 hessischer Standort, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt)
Bioindikationsdaten	
10	Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, Beprobungsjahr 2016)[4)]
11	Konzentrationen von Cd, Hg, Pb in Moosen (Moos-Monitoring 2015, geostatistische Flächenschätzungen, 3 km x 3 km)

[1)] http://en.msceast.org/index.php/pollution-assessment/emep-domain-menu/data-hm-pop-menu (27.04.2018)

[2)] Datenlieferung MSC-East vom 24.09.2020 (davon Datensätze 06, 07 = in Ilyin et al. (2020) für die Modellvalidierung verwendete Daten aus Messnetzen des Bundes und der Länder)

[3)] aus Ilyin et al. (2020: ANNEX B) entnommene Werte, = Daten aus Messnetzen der Bundesländer

[4)] http://www.mapserver.uni-vechta.de/mossEU/login.php (29.09.2020)

A Anhang: Deskriptive Statistik

A.1 Messdaten zu Schwermetallkonzentrationen in Moosen

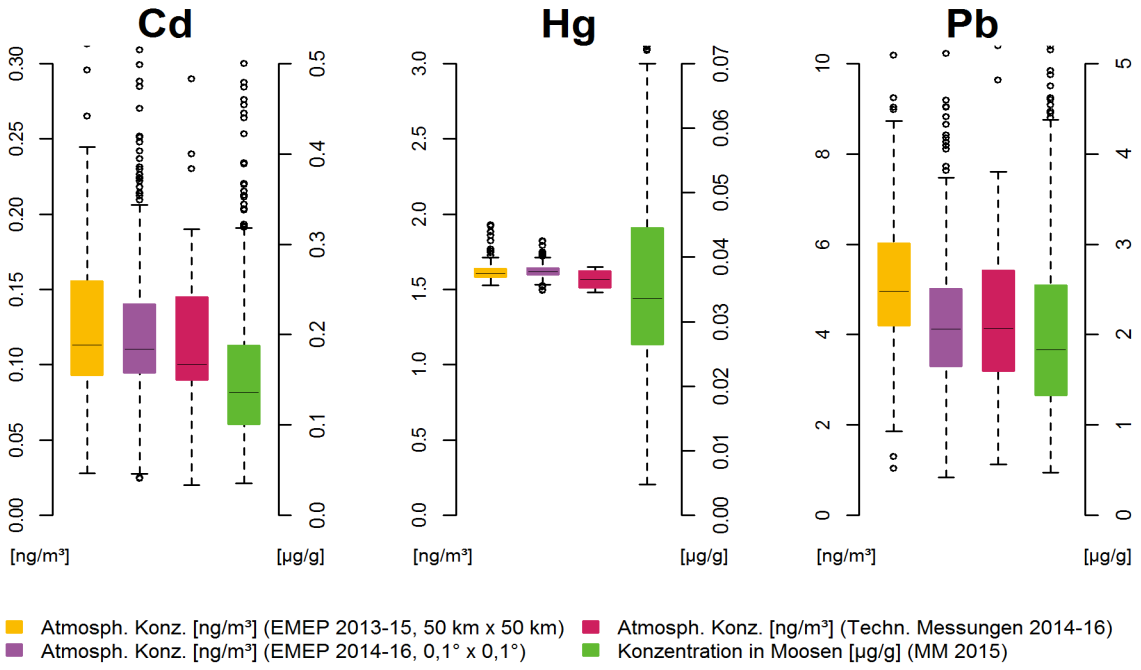
Tabelle A.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte der Konzentration von Pb, Cd und Hg in Moosen des MM 2015 (Messdaten 2016 und geostatistische Flächenschätzungen)

Merkmal	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Gehalt in Moosen 2016	398	0,0350	0,0944	0,1360	0,2619	0,4743	1,7600	0,1656	0,1257	[3]
Cd-Gehalt in Moosen 2016, Flächenschätzung	39718	0,0786	0,1140	0,1329	0,1760	0,2210	0,2366	0,1384	0,0292	[3]
Hg-Gehalt in Moosen 2016	397	0,0047	0,0246	0,0336	0,0540	0,0702	0,1960	0,0367	0,0169	[3]
Hg-Gehalt in Moosen 2016, Flächenschätzung	39718	0,0167	0,0281	0,0343	0,0436	0,0487	0,0682	0,0347	0,0069	[2]
Pb-Gehalt in Moosen 2016	400	0,470	1,228	1,830	4,334	9,094	19,340	2,370	1,944	[3]
Pb-Gehalt in Moosen 2016, Flächenschätzung	39718	1,115	1,545	1,843	2,616	3,291	4,017	1,951	0,471	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [µg g^{-1}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 10 und 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung A1.1: Verteilungen zweier Modellierungen und technisch gemessener atmosphärischer Konzentrationen von Cd, Hg und Pb (linke Skalen) sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in Moosen in Deutschland (rechte Skalen)

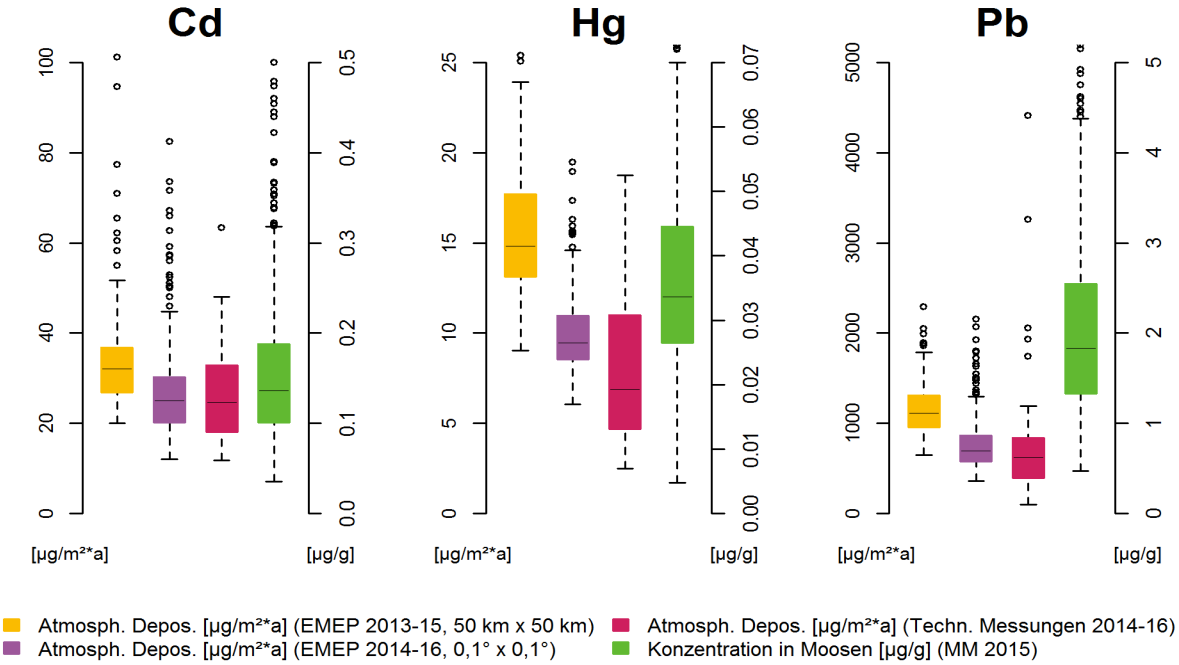
Graphischer Vergleich von Medianwerten und Verteilungen aus den Tabellen A2.1, A2.2, A.4 und A.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 06, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung A.1.2: Verteilungen zweier Modellierungen und technisch gemessener atmosphärischer Depositionen von Cd, Hg und Pb (linke Skalen) sowie gemessener Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in Moosen in Deutschland (rechte Skalen)

Graphischer Vergleich von Medianwerten und Verteilungen aus den Tabellen A.3.1, A.3.2, A.5.1 und A.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 07, 10 in **Tabelle 1**.

A.2 Modellierte mittlere Schwermetallkonzentrationen in der Atmosphäre

Tabelle A.2.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (EMEP 50 km x 50 km, 2013-2015)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Konzentration 2013 (50 km x 50 km)	202	0,0512	0,0952	0,1121	0,1622	0,1862	0,2249	0,1205	0,0294	[3]
Cd-Konzentration 2014 (50 km x 50 km)	202	0,0510	0,0928	0,1163	0,1651	0,1767	0,1933	0,1213	0,0304	[3]
Cd-Konzentration 2015 (50 km x 50 km)	202	0,0587	0,0857	0,0986	0,1189	0,1326	0,1504	0,0990	0,0162	[3]
Cd-Konzentration 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	0,0556	0,0959	0,1074	0,1376	0,1585	0,1591	0,1107	0,0194	[3]
Cd-Konzentration 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	0,0539	0,0963	0,1066	0,1455	0,159	0,1807	0,1139	0,0222	[3]
Hg-Konzentration 2013 (50 km x 50 km)	202	1,57735	1,6174	1,6553	1,6797	1,6931	1,7194	1,6481	0,0306	[3]
Hg-Konzentration 2014 (50 km x 50 km)	202	1,6059	1,6364	1,6672	1,6877	1,7012	1,722	1,6636	0,0237	[3]
Hg-Konzentration 2015 (50 km x 50 km)	202	1,4418	1,4724	1,4995	1,5185	1,5354	1,5528	1,4958	0,0222	[3]
Hg-Konzentration 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	1,52385	1,5567	1,5831	1,6031	1,6171	1,6374	1,5797	0,0229	[3]
Hg-Konzentration 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	1,5416	1,5769	1,6085	1,6288	1,6415	1,6647	1,6026	0,0252	[3]
Pb-Konzentration 2013 (50 km x 50 km)	202	1,8716	3,8571	4,5919	6,2417	6,8754	8,3992	4,7492	1,0292	[3]
Pb-Konzentration 2014 (50 km x 50 km)	202	2,0937	4,1071	4,8959	5,9109	7,193	8,0699	4,9057	0,9784	[3]
Pb-Konzentration 2015 (50 km x 50 km)	202	2,5935	3,8266	5,1229	6,5431	7,0697	7,2369	5,1116	1,1118	[3]
Pb-Konzentration 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	2,32915	4,1506	4,9084	6,1319	6,8976	7,6534	5,0234	0,9584	[3]
Pb-Konzentration 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	2,2117	4,1493	4,9588	5,8894	7,1653	7,5655	4,9543	0,9200	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [ng m^{-3}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 01 in **Tabelle 1**.

Tabelle A2.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter mittlerer Konzentrationen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (EMEP 0,1° x 0,1°, 2014-2016)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Konzentration 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0195	0,0890	0,1070	0,171	0,2595	0,4422	0,1184	0,0464	[3]
Cd-Konzentration 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0213	0,0929	0,1117	0,1774	0,2637	0,4267	0,1236	0,0467	[3]
Cd-Konzentration 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0216	0,0896	0,1096	0,1775	0,2707	0,4469	0,1218	0,0490	[3]
Cd-Konzentration 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0211	0,0912	0,1091	0,1746	0,2615	0,4344	0,1210	0,0464	[3]
Cd-Konzentration 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0217	0,0914	0,1107	0,1774	0,2649	0,4368	0,1227	0,0478	[3]
Cd-Konzentration 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,0213	0,0907	0,1092	0,1755	0,2647	0,4386	0,1213	0,0472	[3]
Hg-Konzentration 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4841	1,6193	1,6437	1,7053	1,7665	2,0187	1,6496	0,0454	[3]
Hg-Konzentration 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4604	1,5532	1,579	1,6264	1,6793	1,8929	1,5822	0,0375	[3]
Hg-Konzentration 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4826	1,6032	1,6254	1,6789	1,7413	2,0020	1,6308	0,0416	[3]
Hg-Konzentration 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4743	1,5864	1,6124	1,6644	1,7246	1,9558	1,6159	0,0409	[3]
Hg-Konzentration 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4736	1,5782	1,6024	1,6522	1,7112	1,9229	1,6065	0,0393	[3]
Hg-Konzentration 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	1,4771	1,592	1,6168	1,6688	1,7304	1,9515	1,6209	0,0410	[3]
Pb-Konzentration 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	0,7216	3,0954	3,9971	6,5624	10,2785	21,3868	4,4295	1,9541	[3]
Pb-Konzentration 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	0,7494	3,2661	4,1385	6,5026	10,3397	18,7125	4,5142	1,8654	[3]
Pb-Konzentration 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,6959	2,9089	3,7378	6,0169	9,6819	18,8387	4,1033	1,7859	[3]
Pb-Konzentration 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	0,7651	3,1906	4,0849	6,4738	10,2874	20,0496	4,4718	1,8987	[3]

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Pb-Konzentration 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,7357	3,0884	3,9451	6,2518	10,0079	18,7756	4,3087	1,8225	[3]
Pb-Konzentration 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	0,7462	3,0936	3,9719	6,2964	10,1097	19,646	4,349	1,858	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [ng m^{-3}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 03 in **Tabelle 1**.

A.3 Modellierte atmosphärische Jahres-Gesamtdepositionen von Schwermetallen

Tabelle A.3.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg (EMEP (50 km x 50 km, 2013-2015)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Deposition 2013 (50 km x 50 km)	202	22,480	29,153	32,116	40,408	43,453	72,315	33,633	5,679	[3]
Cd-Deposition 2014 (50 km x 50 km)	202	20,778	25,300	32,905	42,455	44,974	62,150	33,085	7,521	[3]
Cd-Deposition 2015 (50 km x 50 km)	202	20,735	24,057	26,663	30,438	32,986	40,453	26,958	2,981	[3]
Cd-Deposition 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	20,528	25,951	28,474	36,620	39,720	51,302	30,013	4,472	[3]
Cd-Deposition 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	20,931	26,951	29,685	37,045	41,081	58,306	31,196	4,744	[3]
Hg-Deposition 2013 (50 km x 50 km)	202	10,672	14,118	16,108	17,687	19,765	22,071	15,672	1,925	[3]
Hg-Deposition 2014 (50 km x 50 km)	202	11,993	13,126	14,890	17,109	18,436	19,793	14,871	1,619	[3]
Hg-Deposition 2015 (50 km x 50 km)	202	10,777	12,324	13,313	14,772	16,805	18,724	13,409	1,254	[3]
Hg-Deposition 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	11,472	12,880	13,823	15,917	16,920	19,259	14,121	1,413	[3]

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Hg-Deposition 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	11,124	13,550	14,508	16,397	17,868	20,196	14,649	1,508	[3]
Pb-Deposition 2013 (50 km x 50 km)	202	791,25	990,47	1137,66	1409,55	1495,02	1963,62	1161,60	185,70	[3]
Pb-Deposition 2014 (50 km x 50 km)	202	671,72	919,12	1059,17	1225,82	1281,16	1448,09	1053,89	143,22	[3]
Pb-Deposition 2015 (50 km x 50 km)	202	770,64	905,85	1067,08	1224,11	1354,49	1477,58	1061,89	153,69	[3]
Pb-Deposition 2014-2015 (50 km x 50 km)	202	741,45	945,04	1084,62	1210,07	1253,34	1323,68	1057,07	126,61	[3]
Pb-Deposition 2013-2015 (50 km x 50 km)	202	738,03	958,26	1121,31	1276,71	1347,51	1478,28	1102,08	149,61	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [µg m^{-2} a^{-1}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 02 in **Tabelle 1**.

Tabelle A.3.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte modellierter atmosphärischer Depositionen von Pb, Cd und Hg (EMEP 0,1° x 0,1°, 2014-2016)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Deposition 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	9,845	18,421	22,634	33,216	53,344	85,982	24,518	8,567	[3]
Cd-Deposition 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	7,958	17,373	21,385	32,493	51,877	89,565	23,445	8,816	[3]
Cd-Deposition 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	9,641	19,024	23,555	34,627	54,232	88,467	25,346	8,942	[3]
Cd-Deposition 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	8,902	18,001	21,929	32,813	52,641	86,484	23,982	8,596	[3]
Cd-Deposition 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	8,799	18,321	22,436	33,359	53,086	88,601	24,395	8,750	[3]
Cd-Deposition 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	9,148	18,413	22,446	33,181	53,523	86,868	24,436	8,644	[3]
Hg-Deposition 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	4,478	7,908	9,032	12,203	14,851	24,304	9,499	2,107	[3]
Hg-Deposition 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	4,016	7,422	8,588	11,383	14,254	20,895	8,906	1,944	[3]
Hg-Deposition 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	4,874	8,226	9,464	12,775	15,935	24,311	9,919	2,206	[3]
Hg-Deposition 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	4,403	7,730	8,814	11,734	14,446	22,585	9,202	1,953	[3]
Hg-Deposition 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	4,528	7,880	9,032	12,006	15,046	22,422	9,412	2,004	[3]
Hg-Deposition 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	4,560	7,930	9,005	12,057	14,879	23,040	9,441	2,001	[3]
Pb-Deposition 2014 (0,1° x 0,1°)	4818	286,37	537,49	656,99	1027,83	1539,80	3472,30	724,40	261,90	[3]
Pb-Deposition 2015 (0,1° x 0,1°)	4818	207,31	499,85	619,20	956,77	1401,37	3037,93	676,40	245,29	[3]
Pb-Deposition 2016 (0,1° x 0,1°)	4818	241,70	508,72	620,67	930,05	1275,87	3419,21	669,67	221,10	[3]
Pb-Deposition 2014-2015 (0,1° x 0,1°)	4818	256,19	520,38	639,39	984,84	1453,61	3158,11	700,40	249,43	[3]
Pb-Deposition 2015-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	232,10	508,70	619,76	933,06	1332,53	3131,56	673,03	228,79	[3]
Pb-Deposition 2014-2016 (0,1° x 0,1°)	4818	256,42	520,57	631,14	960,35	1404,51	3245,14	690,16	237,51	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [µg m^{-2} a^{-1}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 04 in **Tabelle 1**.

