

**Erstellung eines Transportkostenminimierungsmodells
zur Berechnung der Schwermetallflüsse auf
landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands
unter Nutzung einer Monte-Carlo-Simulation
zur Ermittlung der Unsicherheiten**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften
im Department Geowissenschaften der Universität Hamburg

vorgelegt von

Ingo Robin Mario Huck

aus Berlin

2011

Tag der mündlichen Prüfung: 02.05.2012

Erstgutachter: Prof. Dr. Hermann Held
Zweitgutachter: Dr. Uwe A. Schneider

Inhalt

1	Abbildungsverzeichnis	6
2	Verzeichnis der Tabellen	8
3	Verzeichnis der Formeln	10
4	Abkürzungsverzeichnis	11
4.1	Parameter für die Berechnung der Eingangsdaten des Transportkostenminimierungsmodells	12
4.2	Items des Transportkostenminimierungsmodells	13
4.3	Parameter des Transportkostenminimierungsmodells	13
4.4	Variablen des Transportkostenminimierungsmodells	14
4.5	Parameter der Berechnung der Netto-Schwermetalleinträge	15
4.5.1	Freundlich-Gleichung und erweiterte Freundlich-Gleichung	15
4.5.2	Konstanten der Freundlich-Gleichung und erweiterten Freundlich-Gleichung	15
5	Einleitung und Zielsetzung	16
6	Material und Methode	19
6.1	Verwendete Geoinformationssysteme	20
6.2	Verwendete Informationen des EPIC-Modells	24
6.3	Zusammenfassende Methodik der Berechnung der Schwermetallfrachten	26
7	Berechnung der Ausgangskonzentration der Schwermetalle in den landwirtschaftlich genutzten Böden	30
8	Verwendete Daten zur Berechnung der mit den Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffmenge	35
8.1	Methodik zur Ermittlung des Anbauumfangs von Ackerkulturen und der Erntemenge in den Kreisen	36
9	Nährstoffbereitstellung durch organische und mineralische Düngemittel	38
9.1	Methodik zur Berechnung des Anfalls der Makronährstoffe mit dem produzierten Wirtschaftsdünger	38
9.2	Methodik zur Berechnung der anfallenden Kompostmenge und Gärrückstände	39
9.3	Methodik zur Berechnung der anfallenden Klärschlammmenge	42
9.4	Methodik zur Berechnung der anfallenden Mineraldüngermenge	43
9.5	Methodik der Berechnung der maximal auszubringenden Klärschlammmenge in den Kreisen unter Beachtung der Klärschlammverordnung und der EG-Verordnung Ökologischer Landbau	44
9.5.1	Nährstoffbedarf	45
9.5.2	Naturschutzgebiete	46
9.5.3	Nationalparks	46
9.5.4	Uferrandstreifen	46
9.5.5	Wasserschutzgebiete	47
9.5.6	Biologisch bewirtschaftete Flächen	47
9.6	Ermittelte, für Klärschlammausbringung geeignete Landwirtschaftsflächen	47
9.7	Methodik der Berechnung der Bedarfe von Kalkdüngemitteln in den Kreisen	48
9.7.1	Ermittlung der Bodenreaktion und der Kalkdüngermenge	48
10	Das Transportkostenminimierungsmodell	51
11	Ergebnisse	58
11.1	Vorsorgewerte	58
11.2	Berechnung der Schwermetalleinträge und -austräge aus den landwirtschaftlichen Flächen 59	
11.2.1	Berechnung des Schwermetallaufkommens durch Wirtschaftsdünger	60
11.2.2	Retention und Exkretion der Schwermetalle	60
11.2.3	Einfluss von Schwermetallen auf das Wachstum von Nutztieren	61
11.2.4	Einfluss von Schwermetallen auf die Gesundheit landwirtschaftlicher Nutztiere	62