A.4 Technische Messdaten zu atmosphärischen Schwermetallkonzentrationen

Tabelle A.4: Deskriptiv-statistische Kennwerte der Mittelwerte der Konzentrationen aus technischen Messungen von Pb, Cd und Hg in der Atmosphäre (2014-2016, bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Konzentration 2014	96	0,0289	0,1118	0,1504	0,2503	0,3336	0,4384	0,1659	0,0707	[3]
Cd-Konzentration 2015	99	0,0320	0,0876	0,1161	0,1859	0,2376	0,3217	0,1258	0,0500	[2]
Cd-Konzentration 2016	96	0,0209	0,0848	0,1109	0,1853	0,2808	0,2987	0,1228	0,0536	[3]
Cd-Konzentration 2014-2015	94	0,0305	0,1008	0,1350	0,2134	0,2675	0,3681	0,1449	0,0559	[2]
Cd-Konzentration 2015-2016	92	0,0265	0,0870	0,1072	0,1694	0,2513	0,2982	0,1221	0,0492	[2]
Cd-Konzentration 2014-2016	88	0,0273	0,0960	0,1222	0,1929	0,2764	0,3449	0,1359	0,0544	[3]
Hg-Konzentration 2014	17	0,7906	1,3618	1,4428	1,6726	1,7252	1,7361	1,4290	0,2229	[3]
Hg-Konzentration 2015	16	0,4680	1,403	1,4948	1,6658	1,8306	1,8912	1,4570	0,2989	[3]
Hg-Konzentration 2016	18	0,4743	1,2004	1,4268	1,6696	2,3425	2,625	1,3964	0,4595	[3]
Hg-Konzentration 2014-2015	16	0,6293	1,3521	1,4764	1,6682	1,6997	1,7127	1,4453	0,2525	[3]
Hg-Konzentration 2015-2016	13	0,4711	1,3741	1,4844	1,6460	1,9273	2,0140	1,4506	0,3428	[3]
Hg-Konzentration 2014-2016	13	0,5776	1,3587	1,4781	1,6671	1,7978	1,8348	1,4377	0,2934	[3]
Pb-Konzentration 2014	88	1,3159	3,7923	5,1095	10,3374	17,7393	27,9645	6,1339	4,1818	[3]
Pb-Konzentration 2015	95	1,2259	3,0159	4,4200	7,5599	14,3919	43,2000	5,1825	4,6842	[3]
Pb-Konzentration 2016	88	1,0199	3,0339	3,8249	7,9559	15,2480	30,8999	5,0407	3,9524	[3]
Pb-Konzentration 2014-2015	86	1,2709	3,3944	4,7934	8,8172	16,4351	34,0657	5,7059	4,3111	[3]
Pb-Konzentration 2015-2016	84	1,1229	3,0930	4,1399	7,4454	15,4629	37,0500	5,1085	4,3889	[3]
Pb-Konzentration 2014-2016	80	1,1873	3,2641	4,4162	7,9092	17,0436	33,0104	5,4230	4,2452	[3]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [ng m^{-3}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 06 in **Tabelle 1**.

A.5 Technische Messdaten zu atmosphärischen Schwermetalldepositionen

Tabelle A.5.1: Deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur nassen Deposition von Cd, Hg und Pb (2014-2016, bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Deposition 2014	55	13,800	21,640	28,500	303,000	450,760	780,000	83,966	145,299	[3]
Cd-Deposition 2015	70	6,060	15,180	22,650	89,190	246,820	431,000	45,790	68,469	[3]
Cd-Deposition 2016	45	8,250	10,280	18,300	37,360	183,880	645,000	35,167	94,691	[3]
Cd-Deposition 2014-2015	53	11,530	18,370	26,950	206,900	399,600	475,500	65,177	101,020	[3]
Cd-Deposition 2015-2016	44	7,640	11,748	19,450	38,675	243,450	538,000	36,752	82,315	[3]
Cd-Deposition 2014-2016	33	11,800	16,264	24,430	47,204	282,799	483,330	43,254	83,656	[3]
Hg-Deposition 2014	30	2,510	3,410	4,555	14,337	15,959	17,600	7,070	4,588	[3]
Hg-Deposition 2015	32	2,520	4,770	6,720	15,208	28,365	37,690	8,698	6,877	[2]
Hg-Deposition 2016	30	2,400	4,100	7,810	14,266	17,831	19,310	8,551	4,757	[2]
Hg-Deposition 2014-2015	29	2,530	4,676	6,410	13,574	19,544	20,910	8,092	4,589	[2]
Hg-Deposition 2015-2016	32	2,460	4,324	6,790	14,966	21,645	22,730	8,260	5,104	[2]
Hg-Deposition 2014-2016	29	2,490	4,492	6,870	13,702	17,507	18,750	8,093	4,337	[2]
Pb-Deposition 2014	69	120,00	232,00	570,00	2212,00	3051,60	14800,00	991,99	1833,36	[3]
Pb-Deposition 2015	77	90,00	230,00	410,00	1644,00	4466,80	7110,00	778,69	1123,02	[3]
Pb-Deposition 2016	55	60,00	118,00	300,00	968,00	2120,80	3530,00	472,40	579,99	[2]
Pb-Deposition 2014-2015	65	115,00	239,00	525,00	1931,00	4293,60	10455,00	924,89	1436,07	[3]
Pb-Deposition 2015-2016	53	85,00	184,00	380,00	1049,00	4049,00	5320,00	628,78	898,15	[2]
Pb-Deposition 2014-2016	41	96,66	250,00	586,66	1193,33	5070,00	7696,66	865,35	1305,04	[2]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [µg m^{-2} a^{-1}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 07 in **Tabelle 1**.

Tabelle A.5.2: Deskriptiv-statistische Kennwerte der technischen Messdaten zur Bulk-Deposition von Cd und Pb (2014-2016, aus Ilyin et al. 2020: Tabellen B1-B6 übernommene Daten)

Merkmal*	n	Min	P20	P50	P90	P98	Max	MW	SD	VT
Cd-Deposition 2014	85	13,000	20,340	29,600	73,840	173,532	201,60	41,597	37,301	[3]
Cd-Deposition 2015	85	9,700	19,560	33,300	116,020	188,484	203,40	50,273	44,843	[3]
Cd-Deposition 2016	84	7,200	22,800	31,750	80,880	212,550	665,50	49,956	78,303	[3]
Cd-Deposition 2014-2015	80	14,400	24,040	35,350	101,550	138,352	194,45	46,185	34,103	[3]
Cd-Deposition 2015-2016	83	9,950	22,850	35,700	94,830	182,930	371,20	50,189	50,762	[2]
Cd-Deposition 2014-2016	79	12,260	24,784	36,100	77,514	134,265	229,630	44,857	33,181	[3]
Pb-Deposition 2014	85	385,00	665,80	1144,00	3210,80	8874,48	12146,0	1740,94	1902,10	[3]
Pb-Deposition 2015	85	341,00	737,20	1176,00	2817,20	4525,48	9395,0	1489,49	1267,60	[2]
Pb-Deposition 2016	84	211,00	576,20	1219,00	2293,70	5780,28	9030,0	1394,49	1343,24	[3]
Pb-Deposition 2014-2015	80	415,50	786,40	1203,75	2846,15	6141,61	10770,5	1612,17	1539,07	[3]
Pb-Deposition 2015-2016	83	302,50	705,80	1237,50	2378,20	5128,20	9212,5	1444,09	1274,21	[2]
Pb-Deposition 2014-2016	79	347,33	704,93	1227,33	2700,40	5638,85	10190,3	1542,37	1459,27	[2]

n = Stichprobengröße; Kennwerte [µg m^{-2} a^{-1}]: Min = Minimum; P20 = 20. Perzentil; P50 = 50. Perzentil; P90 = 90. Perzentil; P98 = 98. Perzentil; Max = Maximum; MW = arithmetisches Mittel; SD = Standardabweichung; VT = Verteilung; [1] = Normalverteilung; [2] = Lognormalverteilung; [3] = andere Verteilung; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensatz 08 in **Tabelle 1**.

B Anhang: Korrelationsanalyse

B.1 Korrelationen zwischen modellierten mittleren Konzentrationen von Schwermetallen in der Atmosphäre (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM2015)

Tabelle B.1.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015)

Atmosphärische Konzentration (EMEP)*				Gehalte im Moos		
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	50 km x 50 km			0,1° x 0,1°		
Stichprobengröße	181	182	182	394	393	396
Korrelation (Spearman)						
Konzentration 2013	0,18 *	---	0,29 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014	---	---	0,23 **	0,10 *	0,17 **	0,19 **
Konzentration 2015	---	---	0,22 **	0,13 **	0,16 **	0,20 **
Konzentration 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,12 *	0,17 **	0,20 **
Konzentration 2013-2015	---	---	0,26 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014-2015	---	---	0,23 **	0,12 *	0,17 **	0,19 **
Konzentration 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,13 *	0,17 **	0,20 **
Konzentration 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,12 *	0,17 **	0,20 **
Korrelation (Pearson)						
Konzentration 2013	---	---	0,22 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014	---	---	0,21 **	0,1 *	0,11 *	0,23 **
Konzentration 2015	---	---	0,24 **	0,11 *	0,10 *	0,25 **
Konzentration 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,12 *	0,10 *	0,25 **
Konzentration 2013-2015	---	---	0,24 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014-2015	---	---	0,23 **	0,11 *	0,11 *	0,24 **
Konzentration 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,11 *	0,10 *	0,25 **
Konzentration 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,11 *	0,11 *	0,24 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; k.A. = keine Angabe (fehlende EMEP-Informationen); * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.1.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte mittlere Konzentrationen von Cd, Hg und Pb in der Atmosphäre (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km)

Atmosphärische Konzentration (EMEP)*	Gehalte im Moos (3 km x 3 km)					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	50 km x 50 km			0,1° x 0,1°		
Stichprobengröße	201	201	201	4018	4018	4018
Korrelation (Spearman)						
Konzentration 2013	0,35 **	---	0,35 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014	0,29 **	---	0,35 **	0,20 **	0,31 **	0,40 **
Konzentration 2015	---	---	0,18 *	0,25 **	0,28 **	0,42 **
Konzentration 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,23 **	0,32 **	0,42 **
Konzentration 2013-2015	0,30 **	---	0,32 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014-2015	0,22 **	---	0,27 **	0,22 **	0,30 **	0,41 **
Konzentration 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,24 **	0,30 **	0,42 **
Konzentration 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,23 **	0,31 **	0,41 **
Korrelation (Pearson)						
Konzentration 2013	0,35 **	---	0,35 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014	0,31 **	---	0,34 **	0,42 **	0,28 **	0,57 **
Konzentration 2015	---	---	0,18 *	0,45 **	0,25 **	0,59 **
Konzentration 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,46 **	0,26 **	0,59 **
Konzentration 2013-2015	0,34 **	---	0,30 **	k.A.	k.A.	k.A.
Konzentration 2014-2015	0,28 **	---	0,27 **	0,44 **	0,27 **	0,59 **
Konzentration 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,45 **	0,26 **	0,59 **
Konzentration 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,44 **	0,27 **	0,59 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; k.A. = keine Angabe (fehlende EMEP-Informationen); * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**.

B.2 Korrelationen zwischen modellierten atmosphärischen Schwermetalldepositionen (EMEP) und Konzentrationen in Moosen (MM 2015)

Tabelle B.2.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	50 km x 50 km			0,1° x 0,1°		
Stichprobengröße	181	182	182	394	393	396
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2013	0,18 *	---	0,34 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014	0,17 *	---	0,18 *	0,16 **	---	0,26 **
Deposition 2015	0,15 *	---	0,19 *	0,14 **	---	0,23 **
Deposition 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,18 **	---	0,24 **
Deposition 2013-2015	0,16 *	---	0,27 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014-2015	0,16 *	---	0,21 **	0,15 **	---	0,25 **
Deposition 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,16 **	---	0,24 **
Deposition 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,16 **	---	0,25 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2013	0,17 *	---	0,3 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014	---	---	0,18 *	0,16 **	---	0,25 **
Deposition 2015	0,15 *	---	0,29 **	0,12 *	---	0,25 **
Deposition 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,16 **	---	0,28 **
Deposition 2013-2015	0,16 *	---	0,3 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014-2015	0,15 *	---	0,25 **	0,14 **	---	0,26 **
Deposition 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,14 **	---	0,27 **
Deposition 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,15 **	---	0,27 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; k.A. = keine Angabe (fehlende EMEP-Informationen); * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg und Pb (EMEP) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos (3 km x 3 km)					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	50 km x 50 km			0,1° x 0,1°		
Stichprobengröße	201	201	201	4018	4018	4018
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2013	0,44 **	---	0,43 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014	0,31 **	---	0,35 **	0,24 **	---	0,38 **
Deposition 2015	0,21 **	0,15 *	---	0,19 **	---	0,32 **
Deposition 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,24 **	---	0,32 **
Deposition 2013-2015	0,39 **	---	0,43 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014-2015	0,35 **	0,15 *	0,31 **	0,21 **	---	0,36 **
Deposition 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,22 **	---	0,33 **
Deposition 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,22 **	---	0,35 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2013	0,44 **	---	0,41 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014	0,3 **	---	0,34 **	0,36 **	---	0,45 **
Deposition 2015	0,26 **	---	0,14 *	0,3 **	---	0,42 **
Deposition 2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,37 **	---	0,44 **
Deposition 2013-2015	0,4 **	---	0,39 **	k.A.	k.A.	k.A.
Deposition 2014-2015	0,35 **	---	0,3 **	0,33 **	---	0,45 **
Deposition 2015-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,34 **	---	0,44 **
Deposition 2014-2016	k.A.	k.A.	k.A.	0,35 **	---	0,45 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; k.A. = keine Angabe (fehlende EMEP-Informationen); * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.3: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	394	393	396	391	390	393
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,16 **	---	0,26 **	0,21 **	0,10 *	0,21 **
Deposition 2015	0,14 **	---	0,23 **	0,20 **	---	0,19 **
Deposition 2016	0,18 **	---	0,24 **	0,22 **	---	0,21 **
Deposition 2014-2015	0,15 **	---	0,25 **	0,21 **	---	0,21 **
Deposition 2015-2016	0,16 **	---	0,24 **	0,21 **	---	0,20 **
Deposition 2014-2016	0,16 **	---	0,25 **	0,21 **	---	0,21 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,16 **	---	0,25 **	0,13 *	---	0,19 **
Deposition 2015	0,12 *	---	0,25 **	0,10	---	0,19 **
Deposition 2016	0,16 **	---	0,28 **	0,13 **	---	0,23 **
Deposition 2014-2015	0,14 **	---	0,26 **	0,11 *	---	0,19 **
Deposition 2015-2016	0,14 **	---	0,27 **	0,11 *	---	0,21 **
Deposition 2014-2016	0,15 **	---	0,27 **	0,12 *	---	0,20 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.4: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) in allen Nutzungstypen (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	394	393	396	359	356	359
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,16 **	---	0,26 **	0,24 **	0,18 **	0,27 **
Deposition 2015	0,14 **	---	0,23 **	0,22 **	0,12 *	0,24 **
Deposition 2016	0,18 **	---	0,24 **	0,25 **	0,16 **	0,26 **
Deposition 2014-2015	0,15 **	---	0,25 **	0,23 **	0,15 **	0,26 **
Deposition 2015-2016	0,16 **	---	0,24 **	0,23 **	0,15 **	0,25 **
Deposition 2014-2016	0,16 **	---	0,25 **	0,24 **	0,16 **	0,26 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,16 **	---	0,25 **	0,15 **	0,16 **	0,27 **
Deposition 2015	0,12 *	---	0,25 **	0,11 *	0,16 **	0,26 **
Deposition 2016	0,16 **	---	0,28 **	0,15 **	0,16 **	0,30 **
Deposition 2014-2015	0,14 **	---	0,26 **	0,13 *	0,16 **	0,27 **
Deposition 2015-2016	0,14 **	---	0,27 **	0,13 *	0,16 **	0,28 **
Deposition 2014-2016	0,15 **	---	0,27 **	0,14 **	0,16 **	0,28 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.5: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	230	231	231	230	231	231
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,14 *	---	0,22 **	---	---	0,13 *
Deposition 2015	---	---	0,23 **	---	---	0,14 *
Deposition 2016	0,14 *	---	0,26 **	---	---	0,16 *
Deposition 2014-2015	---	---	0,23 **	---	---	0,14 *
Deposition 2015-2016	---	---	0,25 **	---	---	0,15 *
Deposition 2014-2016	---	---	0,24 **	---	---	0,15 *
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,15 *	---	0,27 **	---	---	0,20 **
Deposition 2015	---	---	0,26 **	---	---	0,18 **
Deposition 2016	0,18 **	---	0,26 **	---	---	0,21 **
Deposition 2014-2015	0,14 *	---	0,27 **	---	---	0,19 **
Deposition 2015-2016	0,15 *	---	0,26 **	---	---	0,19 **
Deposition 2014-2016	0,16 *	---	0,27 **	---	---	0,20 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.6: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Nadelwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	150	150	150	149	149	149
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	0,42 **	---	0,18 *	0,30 **
Deposition 2015	---	---	0,40 **	---	0,16 *	0,25 **
Deposition 2016	---	---	0,37 **	---	0,20 *	0,27 **
Deposition 2014-2015	---	---	0,41 **	---	0,18 *	0,28 **
Deposition 2015-2016	---	---	0,40 **	---	0,19 *	0,26 **
Deposition 2014-2016	---	---	0,40 **	---	0,18 *	0,28 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,17 *	---	0,44 **	---	---	0,34 **
Deposition 2015	---	---	0,45 **	---	---	0,33 **
Deposition 2016	---	---	0,49 **	---	---	0,39 **
Deposition 2014-2015	---	---	0,45 **	---	---	0,34 **
Deposition 2015-2016	---	---	0,48 **	---	---	0,36 **
Deposition 2014-2016	---	---	0,47 **	---	---	0,36 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.7: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	42	42	42	42	42	42
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,38 *	---	0,32 *	---	0,33 *	---
Deposition 2015	0,39 **	---	---	---	0,31 *	---
Deposition 2016	0,38 *	---	---	0,31 *	---	---
Deposition 2014-2015	0,39 *	---	0,32 *	---	0,33 *	---
Deposition 2015-2016	0,39 **	---	---	---	0,31 *	---
Deposition 2014-2016	0,39 *	---	---	---	0,32 *	---
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,41 **	---	---	---	0,32 *	0,32 *
Deposition 2015	0,40 **	---	---	0,29	---	0,34 *
Deposition 2016	0,41 **	---	---	0,32 *	---	0,31 *
Deposition 2014-2015	0,41 **	---	---	---	---	0,33 *
Deposition 2015-2016	0,41 **	---	---	0,30 *	0,29	0,33 *
Deposition 2014-2016	0,41 **	---	---	---	0,31 *	0,33 *

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.8: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Mischwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	145	144	145	126	125	126
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	---	---	---	0,20 *
Deposition 2015	---	---	---	---	---	0,19 *
Deposition 2016	---	---	0,16 *	---	---	0,23 **
Deposition 2014-2015	---	---	---	---	---	0,20 *
Deposition 2015-2016	---	---	---	---	---	0,21 *
Deposition 2014-2016	---	---	---	---	---	0,21 *
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	---	---	---	0,20 *	0,20 *	---
Deposition 2015	---	---	---	0,18 *	---	---
Deposition 2016	0,16 *	---	---	0,22 *	---	0,20 *
Deposition 2014-2015	---	---	---	0,19 *	---	---
Deposition 2015-2016	---	---	---	0,20 *	---	0,18 *
Deposition 2014-2016	---	---	---	0,20 *	---	0,18 *