11.3	Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern	62
11.4	Methodik zur Berechnung des flächenbezogenen Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Wirtschaftsdünger	63
11.5	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Wirtschaftsdünger	63
11.6	Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärrückständen.....	66
11.7	Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Komposte und Gärrückstände	67
11.8	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Komposte und Gärrückstände.....	67
11.9	Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration im Klärschlamm	69
11.10	Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Klärschlamm	70
11.11	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Klärschlamm	70
11.12	Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Mineraldüngemitteln.....	72
11.13	Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Mineraldünger	73
11.14	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Mineraldünger	73
11.15	Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Pestizide 74	
11.16	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Pestizide.....	76
11.17	Methodik zur Berechnung der atmosphärischen Deposition der Schwermetalle.....	77
11.18	Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Deposition	81
11.19	Ergebnisse der Berechnung der Summe von Schwermetalleinträgen.....	81
12	Schwermetallausträge aus landwirtschaftlichen Böden	84
12.1	Berechnung der Schwermetallaufnahme in landwirtschaftliche Nutzpflanzen	84
12.1.1	Pflanzenspezifische Einflussfaktoren auf die Schwermetallaufnahmemenge	85
12.1.2	Methodik zur Berechnung der Schwermetallentzüge mit der Erntemasse.....	86
12.2	Ergebnisse der Berechnungen der Schwermetallentzüge mit der Erntemasse.....	86
12.3	Methodik zur Berechnung der mit dem Sickerwasser verlagerten Schwermetallmenge....	87
12.4	Ergebnisse der Berechnungen der mit dem Sickerwasser verlagerten Schwermetallmenge 90	
12.5	Methodik zur Berechnung der infolge der Erosion abgetragenen Schwermetallmenge	90
12.6	Ergebnisse der Berechnungen der infolge der Erosion verlagerten Schwermetallmenge...	91
12.7	Ergebnisse der Berechnung der Summe von Schwermetallausträgen	92
12.8	Ergebnisse der Berechnungen des Nettoeinträge der Schwermetalle	93
12.8.1	Ergebnisse der Berechnungen des Netto-Schwermetall-Eintrags	94
13	Abschließende Diskussion der Ergebnisse.....	97
13.1	Diskussion der Methodik und der Erfassung der Unsicherheiten	97
13.2	Validierung der Basisdaten	98
13.2.1	Wirtschaftsdünger	98
13.2.2	Komposte und Gärrückstände	100
13.2.3	Klärschlamm und Klärschlammkompost	101
13.2.4	Mineraldünger	102
13.3	Diskussion der Ergebnisse	105
13.3.1	Wirtschaftsdünger	105
13.3.2	Komposte und Gärrückstände	107
13.3.3	Klärschlamm und Klärschlammkompost	108
13.3.4	Summe der Schwermetalleinträge.....	109
13.3.5	Entzüge mit der Erntemasse	110
13.3.6	Schwermetallkonzentration im Boden	110

13.3.7	Verlagerung mit dem Sickerwasser.....	111
13.3.8	Summe der Schwermetallausträge	111
13.3.9	Differenz der Schwermetalleinträge und der Schwermetallausträge	112
13.4	Strategien zur Reduzierung der Ein- und Austräge der Schwermetalle	112
13.4.1	Minderungen der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger.....	112
13.4.2	Minderungen der Schwermetalleinträge durch Bioabfälle.....	115
13.4.3	Minderungen der Schwermetalleinträge durch Klärschlamm und Klärschlammkompost.....	117
13.4.4	Minderungen der Schwermetalleinträge durch Pflanzenschutzmittel.....	118
13.4.5	Minderungen der Schwermetalleinträge durch atmosphärische Depositionen	119
13.4.6	Zusammenfassende Bewertung der Minderungspotentiale der Schwermetalleinträge 119	
13.4.7	Minderungen der Schwermetallausträge durch die Erosion.....	121
14	Zusammenfassung	122
15	Abstract	124
16	Literatur	126
17	Danksagung	141

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das EMEP-Grid	22
Abbildung 2: Relative Anzahl der Ackerböden, auf denen einer der Vorsorgewerte nach der BBodSchV überschritten wird [%]	59
Abbildung 3: Cu-Eintrag durch Wirtschaftsdünger [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	64
Abbildung 4: Mediane der Summe der Kupfereinträge [g/ha] auf überwiegend ²⁰ mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Ackerböden. Links: Wirtschaftsdünger; Mitte: Rinderhaltung; Rechts: Schweinehaltung	65
Abbildung 5: Überwiegend ²¹ mit Wirtschaftsdüngern gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Cu-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]	66
Abbildung 6: Pb-Eintrag durch Komposte und Gärrückstände [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	68
Abbildung 7: Überwiegend mit Komposten gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Pb-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]	69
Abbildung 8: Pb-Eintrag durch Klärschlamm auf Ackerböden [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	71
Abbildung 9: Überwiegend ²³ mit Klärschlamm und Klärschlammkompost gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Pb-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]	72
Abbildung 10: Cd-Eintrag durch Mineraldünger [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	74
Abbildung 11: Cu-Eintrag durch Pestizide auf Ackerböden [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	77
Abbildung 12: Pb-Depositionsmengen in Europa für das Jahr 2000	78
Abbildung 13: Nickeldepositionen auf Agrarflächen und Übertragung der Daten auf Kreisebene [kg/m ² /a]	79
Abbildung 14: Cd-Deposition [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil) ...	81
Abbildung 15: Summe der Cu-Einträge [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	82
Abbildung 16: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%]	83
Abbildung 17: Entzüge von Chrom mit der Erntemasse auf Ackerflächen [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	87
Abbildung 18: Verlagerung von Cu mit dem Sickerwasser [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	90
Abbildung 19: Abtrag von Cr infolge der Erosion [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	92
Abbildung 20: Summe der Cu-Austräge [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)	93
Abbildung 21: Durchschnittliche Netto-Schwermetalleinträge unter Anwendung der USLE und der RUSL [g/ha]	94
Abbildung 22: Mediane der Netto-Einträge [g/ha/a] (Links: Cadmium, Mitte: Chrom, Rechts: Kupfer)	95