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.9: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	78	76	79	78	76	79
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	---	0,26 *	---	0,31 **
Deposition 2015	---	---	---	0,24 *	---	---
Deposition 2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2015	---	---	---	0,26 *	---	0,24 *
Deposition 2015-2016	---	---	---	0,23 *	---	---
Deposition 2014-2016	---	---	---	0,25 *	---	0,24 *
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	---	---	0,41 **	---	---	0,45 **
Deposition 2015	---	---	0,38 **	---	---	0,40 **
Deposition 2016	---	---	0,42 **	---	---	0,45 **
Deposition 2014-2015	---	---	0,40 **	---	---	0,43 **
Deposition 2015-2016	---	---	0,40 **	---	---	0,43 **
Deposition 2014-2016	---	---	0,41 **	---	---	0,43 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.10: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Laubwaldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	46	44	46	46	44	46
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015-2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2016	---	---	---	---	---	---
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	---	---	0,41 **	---	---	0,42 **
Deposition 2015	---	---	0,38 **	---	0,32 *	0,38 **
Deposition 2016	---	---	0,40 **	---	---	0,40 **
Deposition 2014-2015	---	---	0,40 **	---	---	0,40 **
Deposition 2015-2016	---	---	0,39 **	---	---	0,39 **
Deposition 2014-2016	---	---	0,40 **	---	---	0,40 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.11: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	350	349	352	350	349	352
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,14 **	---	0,25 **	0,16 **	0,11 *	0,20 **
Deposition 2015	0,13 *	---	0,22 **	0,15 **	---	0,17 **
Deposition 2016	0,16 **	---	0,24 **	0,17 **	---	0,20 **
Deposition 2014-2015	0,14 *	---	0,24 **	0,16 **	---	0,19 **
Deposition 2015-2016	0,14 **	---	0,23 **	0,16 **	---	0,19 **
Deposition 2014-2016	0,15 **	---	0,24 **	0,16 **	---	0,19 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,14 **	---	0,26 **	---	0,11 *	0,19 **
Deposition 2015	0,11 *	---	0,26 **	---	---	0,19 **
Deposition 2016	0,15 **	---	0,29 **	---	---	0,23 **
Deposition 2014-2015	0,13 *	---	0,26 **	---	---	0,20 **
Deposition 2015-2016	0,13 *	---	0,28 **	---	---	0,21 **
Deposition 2014-2016	0,13 *	---	0,27 **	---	---	0,21 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.12: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Waldstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	339	336	339	320	317	320
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	0,12 *	---	0,25 **	0,17 **	---	0,23 **
Deposition 2015		---	0,22 **	0,15 **	---	0,2 **
Deposition 2016	0,14 *	---	0,24 **	0,17 **	---	0,23 **
Deposition 2014-2015	0,11 *	---	0,24 **	0,16 **	---	0,22 **
Deposition 2015-2016	0,12 *	---	0,23 **	0,16 **	---	0,21 **
Deposition 2014-2016	0,12 *	---	0,24 **	0,16 **	---	0,22 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,15 **	---	0,25 **	0,13 *	---	0,24 **
Deposition 2015	0,11 *	---	0,25 **	---	---	0,24 **
Deposition 2016	0,15 **	---	0,28 **	0,13 *	---	0,28 **
Deposition 2014-2015	0,13 *	---	0,25 **	0,11 *	---	0,24 **
Deposition 2015-2016	0,13 *	---	0,27 **	---	---	0,26 **
Deposition 2014-2016	0,14 *	---	0,26 **	0,12 *	---	0,25 **

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.13: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (aus CLC abgeleitete Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	36	36	36	36	36	36
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	0,34 *	---	---	0,51 **
Deposition 2015	---	---	0,44 **	---	---	0,49 **
Deposition 2016	---	---		---	---	0,38 *
Deposition 2014-2015	---	---	0,39 *	---	---	0,54 **
Deposition 2015-2016	---	---	0,39 *	---	---	0,52 **
Deposition 2014-2016	---	---	0,36 *	---	---	0,54 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	0,36 *	---	---	---	---	0,41 *
Deposition 2015	---	---	---	---	---	0,39 *
Deposition 2016	0,34 *	---	---	---	---	0,40 *
Deposition 2014-2015	---	---	---	---	---	0,41 *
Deposition 2015-2016	---	---	---	---	---	0,41 *
Deposition 2014-2016	---	---	---	---	---	0,41 *

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.2.14: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für modellierte atmosphärische Jahresgesamtdepositionen von Cd, Hg, und Pb (EMEP) und gemessene Konzentrationen in Moosen (MM 2015) an Offenlandstandorten (im MM2015 erhobene Landnutzung)

Atmosphärische Deposition (EMEP)*	Gehalte im Moos					
	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg	Pb
Datensatz (EMEP-Modellierung)	0,1° x 0,1°, nutzungsunspezifisch			0,1° x 0,1°, nutzungsspezifisch		
Stichprobengröße	46	47	47	34	34	34
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015-2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2016	---	---	---	---	---	---
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2015	---	---	---	---	---	---
Deposition 2015-2016	---	---	---	---	---	---
Deposition 2014-2016	---	---	---	---	---	---

** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

B.3 Korrelationen zwischen Mittelwerten der Konzentration aus technischen Messungen von Schwermetallen in der Atmosphäre und Konzentrationen in Moosen

Tabelle B.3: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für Mittelwerte der Konzentrationen aus technischen Messungen von Pb, Cd und Hg (bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km)

Atmosph. Konzentration (gemessen)*	Gehalte im Moos (3 km x 3 km)					
	n	Cd	n	Hg	n	Pb
Korrelation (Spearman)						
Konzentration 2014	95	---	4	---	87	0,36 **
Konzentration 2015	98	---	4	---	94	0,21 *
Konzentration 2016	96	---	4	---	88	0,29 **
Konzentration 2014-2015	94	---	4	---	86	0,35 **
Konzentration 2015-2016	92	---	4	---	84	0,31 **
Konzentration 2014-2016	88	---	4	---	80	0,32 **
Korrelation (Pearson)						
Konzentration 2014	95	0,27 **	4	---	87	0,28 **
Konzentration 2015	98	---	4	---	94	---
Konzentration 2016	96	0,22 *	4	---	88	0,25 *
Konzentration 2014-2015	94	0,22 *	4	---	86	0,25 *
Konzentration 2015-2016	92	---	4	---	84	0,23 *
Konzentration 2014-2016	88	0,22 *	4	---	80	0,26 *

n = Stichprobengröße; ** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 06, 11 in **Tabelle 1**.

B.4 Korrelationen zwischen technischen Messungen der atmosphärischen Schwermetalldeposition und Konzentrationen in Moosen

Tabelle B.4.1: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für technische Messungen der nassen atmosphärischen Deposition von Pb, Cd und Hg (bei Ilyin et al. 2020 zur Modellvalidierung verwendete Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km)

Atmosphärische Deposition (gemessen)*	Gehalte im Moos (3 km x 3 km)					
	n	Cd	n	Hg	n	Pb
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	53	---	30	---	68	---
Deposition 2015	68	---	32	---	76	---
Deposition 2016	45	---	30	---	55	---
Deposition 2014-2015	51	---	29	---	64	---
Deposition 2015-2016	44	---	32	---	53	---
Deposition 2014-2016	33	---	29	---	41	---
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	53	---	30	---	68	---
Deposition 2015	68	---	32	---	76	---
Deposition 2016	45	---	30	---	55	---
Deposition 2014-2015	51	---	29	---	64	---
Deposition 2015-2016	44	---	32	---	53	---
Deposition 2014-2016	33	---	29	---	41	---

n = Stichprobengröße; ** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 07, 11 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.4.2: Korrelationsmatrix (Spearman, Pearson) für technische Messungen der atmosphärischen Bulk-Deposition von Pb, Cd und Hg (aus Ilyin et al. 2020: Tabellen B1-B6 übernommene Daten) und geostatistischen Flächenschätzungen der Konzentration in Moosen (MM 2015, 3 km x 3 km)

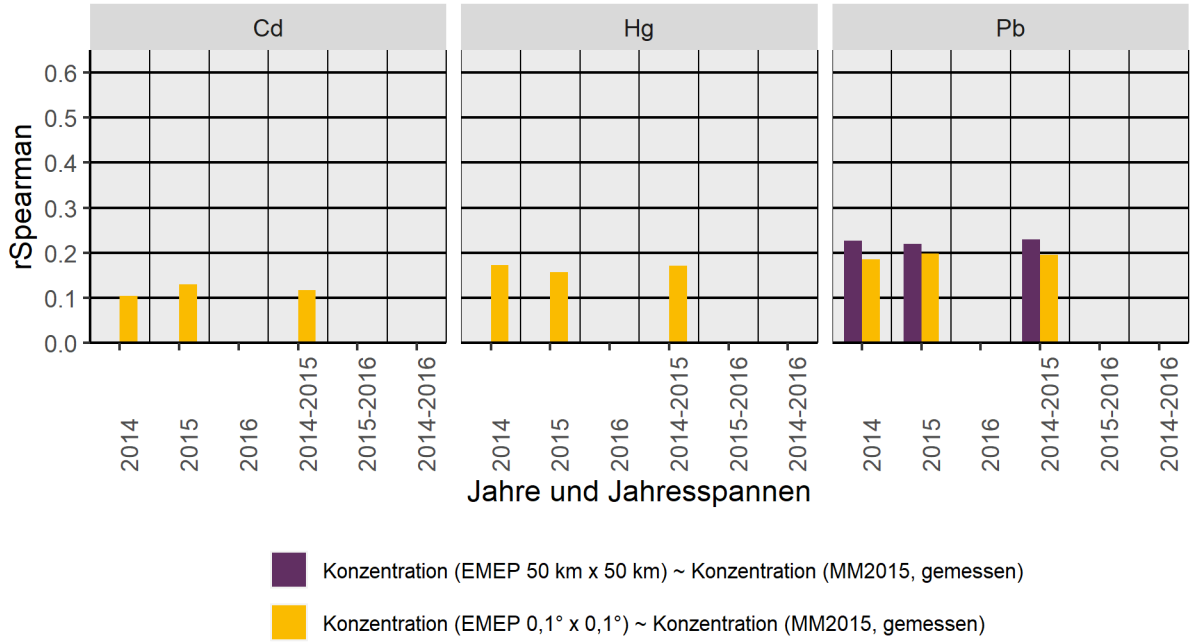
Atmosphärische Deposition (gemessen)*	Gehalte im Moos (3 km x 3 km)					
	n	Cd	N	Hg	n	Pb
Korrelation (Spearman)						
Deposition 2014	65	0,63 **	k.A.	k.A.	65	0,54 **
Deposition 2015	67	---	k.A.	k.A.	67	---
Deposition 2016	66	---	k.A.	k.A.	66	0,50 **
Deposition 2014-2015	62	---	k.A.	k.A.	62	0,41 **
Deposition 2015-2016	65	---	k.A.	k.A.	65	0,34 **
Deposition 2014-2016	61	---	k.A.	k.A.	61	0,45 **
Korrelation (Pearson)						
Deposition 2014	65	0,56 **	k.A.	k.A.	65	0,55 **
Deposition 2015	67	---	k.A.	k.A.	67	0,32 **
Deposition 2016	66	---	k.A.	k.A.	66	0,59 **
Deposition 2014-2015	62	---	k.A.	k.A.	62	0,50 **
Deposition 2015-2016	65	---	k.A.	k.A.	65	0,49 **
Deposition 2014-2016	61	---	k.A.	k.A.	61	0,55 **

n = Stichprobengröße; ** = sehr signifikant; * = signifikant; --- = nicht signifikant oder unplausibel; k.A. = keine Angabe (fehlende techn. Messungen); * bei Jahresspannen: arithmetisches Mittel der Jahreswerte; Datengrundlagen: Datensätze 08, 11 in **Tabelle 1**.

B.5 Graphischer Vergleich der Korrelationskoeffizienten

Abbildung B.5.1: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

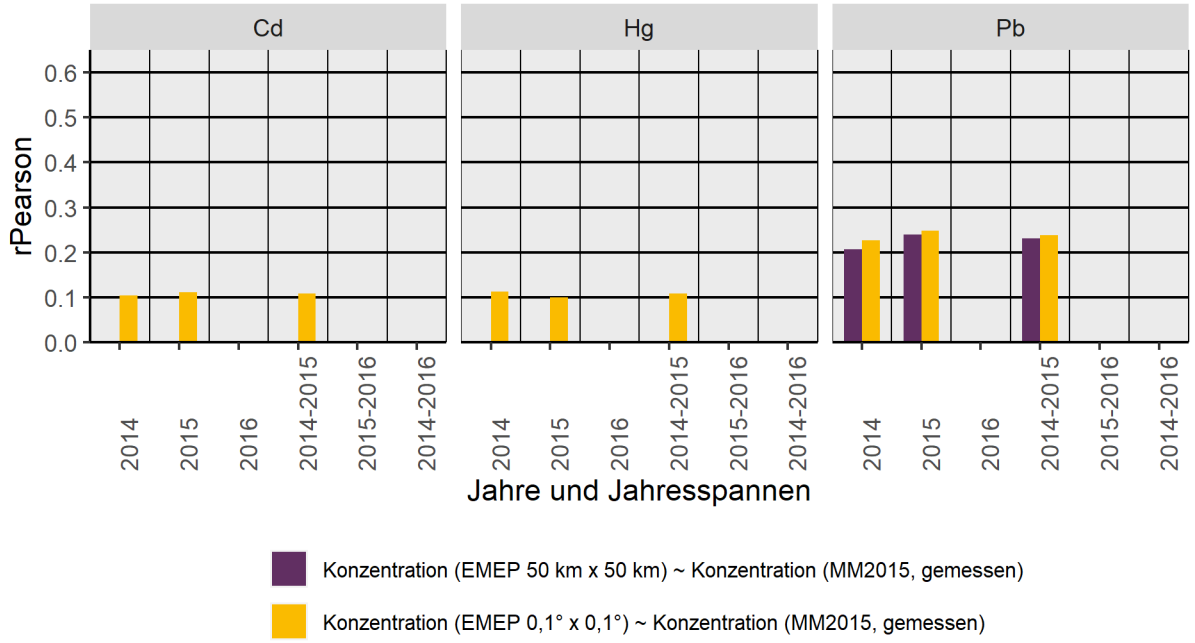
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.1.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.2: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

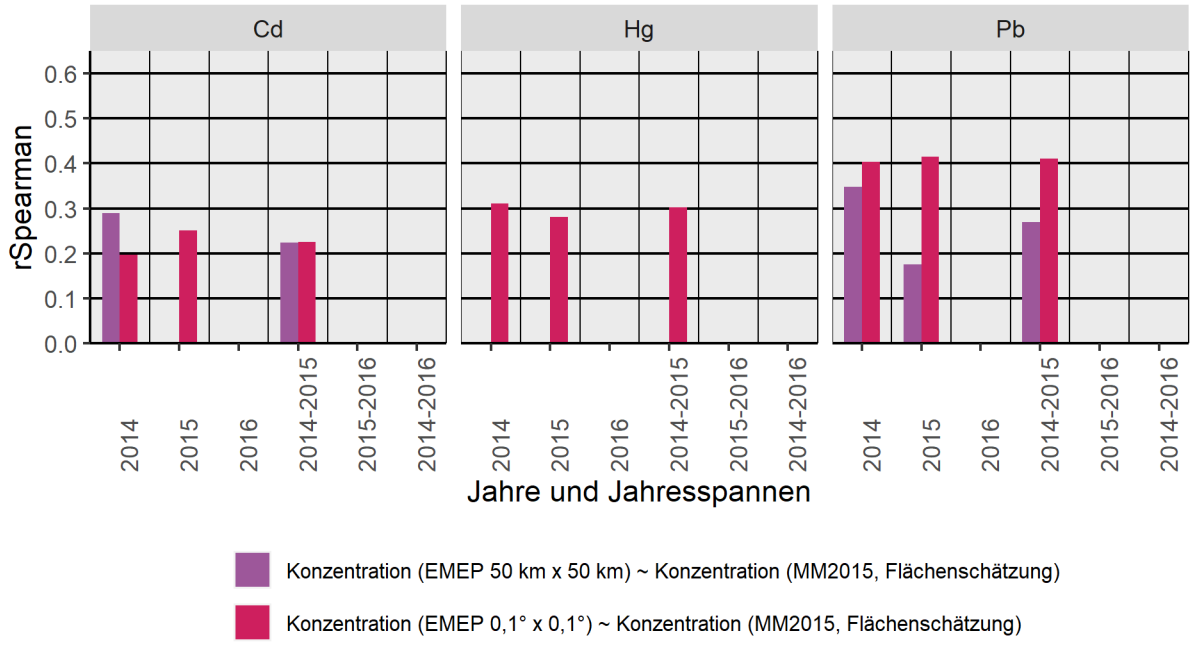
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.1.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.3: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

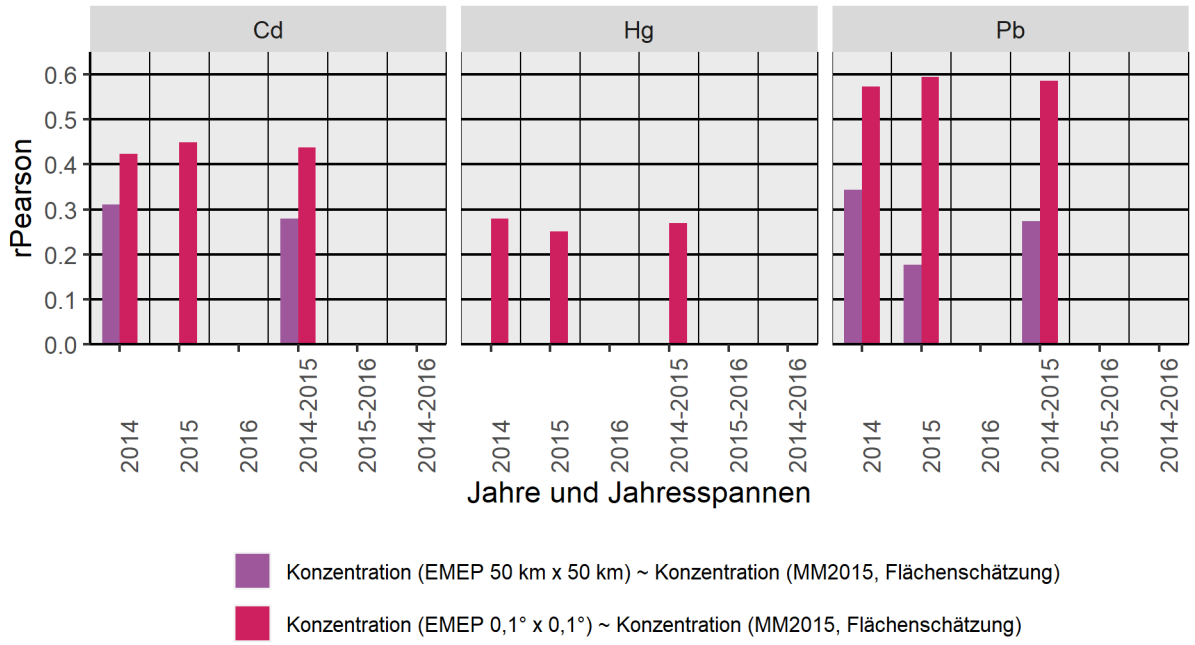
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.1.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.4: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