Abbildung 23: Mediane der Netto-Einträge [g/ha/a] (Links: Nickel, Mitte: Blei, Rechts: Zink).....	95
Abbildung 24: Durchschnittlicher Zeitraum, der auf Ackerböden bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV verbleibt [Jahre].....	96
Abbildung 25: Reduktion der Kupfereinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Schweine- und Rindergülle. Linke Abbildung: Berechnung gemäß VDLUFA (2002); rechts: BMVEL UND BMU (2002) [%]	114
Abbildung 26: Reduktion der Zinkeinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Schweine- und Rindergülle. Linke Abbildung: Berechnung gemäß: VDLUFA (2002); rechts: BMVEL UND BMU (2002) [%]	114
Abbildung 27: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Bioabfallkompost von Cd (links), Cu (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von BMVEL UND BMU (2002) [%]	116
Abbildung 28: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Bioabfallkompost von Cd (links), Cu (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von VDLUFA (2002) [%]	116
Abbildung 29: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Klärschlamm von Cu (links), Pb (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von BMVEL UND BMU (2002) [%]	118
Abbildung 30: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Klärschlamm von Cu (links), Pb (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von VDLUFA (2002) [%]	118
Abbildung 31: Relative Minderung der Einträge der Elemente Cd (links), Ni (Mitte) und Pb (rechts) durch Reduktion der Depositionen infolge von Emissionsminderungsmaßnahmen [%]	119

2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Verwendete Geoinformationssysteme	21
Tabelle 2: primäre und sekundäre Landnutzungsformen, die in der ESDB angegeben werden.....	23
Tabelle 3: In der ESDB aufgeführte Texturklassen	24
Tabelle 4: Zuordnung der Kreistypen	31
Tabelle 5: In der ESDB aufgeführte Ausgangsgesteine in Deutschland.....	32
Tabelle 6: Zur Verfügung stehende Kompost- und Gärrückstandsmenge in den Bundesländern	40
Tabelle 7: Anteil von N, P ₂ O ₅ und K ₂ O in Komposten und Gärrückständen	41
Tabelle 8: Maximal tolerierter Schwermetallgehalt im Bioabfallkompost gemäß BioAbfV [mg/kg TM].....	42
Tabelle 9: Maximal tolerierter Schwermetallgehalt im Boden gemäß BioAbfV [mg/kg].....	42
Tabelle 10: Konzentration von N, P ₂ O ₅ und K ₂ O in Klärschlamm	43
Tabelle 11: Umrechnungsfaktoren der Nährstoffgehalte in Düngemittelaufwand ([t/t]).....	44
Tabelle 12: Maximal tolerierte Schwermetallmenge im Boden [mg/kg TM] gemäß AbfKlärV	45
Tabelle 13: Maximal tolerierte Schwermetallkonzentration im Klärschlamm [mg/kg] gemäß AbfKlärV	45
Tabelle 14: Anteile der Gewässernahen und Gewässerfernen landwirtschaftlich genutzten Flächen (Stand: 2005)	46
Tabelle 15: Landwirtschaftlich genutzte Flächen in Wasserschutzgebieten.....	47
Tabelle 16: Kalkungsempfehlungen mineralischer Böden	49
Tabelle 17: Bodenartengruppen nach VDLUFA	50
Tabelle 18: Vorsorgewerte nach der BBodSchV ([mg/kg], Feinboden, Königswasseraufschluss)....	58
Tabelle 19: Zulässige zusätzliche Schadstofffrachten über alle Wirkungspfade gemäß der BBodSchV [g/ha]	59
Tabelle 20: Mittlere Schwermetallkonzentration in den Wirtschaftsdüngern [mg/kg].....	63
Tabelle 21: Mittlere Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger in Deutschland [g/ha].....	64
Tabelle 22: Mittelwerte und Maxima der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärrückständen [mg/kg].....	66
Tabelle 23: Grenzwerte für Bioabfall gemäß Bioabfallverordnung [mg/kg].....	67
Tabelle 24: Schwermetallkonzentration im Klärschlamm [mg/kg]	69
Tabelle 25: Obergrenzen der tolerierten Schwermetallgehalte in Klärschlammen zur Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden gemäß Klärschlammverordnung [mg/kg]	70
Tabelle 26: Mittelwerte und Maxima der Schwermetallgehalte mineralischer Düngemittel [mg/kg]	73
Tabelle 27: Gehalte von Kupfer und Zink in Pflanzenschutzmitteln.....	75
Tabelle 28: Applizierungsmengen der zinkhaltigen Pestizide in Deutschland [t aktiver Substanz]... ..	75
Tabelle 29: Kulturartspezifische Kupferausbringungsmengen in der Europäischen Union [t aktiver Substanz]	75
Tabelle 30: Konzentration der Elemente als Verunreinigung in Pflanzenschutzmitteln [g/kg].....	76
Tabelle 31: In Deutschland ausgebrachte Pflanzenschutzmittel [t aktiver Substanz].....	76
Tabelle 32: Unsicherheiten der Schwermetallkonzentration und -Deposition im Modell von MSC-East	79
Tabelle 33: Jährliche Schwermetalleinträge durch nasse Depositionen [g/ha].....	80
Tabelle 34: Mittelwerte der Summen der Schwermetalleinträge in Deutschland.....	82
Tabelle 35: Einflussfaktoren der Schwermetallaufnahme in Pflanzen	84
Tabelle 36: Perzentile der substratübergreifenden Freundlich-Koeffizienten und Freundlich-Exponenten.....	88
Tabelle 37: Isothermenparameter der Sorptionsisotherme von Oberböden	88
Tabelle 38: Prozentuale Anteile und Summen der durchschnittlichen Schwermetallausträge bei Anwendung der USLE und der RUSL	93