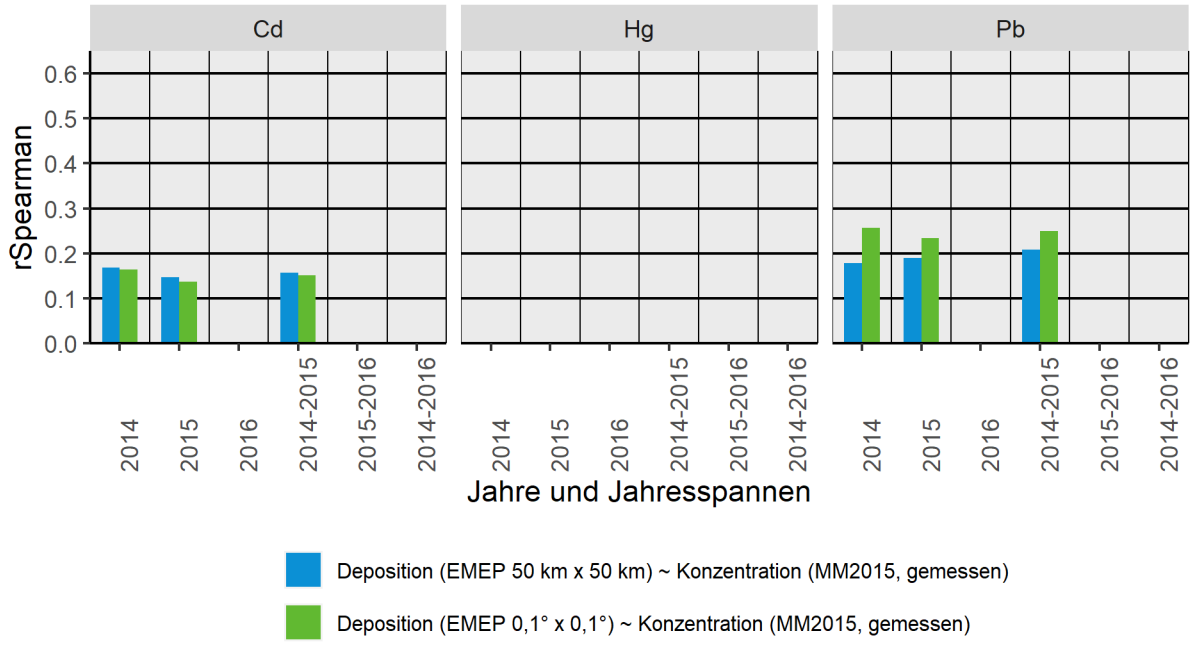
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.1.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 01, 03, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.5: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

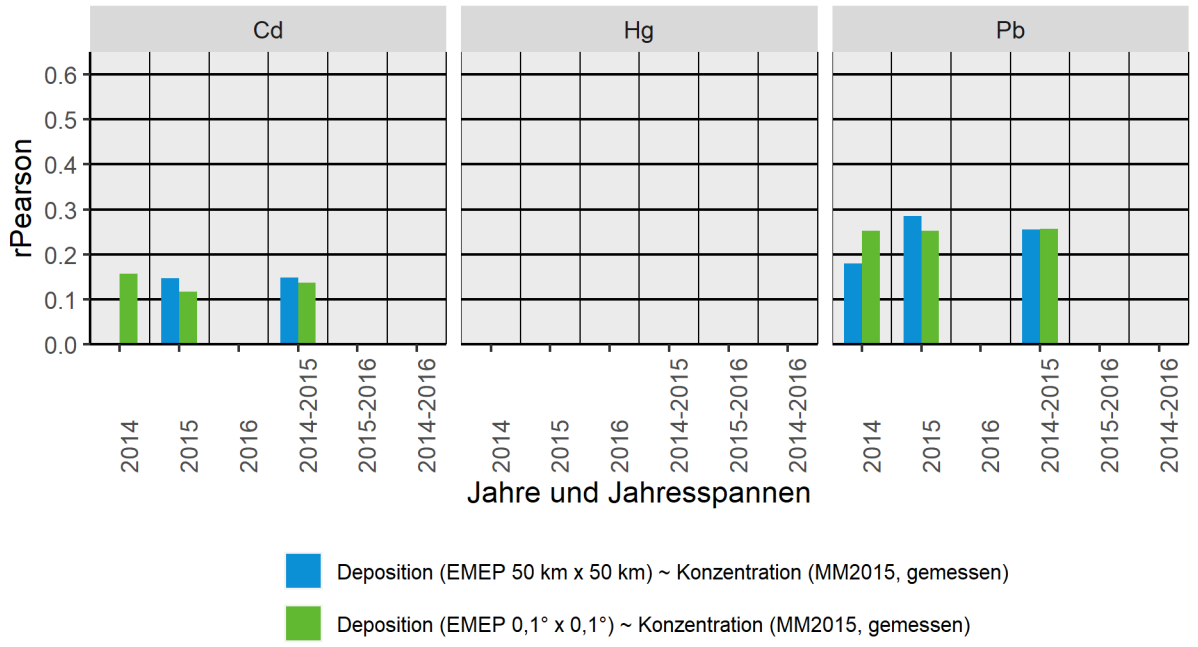
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.2.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.6: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und Messdaten des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

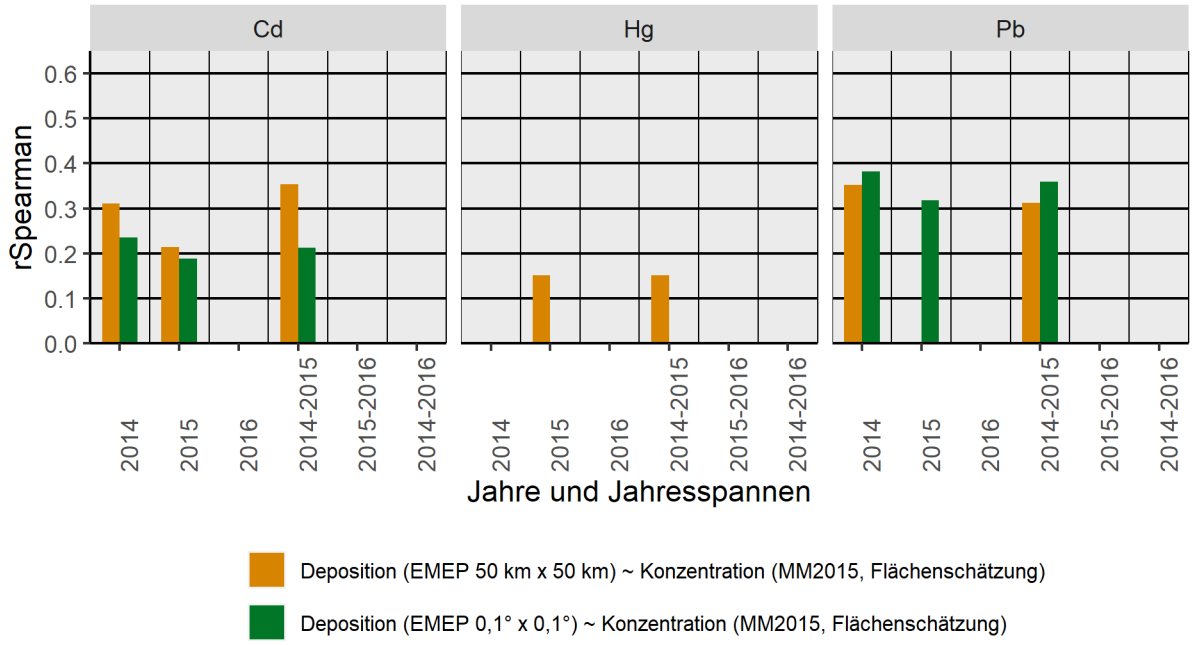
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.2.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.7: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

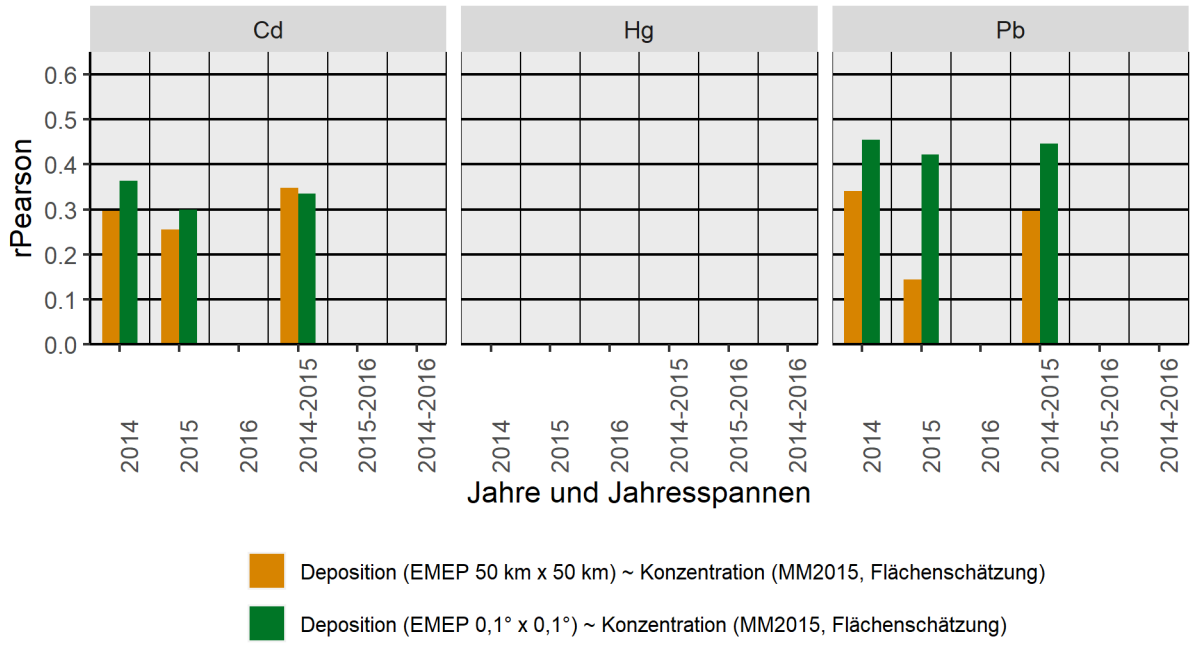
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.8: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der räumlichen Auflösungen EMEP 50 km x 50 km und EMEP 0,1° x 0,1°

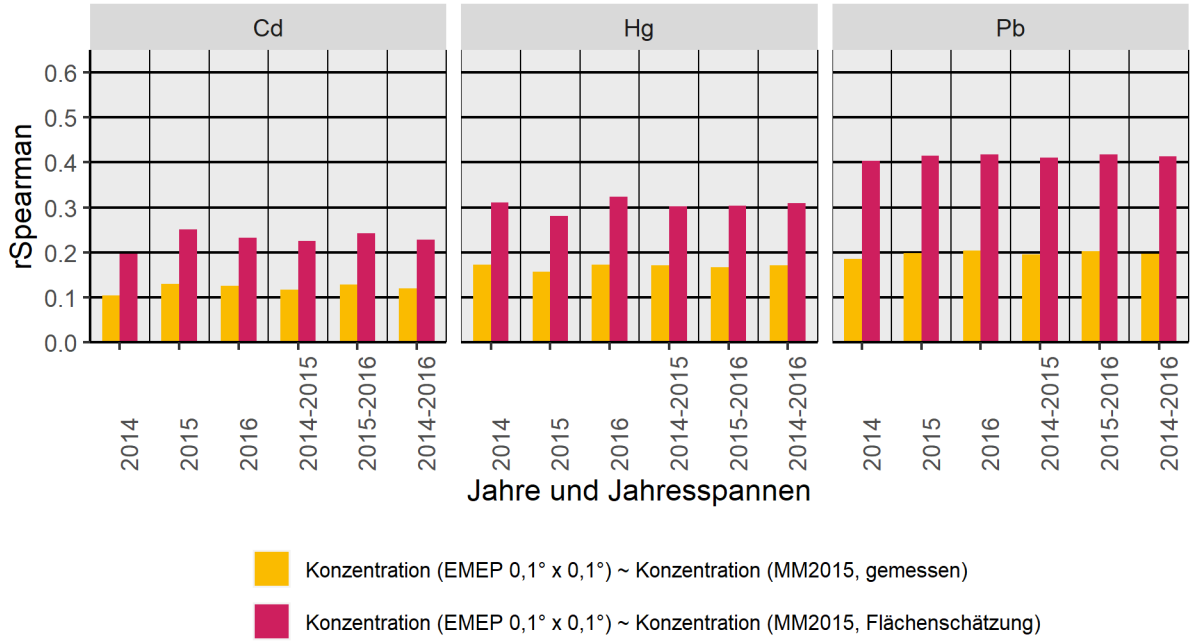
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus Tabelle B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 02, 04, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.9: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen

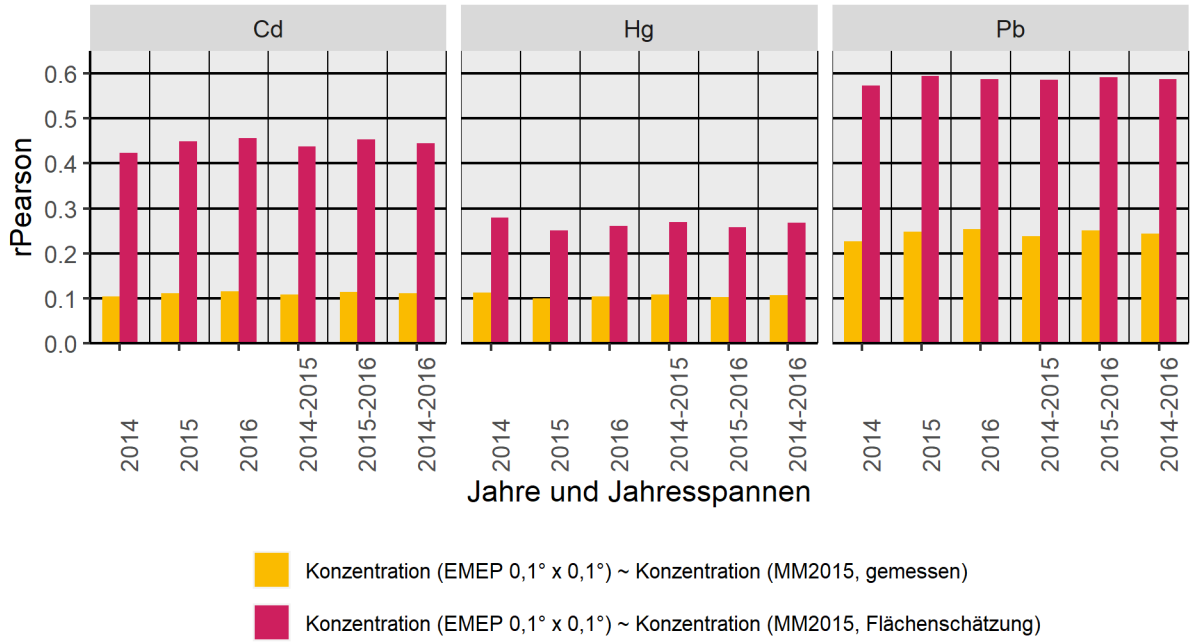
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.1 und B.1.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.10: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Konzentrationen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen

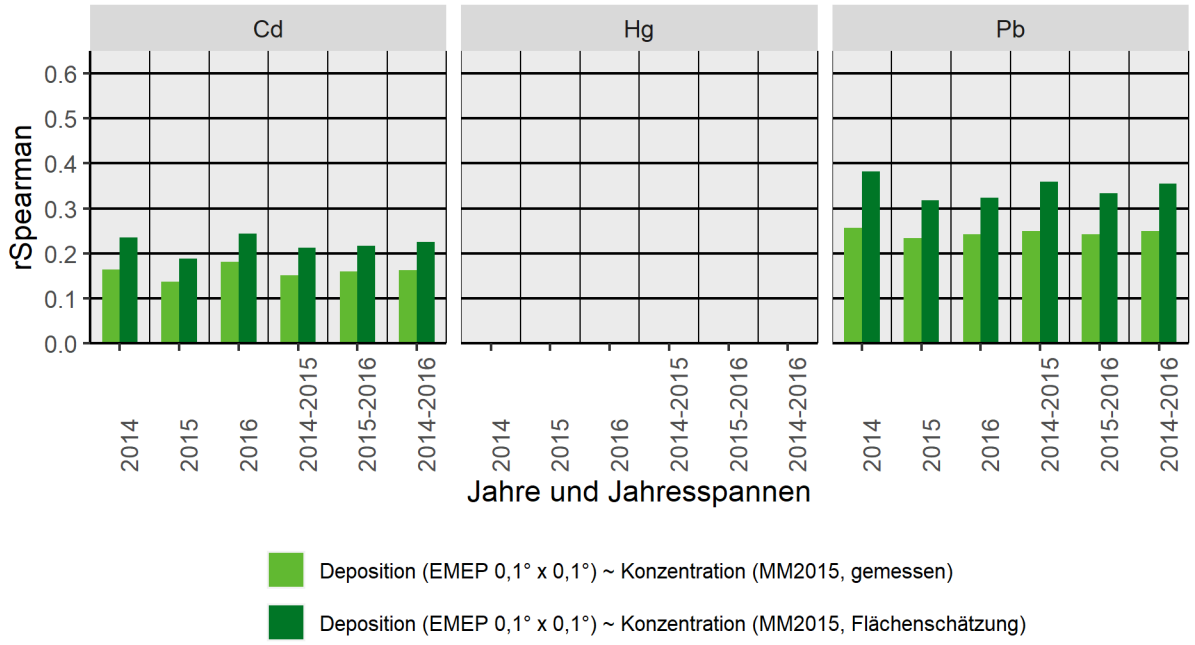
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.1 und B.1.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.11: Korrelationen (Spearman) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen

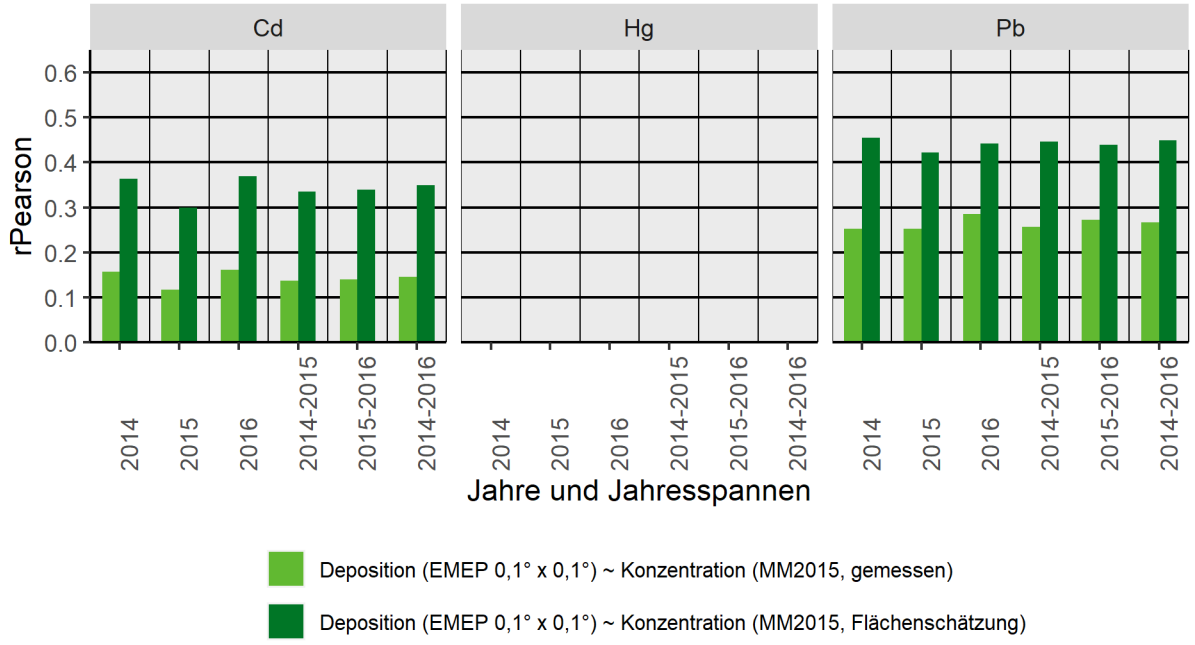
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B2.1 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.12: Korrelationen (Pearson) zwischen modellierten atmosphärischen Depositionen (EMEP 0,1° x 0,1°) und Daten des MM2015 - Vergleich der geostatistischen Flächenschätzungen und der gemessenen Konzentrationen in Moosen

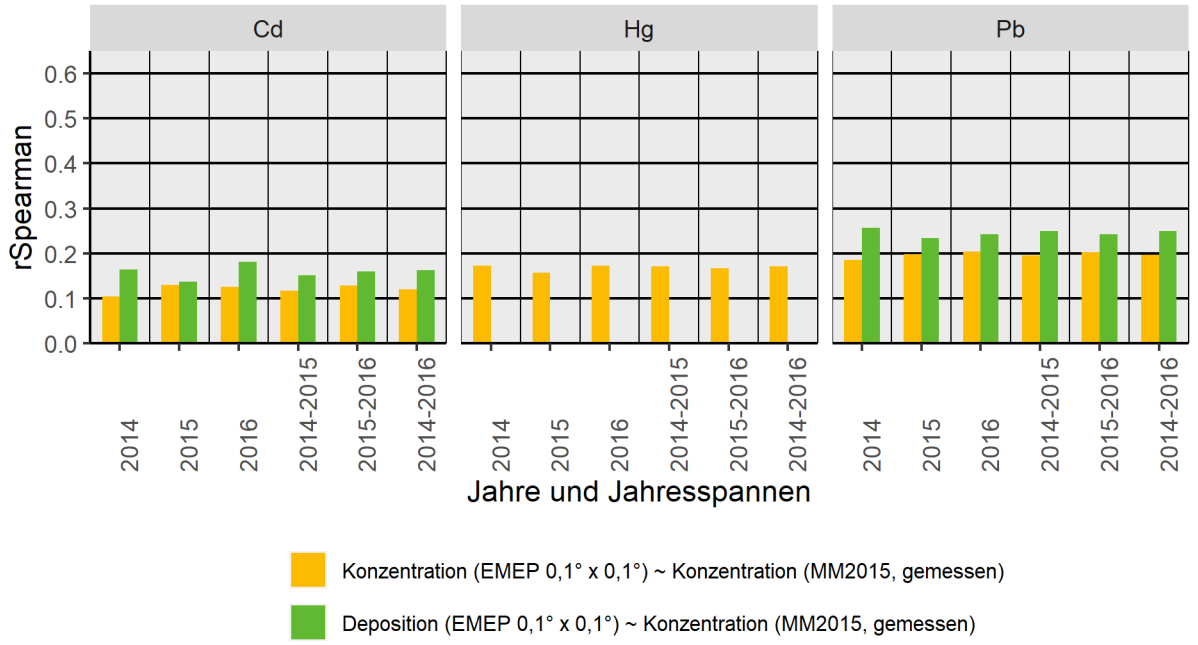
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B2.1 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.13: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen

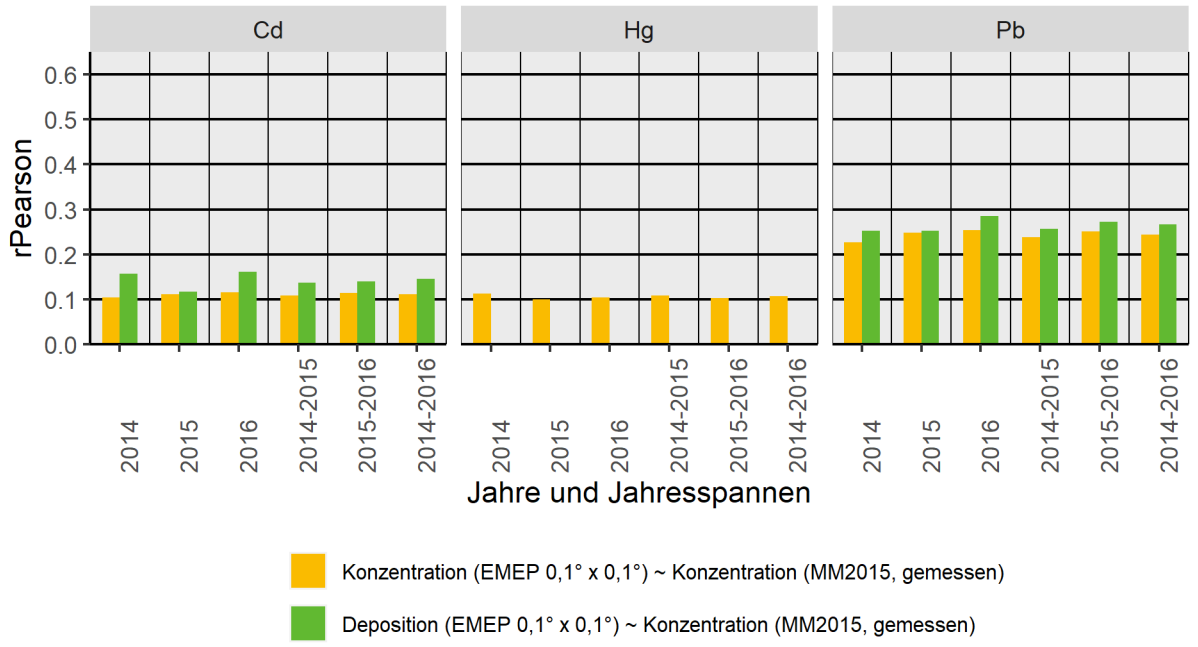
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.1 und B.2.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.14: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen

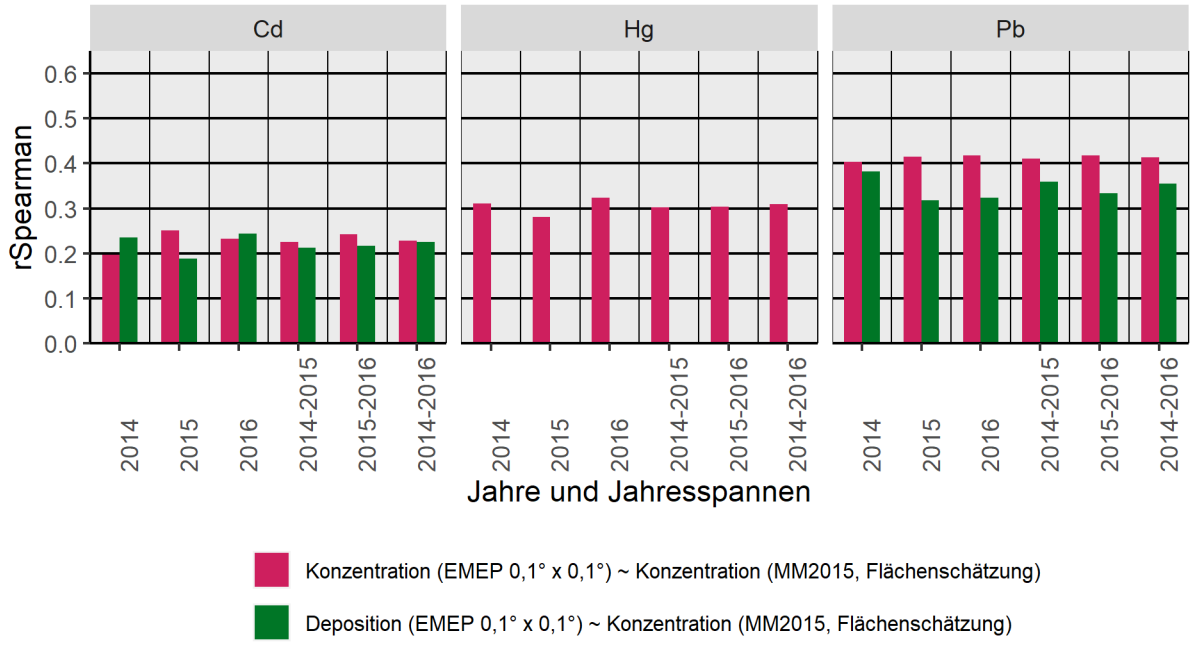
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.1 und B.2.1



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.15: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen

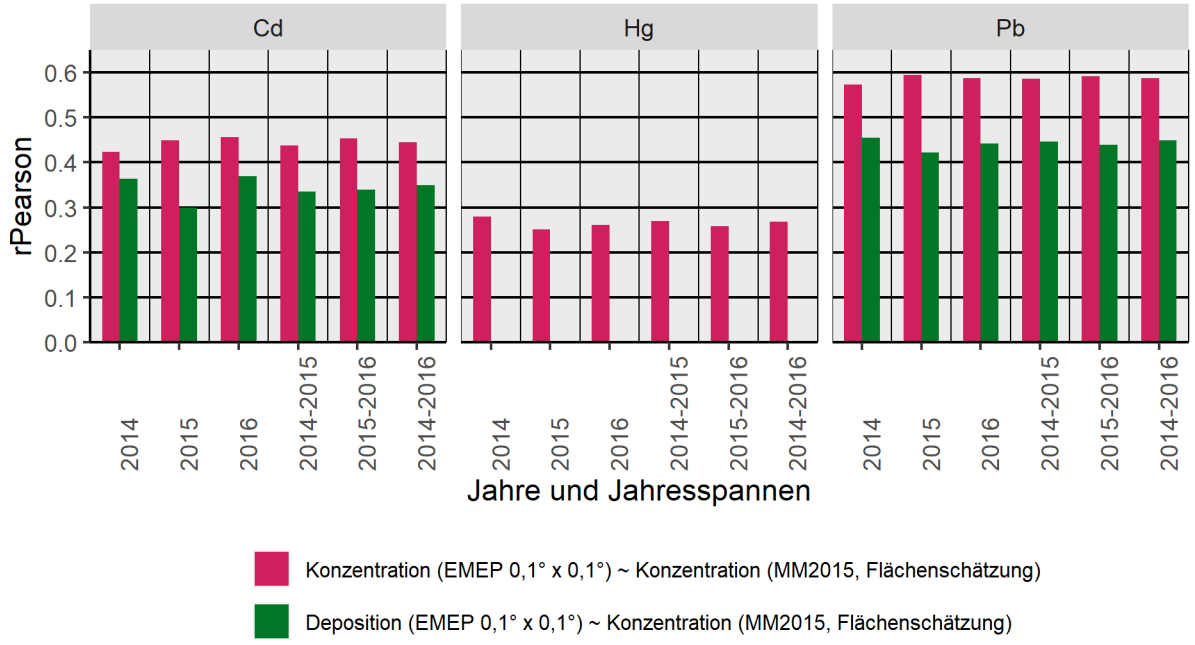
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.2 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.16: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und geostatistischen Flächenschätzungen des MM2015 - Vergleich der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Depositionen

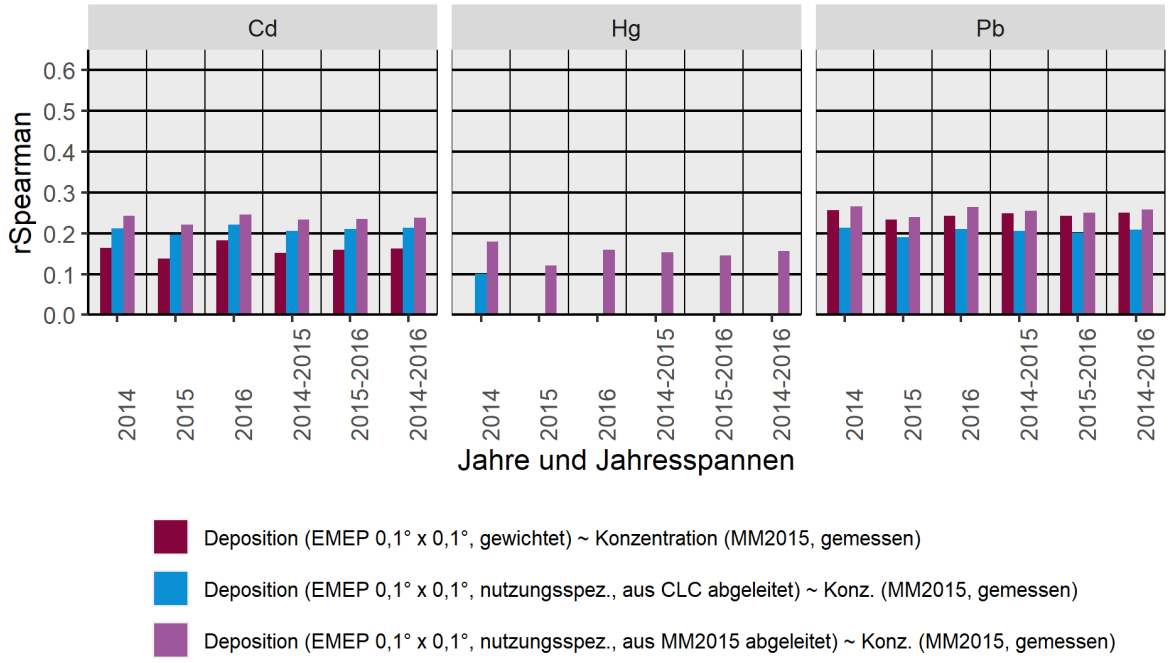
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B1.2 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.17: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (alle Standorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen

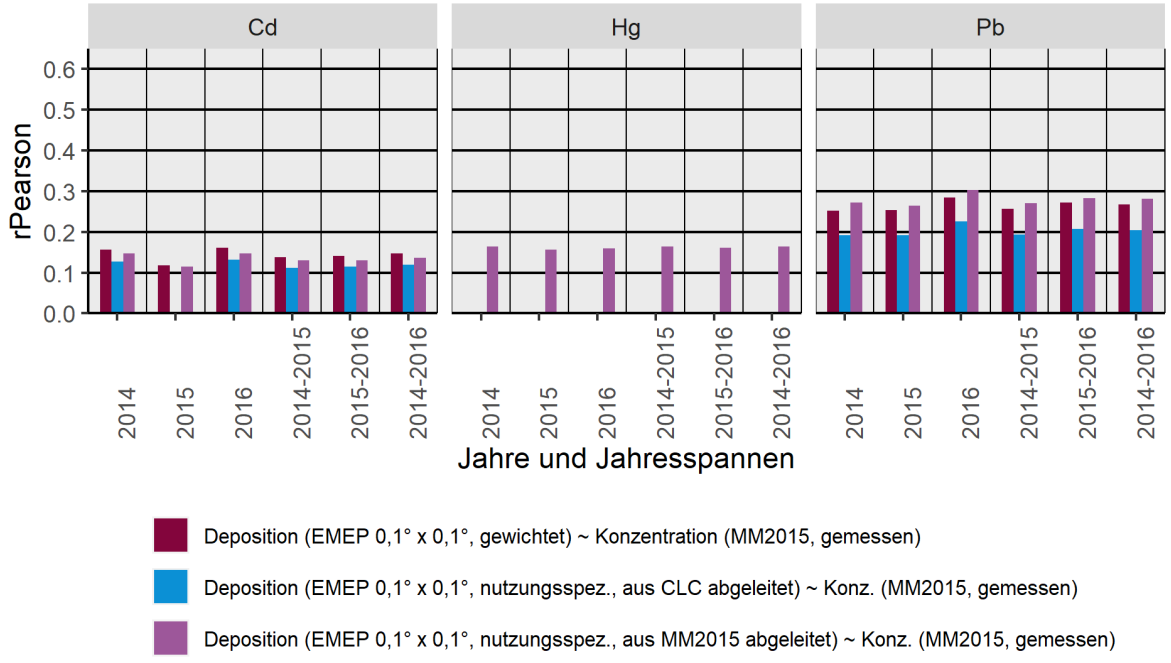
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B.2.1, B.2.3 und B.2.4



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.18: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (alle Standorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen

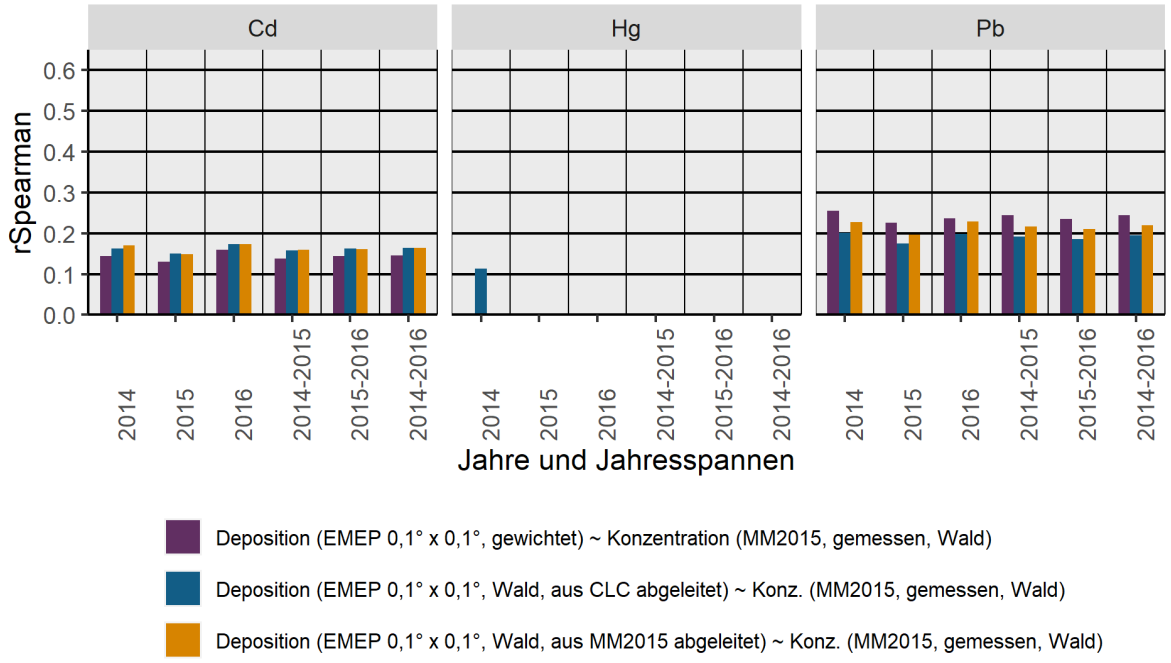
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten aus den Tabellen B.2.1, B.2.3 und B.2.4



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.19: Korrelationen (Spearman) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (Waldstandorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen

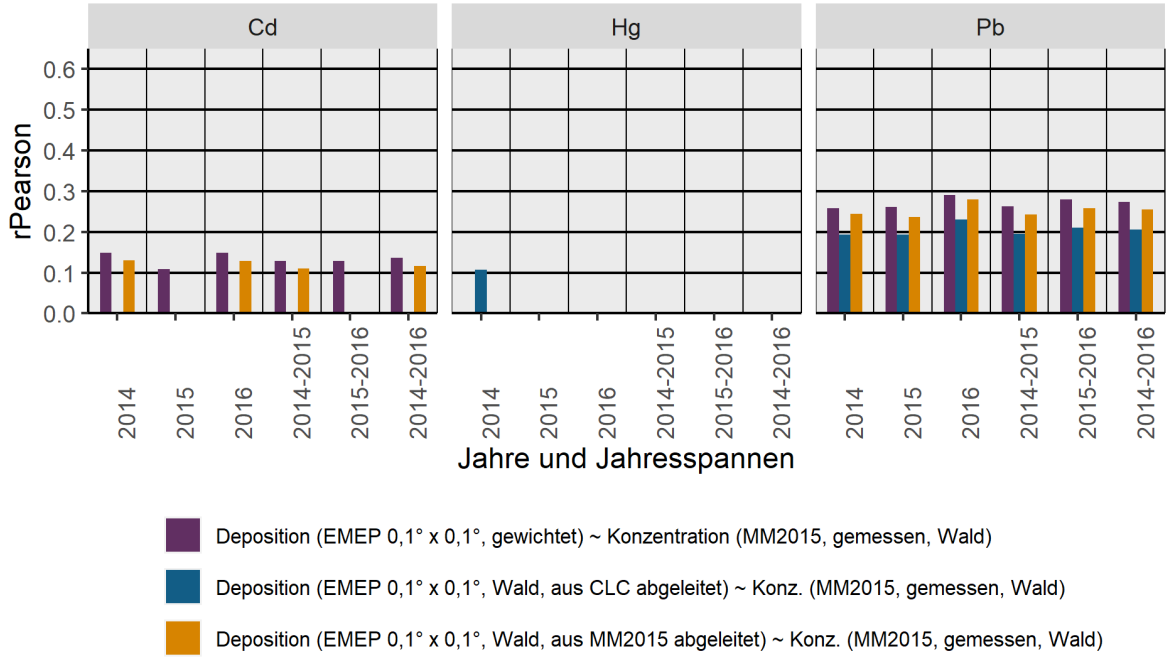
Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten, berechnet sowie aus den Tabellen B1.2 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Abbildung B.5.20: Korrelationen (Pearson) zwischen EMEP 0,1° x 0,1° und Messdaten des MM2015 (Waldstandorte) - Vergleich der nutzungsspezifisch und entsprechend der Nutzungsverteilung gewichtet modellierten atmosphärischen Depositionen

Graphischer Vergleich von Korrelationskoeffizienten, berechnet sowie aus den Tabellen B1.2 und B.2.2



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

B.6 Signifikanzanalyse der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten

Tabelle B.6.1: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP vs. MM2015: Messdaten und Flächenschätzungen) - Vergleich der Korrelationen bei Verwendung der Auflösungen 0,1° x 0,1° und 50 km x 50 km der modellierten Konzentration und Deposition

Signifikanz der Unterschiede der in den Abbildungen B.5.1 bis B.5.8 dargestellten Korrelationen

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2014-2015
Cd	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	●	k.A.	●
Cd	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	●	k.A.	●
Cd	Deposition vs. Messdaten	Spearman	●	●	●
Cd	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●
Cd	Deposition vs. Messdaten	Pearson	k.A.	●	●
Cd	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●
Hg	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Messdaten	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Messdaten	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	●	●	●

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2014-2015
Pb	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●
Pb	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	●	●	●
Pb	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●
Pb	Deposition vs. Messdaten	Spearman	●	●	●
Pb	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	●	k.A.	●
Pb	Deposition vs. Messdaten	Pearson	●	●	●
Pb	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●

Korrelationskoeffizient zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messungen und Flächenschätzungen) ● signifikant größer ● nicht signifikant unterschiedlich ● signifikant kleiner als zwischen EMEP-Modellierung (50 km x 50 km; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messdaten und Flächenschätzungen); k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); Datengrundlagen: Datensätze 01, 02, 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.6.2: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zu den Messdaten und den geostatistischen Flächenschätzungen der Schwermetallkonzentrationen in Moosen

Signifikanz der Unterschiede der in den Abbildungen B.5.9 bis B.5.12 dargestellten Korrelationen

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2016	2014-2015	2015-2016	2014-2016
Cd	Konzentration vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	Konzentration vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Hg	Deposition vs. MM2015	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	Konzentration vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	Konzentration vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●

Korrelationskoeffizient zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (geostatistische Flächenschätzung der Konzentration in Moosen) ● signifikant größer ● nicht signifikant unterschiedlich ● signifikant kleiner als zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen); k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.6.3: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur atmosphärischen Schwermetallkonzentration und zur Schwermetalldeposition

Signifikanz der Unterschiede der in den Abbildungen B.5.13 bis B.5.16 dargestellten Korrelationen

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2016	2014-2015	2015-2016	2014-2016
Cd	EMEP vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	EMEP vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	EMEP vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●
Cd	EMEP vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●
Hg	EMEP vs. Messdaten	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP vs. Flächenschätzung	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP vs. Messdaten	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP vs. Flächenschätzung	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	EMEP vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●

Korrelationskoeffizient zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration) und Moosmonitoring-Daten ● signifikant größer ● nicht signifikant unterschiedlich ● signifikant kleiner als zwischen EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messdaten und Flächenschätzung); k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); Datengrundlagen: Datensätze 03, 04,10, 11 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.6.4: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur nutzungsspezifisch modellierten und zur flächengewichtet berechneten Schwermetalldeposition (alle Standorte des MM2015)

Signifikanz der Unterschiede der in den Abbildungen B.5.17 und B.5.18 dargestellten Korrelationen

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2016	2014-2015	2015-2016	2014-2016
Cd	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	●	k.A.	●	●	●	●
Cd	EMEP (Veg vs. MM2015)	Spearman	●	●	●	●	●	●
Cd	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Hg	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (Veg) vs. MM2015	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP (Veg) vs. MM2015	Spearman	●	●	●	●	●	●
Pb	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	●	●	●	●	●	●

Korrelationskoeffizient zwischen nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen) ● signifikant größer ● nicht signifikant unterschiedlich ● signifikant kleiner als zwischen nicht nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen; k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); EMEP (CLC) = nutzungsspezifische Modellierung entsprechend der aus der Corine Land Cover an den Moosstandorten abgeleiteten Landnutzung; EMEP (Veg) = nutzungsspezifische Modellierung entsprechend der im MM2015 an den Moosstandorten im Gelände erhobenen Landnutzung; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.6.5: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen zur nutzungsspezifisch modellierten und zur flächengewichtet berechneten Schwermetalldeposition (nur Waldstandorte des MM2015)

Signifikanz der Unterschiede der in den Abbildungen B.5.19 und B.5.20 dargestellten Korrelationen

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014	2015	2016	2014-2015	2015-2016	2014-2016
Cd	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠
Cd	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	EMEP (Veg vs. MM2015)	Spearman	🟢	k.A.	🟢	🟢	🟢	🟢
Cd	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	🟠	k.A	🟠	🟠	k.A	🟠
Hg	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (Veg) vs. MM2015	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	EMEP (CLC) vs. MM2015	Spearman	🟣	🟣	🟣	🟣	🟣	🟣
Pb	EMEP (CLC) vs. MM2015	Pearson	🟣	🟣	🟣	🟣	🟣	🟣
Pb	EMEP (Veg) vs. MM2015	Spearman	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠
Pb	EMEP (Veg) vs. MM2015	Pearson	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠	🟠

Korrelationskoeffizient zwischen nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen) 🟢 signifikant größer 🟠 nicht signifikant unterschiedlich 🟣 signifikant kleiner als zwischen nicht nutzungsspezifischer EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Deposition) und Moosmonitoring-Daten (gemessene Konzentration in Moosen; k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); EMEP (CLC) = nutzungsspezifische Modellierung entsprechend der aus der Corine Land Cover an den Moosstandorten abgeleiteten Landnutzung; EMEP (Veg) = nutzungsspezifische Modellierung entsprechend der im MM2015 an den Moosstandorten im Gelände erhobenen Landnutzung; Datengrundlagen: Datensätze 04, 05, 10 in **Tabelle 1**.

Tabelle B.6.6: Signifikanz der Unterschiede der Korrelationskoeffizienten (EMEP 0,1° x 0,1° vs. MM2015) - Vergleich der Korrelationen bei Verwendung der Jahreswerte und Jahresspannen der modellierten atmosphärischen Konzentrationen und Deposition

Signifikanz der Unterschiede der in den Tabellen B.1.1 bis B.1.4 dargestellten Korrelationen

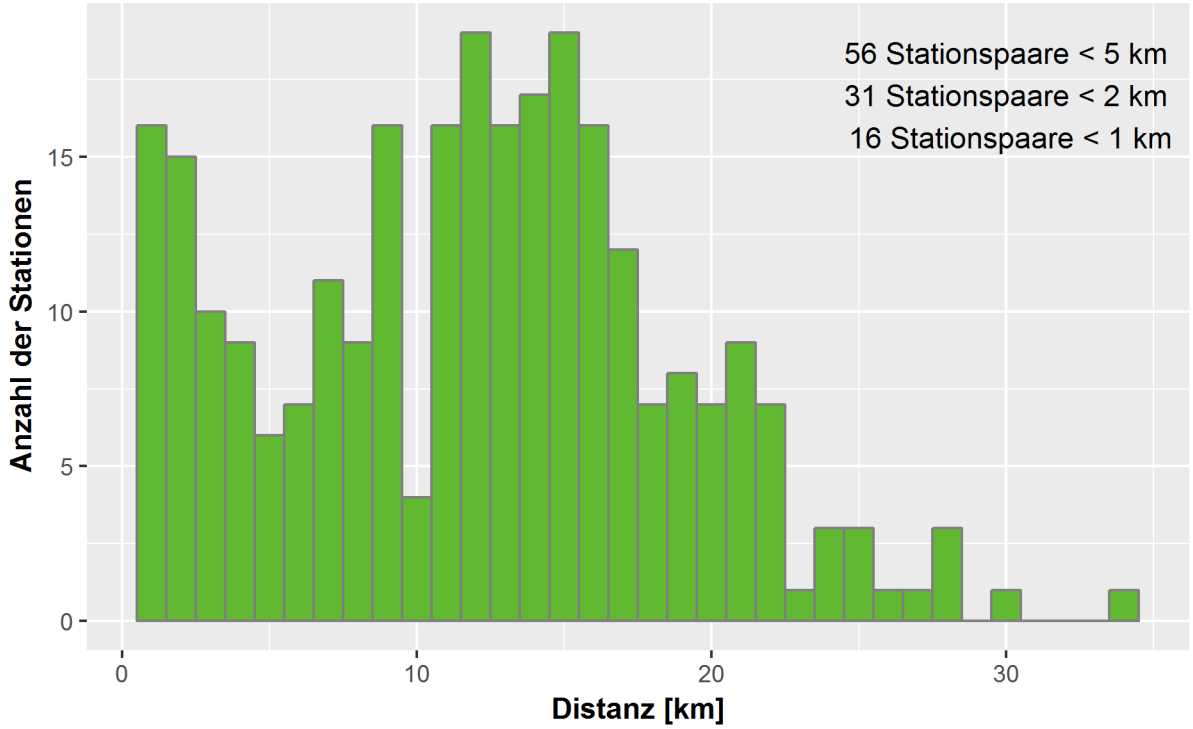
Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014-2015 / 2014	2014-2015 / 2015	2015-2016 / 2015	2015-2016 / 2016	2014-2016 / 2014	2014-2016 / 2015	2014-2016 / 2016
Cd	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Cd	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Hg	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Hg	Deposition vs. Messdaten	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Messdaten	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hg	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pb	Konzentration vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●	●

Element	Variablenpaar der Korrelation	Methode	2014-2015 / 2014	2014-2015 / 2015	2015-2016 / 2015	2015-2016 / 2016	2014-2016 / 2014	2014-2016 / 2015	2014-2016 / 2016
Pb	Konzentration vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Konzentration vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Konzentration vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. Messdaten	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. Flächenschätzung	Spearman	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. Messdaten	Pearson	●	●	●	●	●	●	●
Pb	Deposition vs. Flächenschätzung	Pearson	●	●	●	●	●	●	●

Korrelationskoeffizient zwischen Mittelwerten der Jahresspannen der EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten ● signifikant größer ● nicht signifikant unterschiedlich ● signifikant kleiner als zwischen den zuzuordnenden Jahreswerten der EMEP-Modellierung (0,1° x 0,1°; Konzentration, Deposition) und Moosmonitoring-Daten (Messdaten und Flächenschätzungen); k.A. = keine Angabe (nicht vorhandenes Korrelationspaar); Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 10, 11 in **Tabelle 1**.

C Vergleich des Luftgütemessnetzes des Bundes und der Länder mit dem Messnetz des Moos-Monitorings 2015

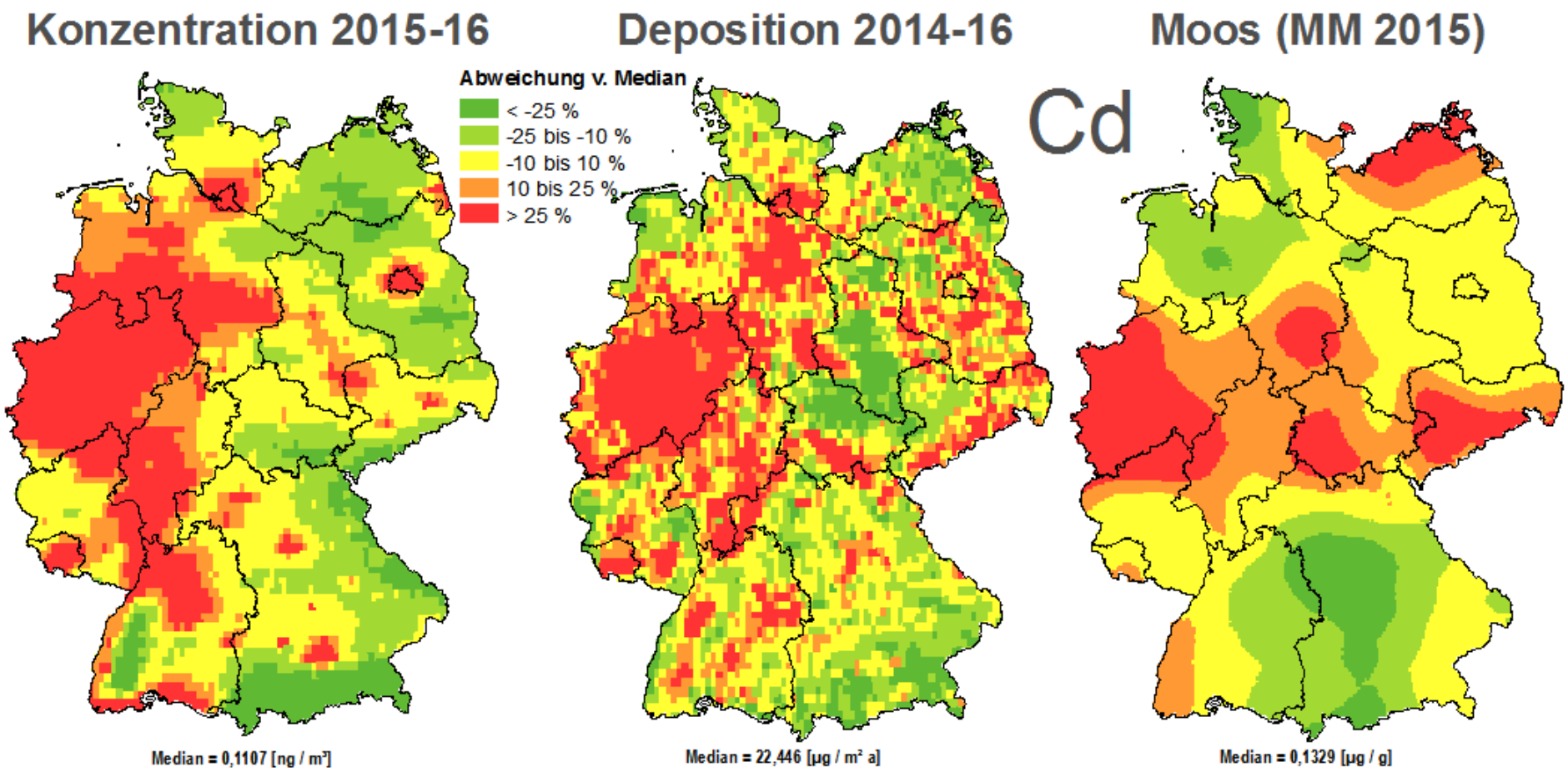
Abbildung C.1: Verteilung der geringsten Abstände zwischen den Stationen des Luftgütemessnetzes des Bundes und der Länder und den Standorten des MM2015



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 06, 07, 08, 09, 10 in **Tabelle 1**.

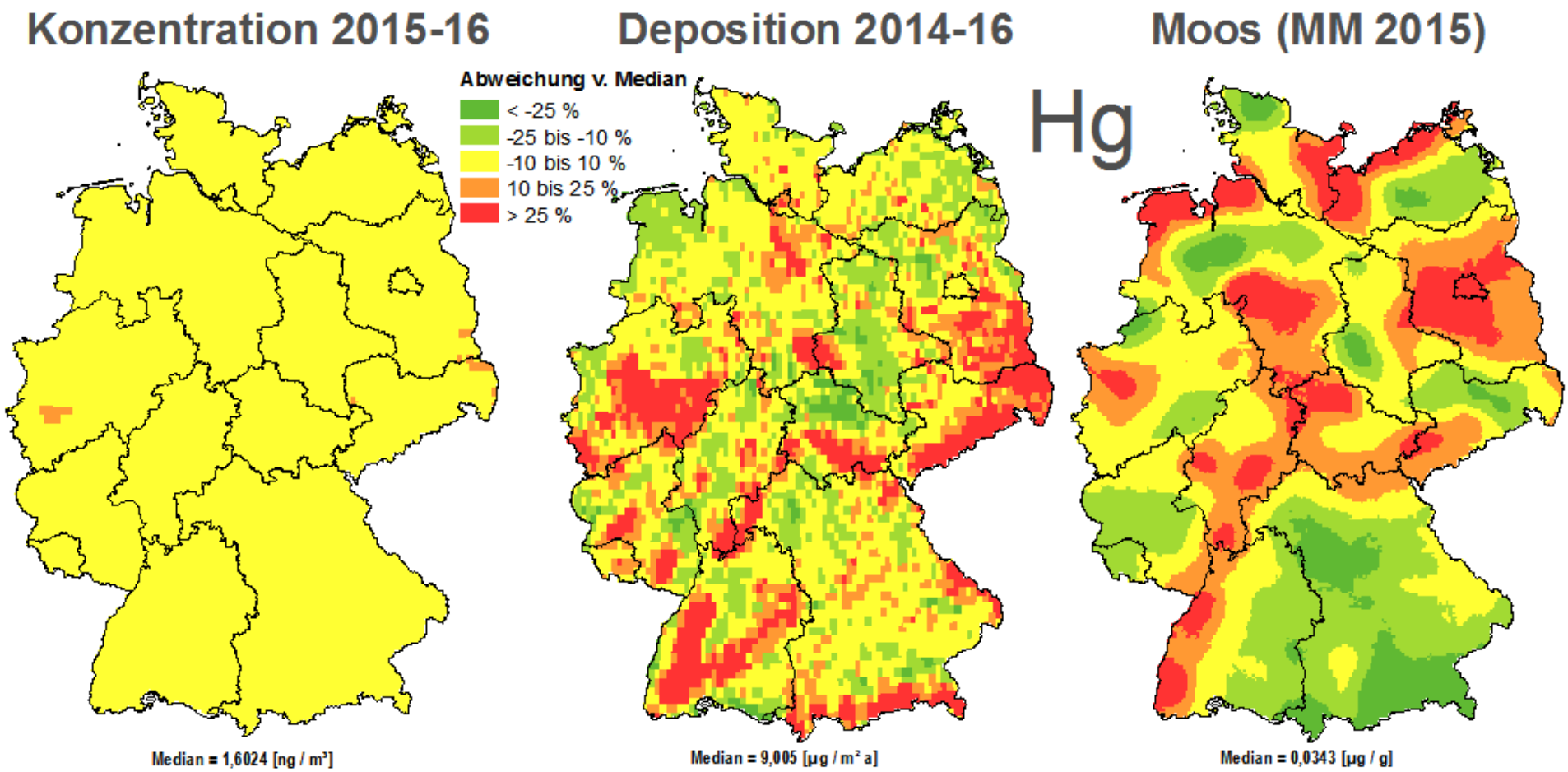
D Kartenanhang

Abbildung D.1: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



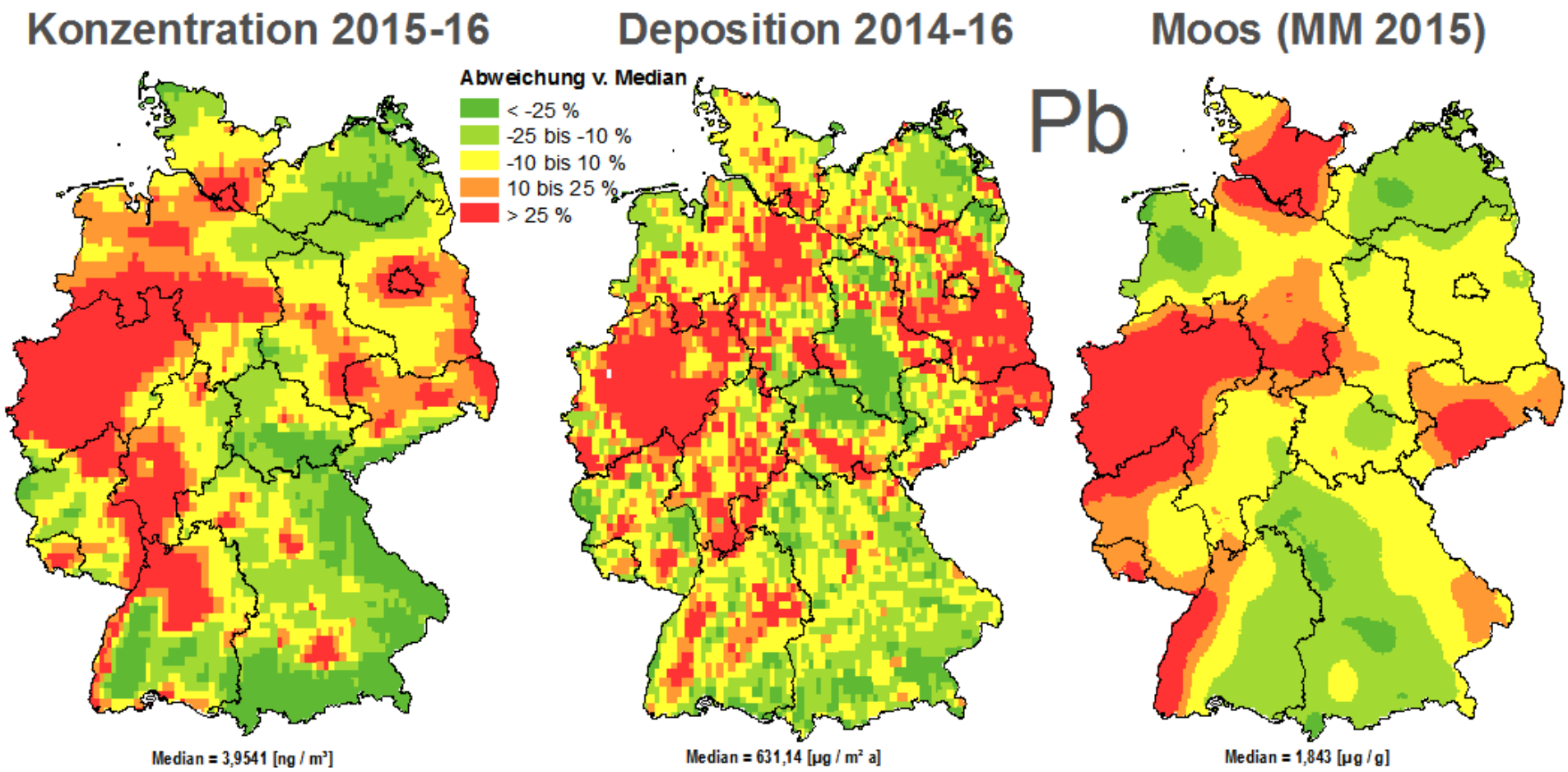
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.2: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



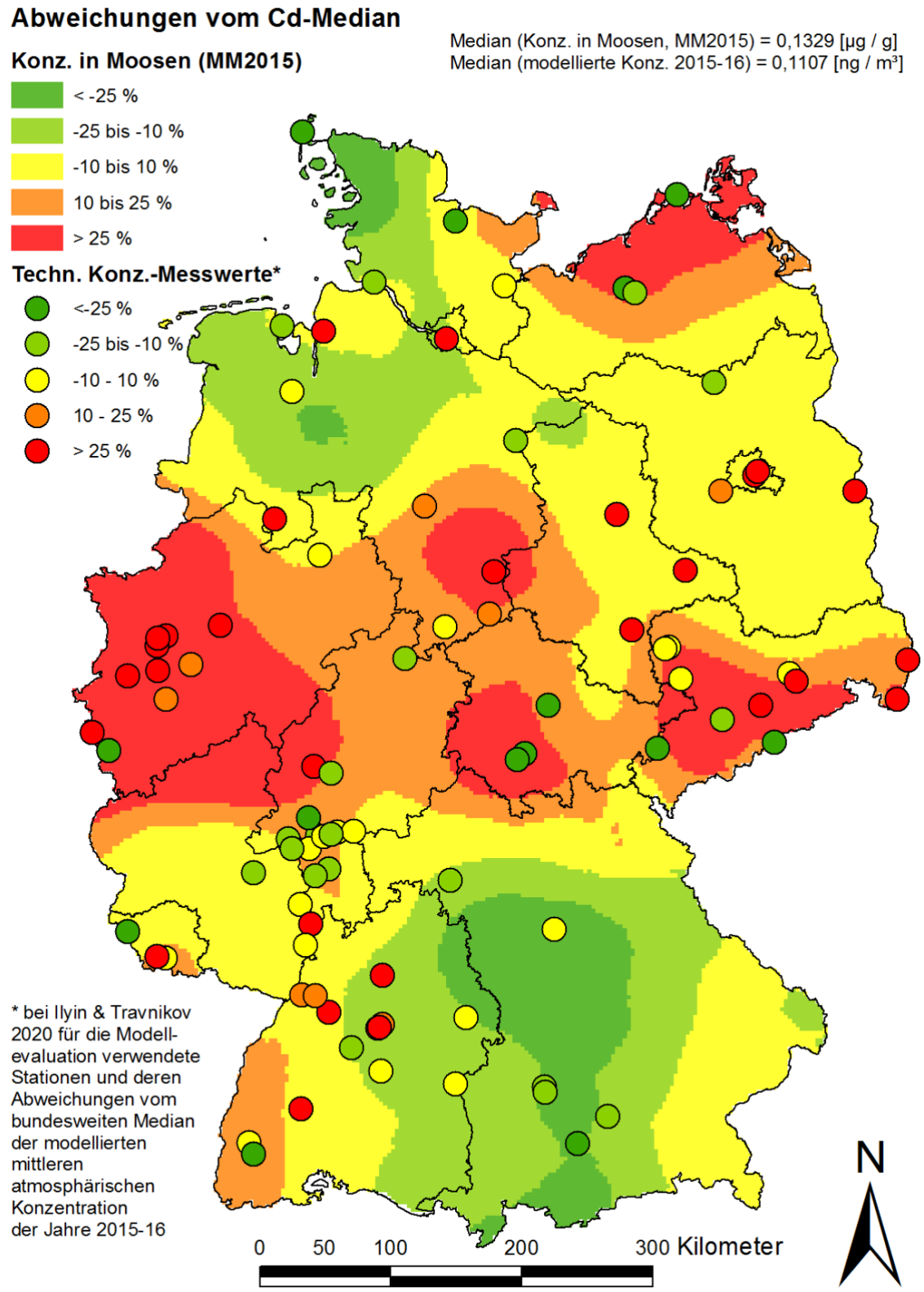
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.3: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median modellierter atmosphärischer Konzentration und Deposition EMEP 0,1° x 0,1°) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



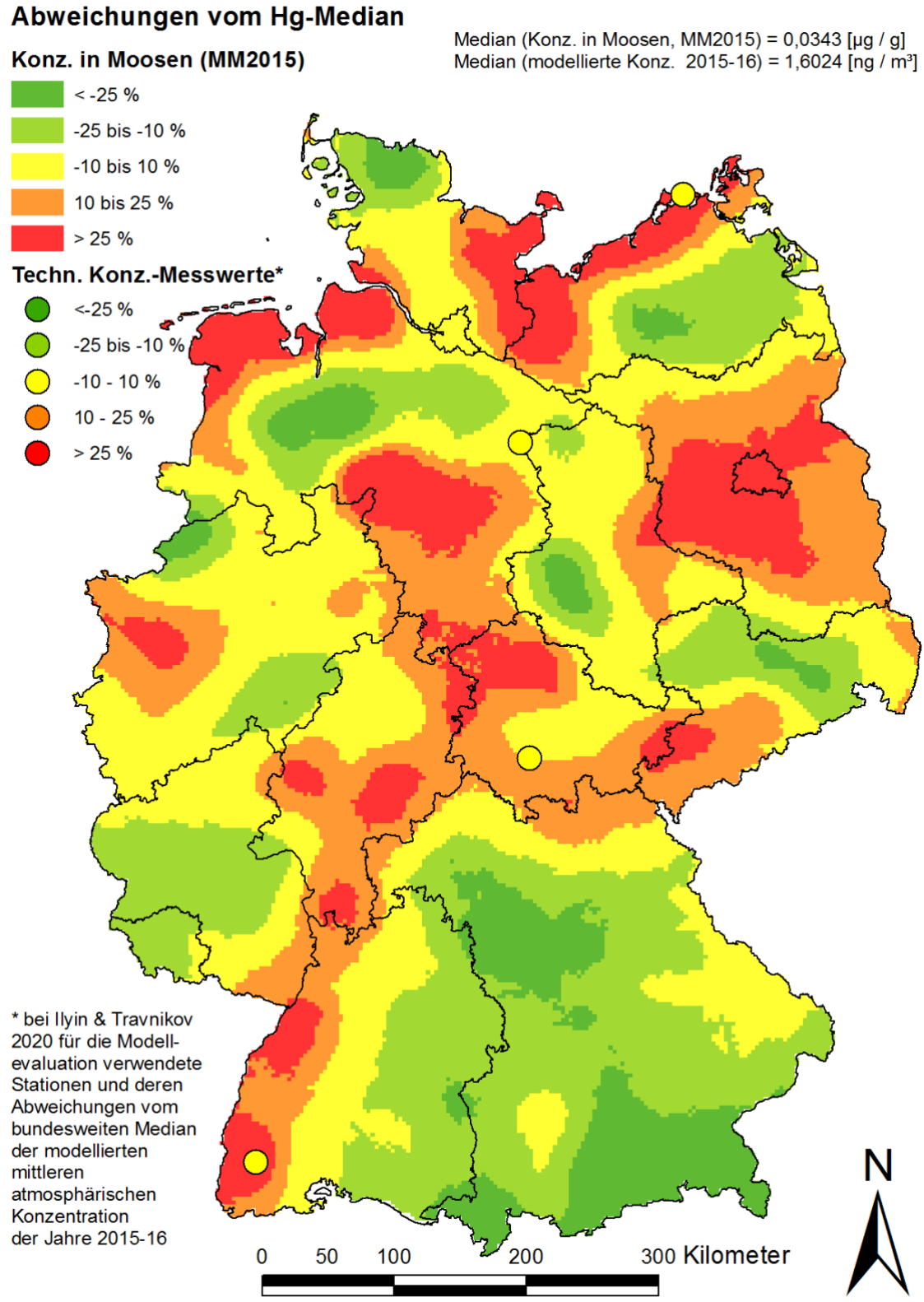
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 03, 04, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.4: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



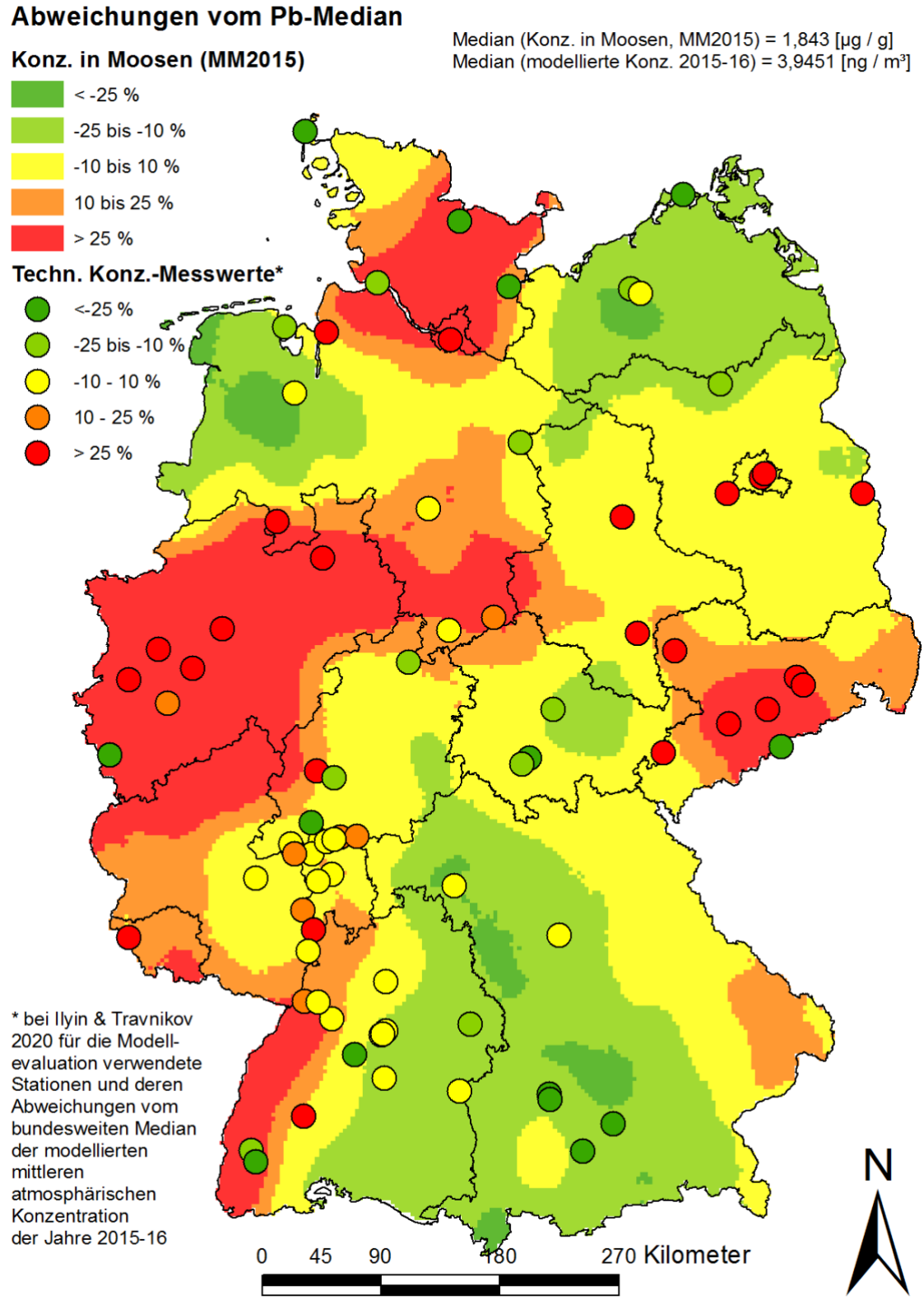
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 06, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.5: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



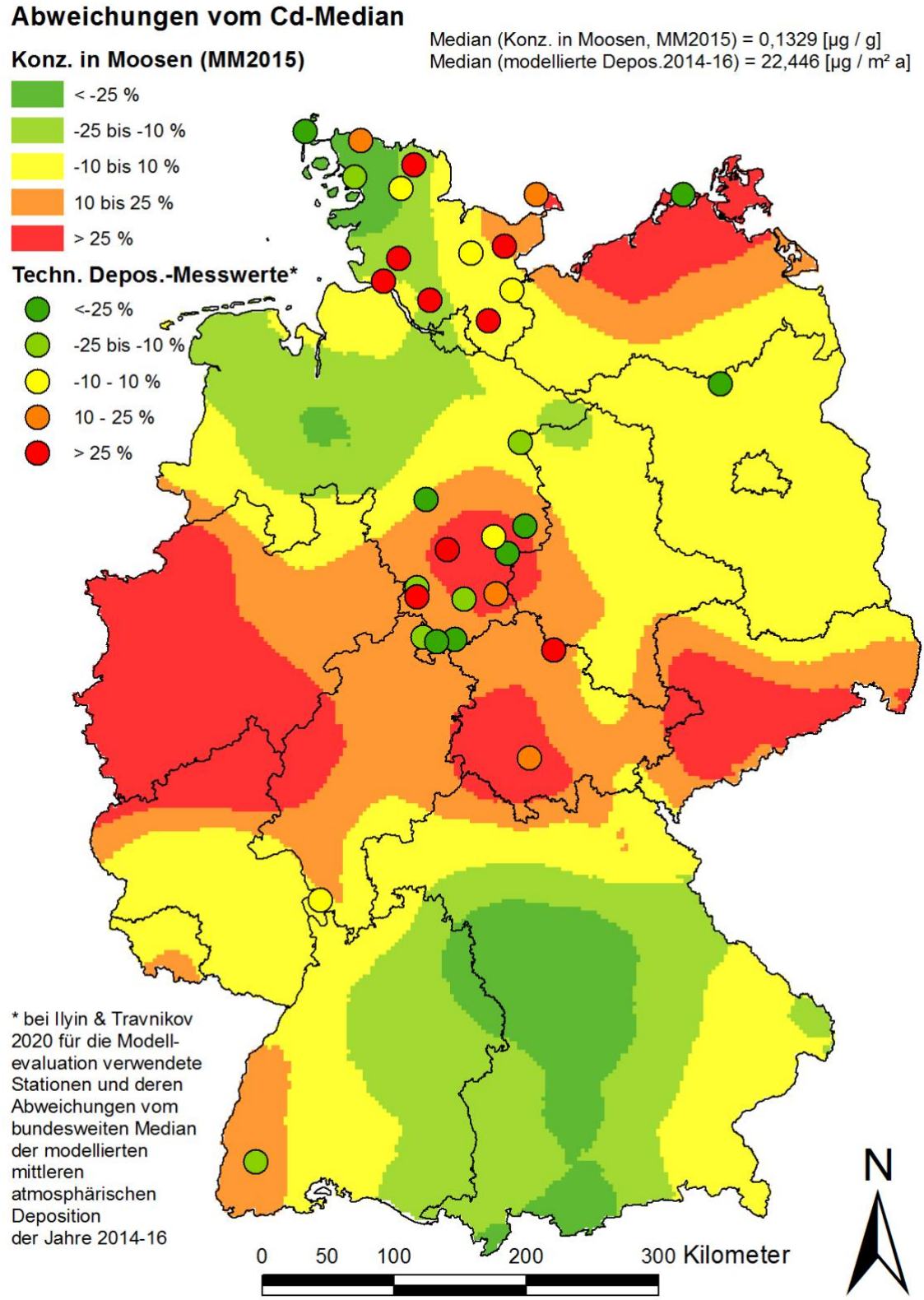
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 06, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.6: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Konzentration (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



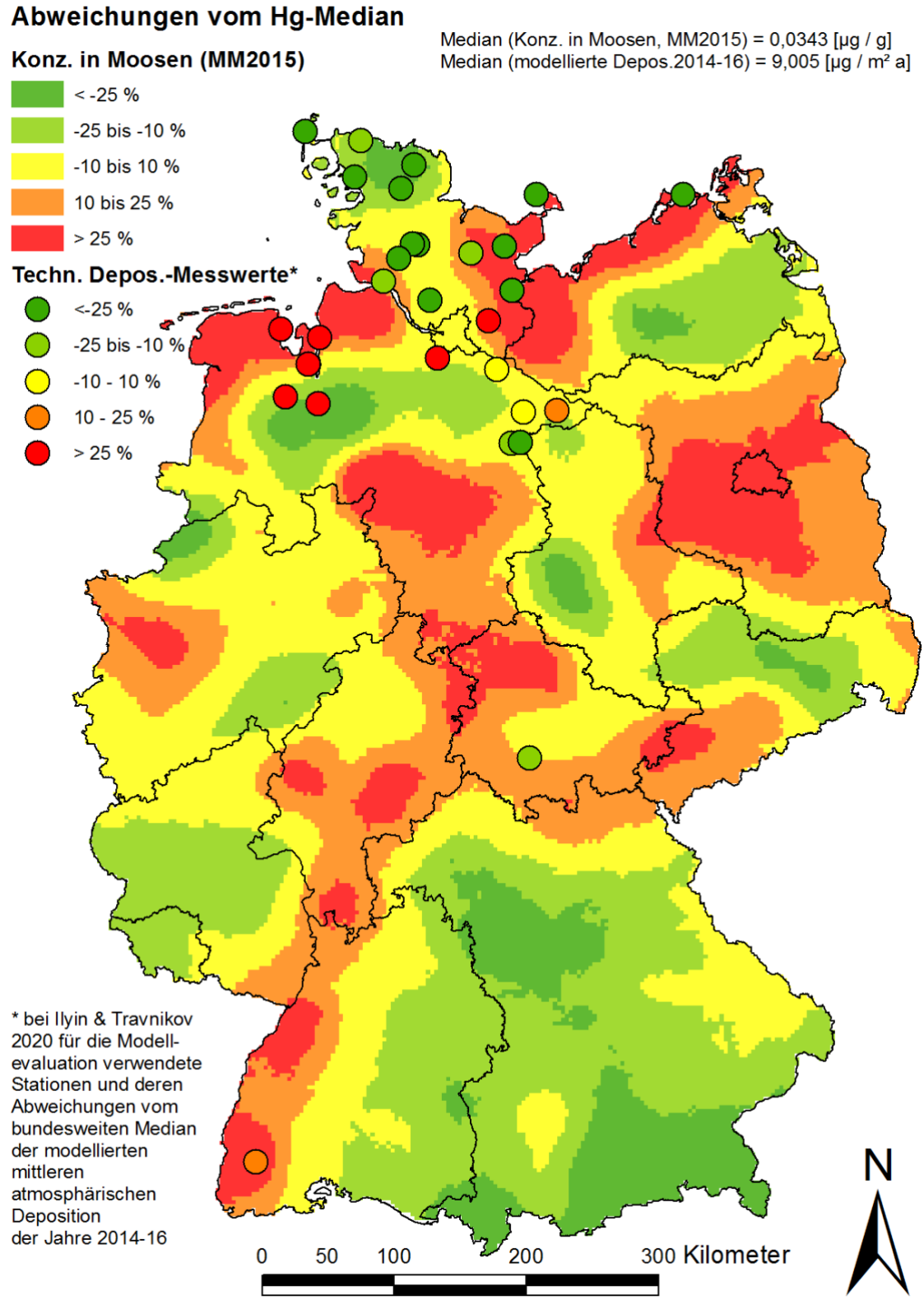
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 06, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.7: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



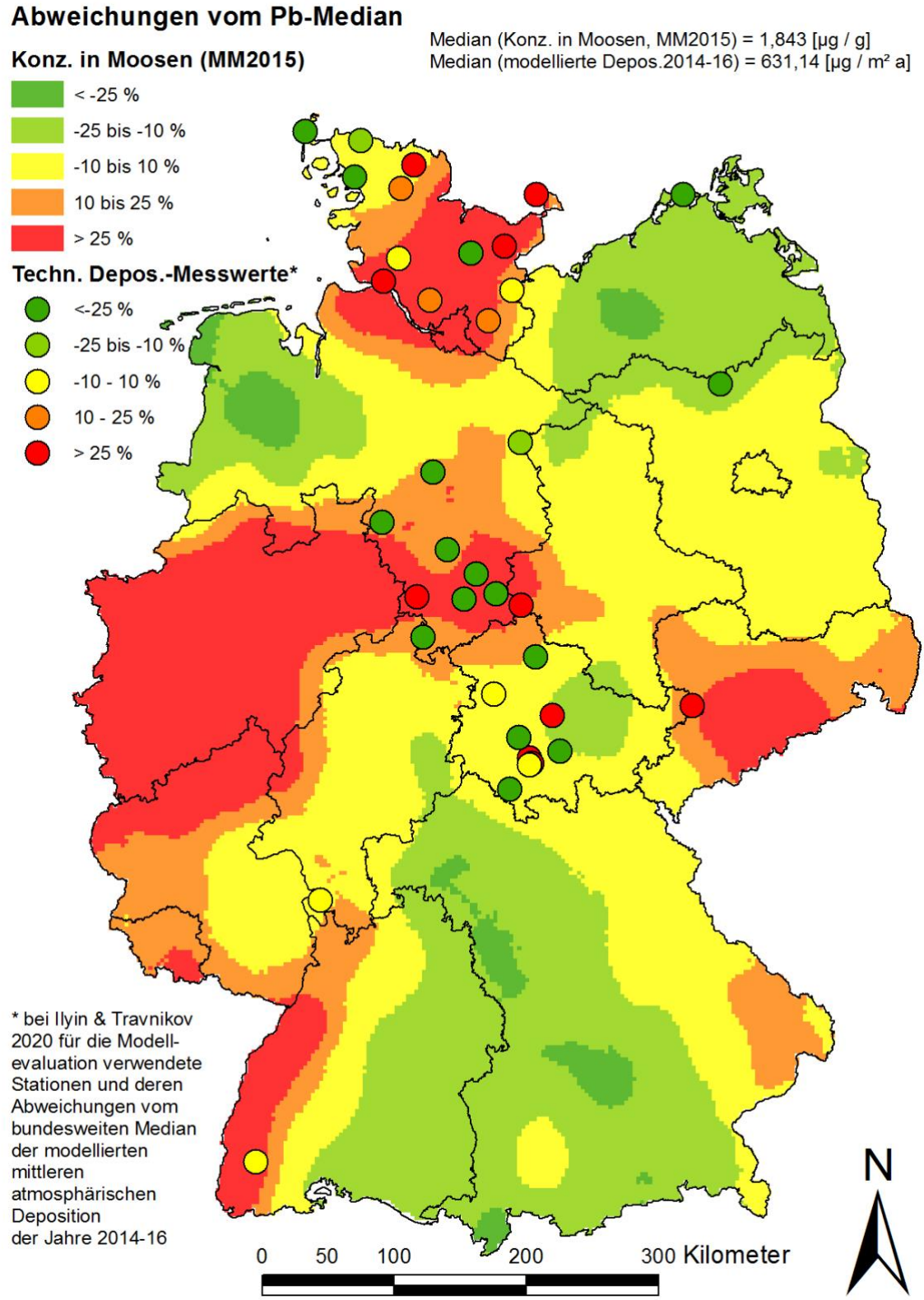
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 07, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.8: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Hg-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



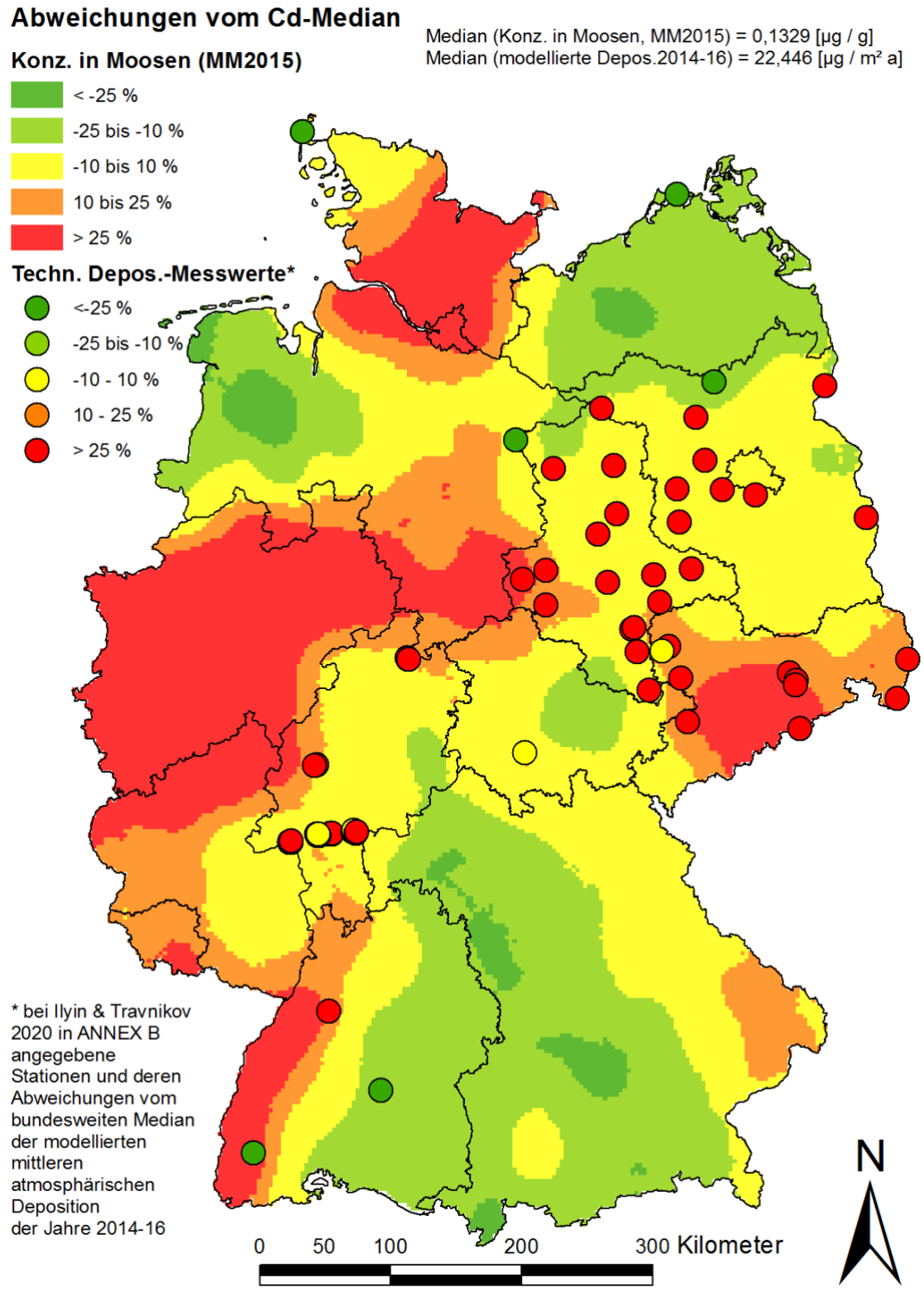
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 07, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.9: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer nasser Deposition (Ilyin et al. 2020) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



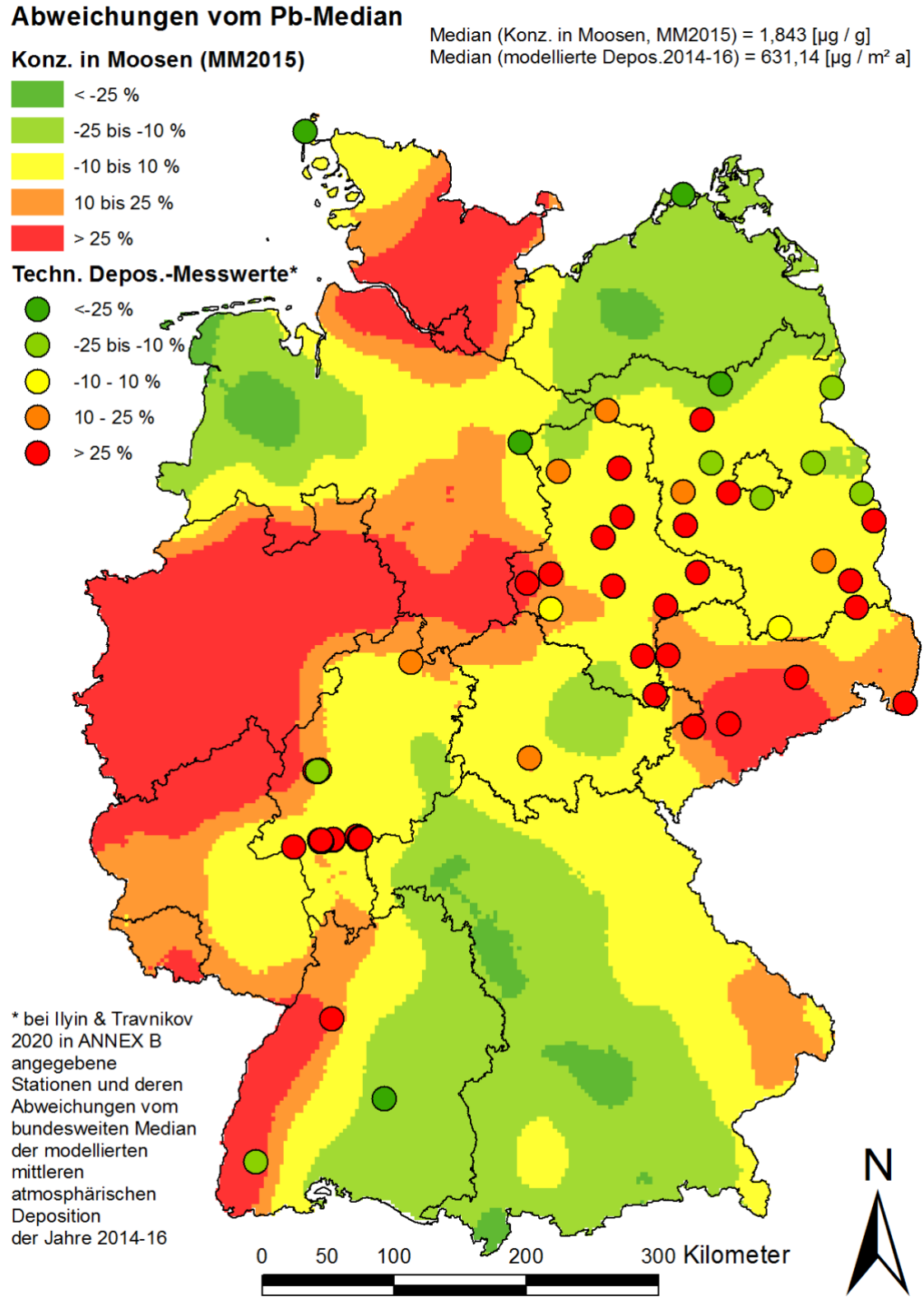
Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 07, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.10: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Cd-Median technisch gemessener atmosphärischer Bulk-Deposition (Ilyin et al. 2020: ANNEX B) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 08, 11 in **Tabelle 1**

Abbildung D.11: Räumliche Verteilungen der Abweichungen vom bundesweiten Pb-Median technisch gemessener atmosphärischer Bulk-Deposition (Ilyin et al. 2020: ANNEX B) und geostatistisch geschätzter Konzentrationen in Moosen (MM2015)



Quelle: Eigene Darstellung, PlanWerk; Datengrundlagen: Datensätze 08, 11 in **Tabelle 1**