Tabelle 39: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern mit Literaturangaben [mg/kg]	98
Tabelle 40: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärrückständen mit Literaturangaben [mg/kg]	101
Tabelle 41: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Klärschlamm und Klärschlammkompost mit Literaturangaben [mg/kg]	102
Tabelle 42: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Mineraldüngern mit Literaturangaben [mg/kg]	103
Tabelle 43: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Wirtschaftsdüngerausbringungsmengen und der resultierenden Schwermetalleinträge auf Ackerflächen in Göppingen, Ludwigsburg und Osterholz mit Literaturangaben	106
Tabelle 44: Vergleich der Summe der Schwermetalleinträge durch organische und mineralische Dünger auf mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Ackerflächen Niederbayerns mit Literaturangaben	107
Tabelle 45: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Kompostausbringung und der Schwermetalleinträge durch Bioabfallkomposte in Recklinghausen mit Literaturangaben	108
Tabelle 46: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Kompostausbringungsmengen und der Summe der Schwermetalleinträge durch Düngemittel auf mit Bioabfallkomposten gedüngten Ackerflächen Niederbayerns mit Literaturangaben	108
Tabelle 47: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Klärschlammausbringungsmengen und der Summe der Schwermetalleinträge durch Düngemittel auf mit Klärschlamm gedüngten Flächen Niederbayerns mit Literaturangaben	109
Tabelle 48: Vergleich der Summe der Schwermetalleinträge mit Literaturangaben im Wetteraukreis [g/ha]	110
Tabelle 49: Vergleich der Ernteentzüge mit Literaturangaben [g/ha]	110
Tabelle 50: Vergleich der berechneten Schwermetallausträge mit dem Sickerwasser mit Literaturangaben [g/ha]	111
Tabelle 51: Vergleich der Summe der Schwermetallausträge mit Literaturangaben [g/ha]	112
Tabelle 52: Vorgeschlagene Grenzwerte der Schwermetallkonzentration in Schweinegülle und Rindergülle [mg/kg]	113
Tabelle 53: Vorschläge neuer Grenzwerte für Bioabfallkomposte nach BMVEL und BMU (2002) und VDLUFA (2002) [mg/kg]	115
Tabelle 54: Vorschläge neuer Grenzwerte für Klärschlämme nach BMVEL und BMU (2002) und VDLUFA (2002) [mg/kg]	117
Tabelle 55: Vergleichende Darstellung der Reduktionspotentiale der Schwermetalleinträge [%] ...	120

3 Verzeichnis der Formeln

Formel 1: Zur Klärschlammausbringung geeignete Flächen	48
Formel 2: Zielfunktion	52
Formel 3: Minimum der Nährstoffzufuhr	52
Formel 4: Maximum der Nährstoffzufuhr durch mineralische Düngemittel	53
Formel 5: Minimum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs	53
Formel 6: Maximum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs.....	54
Formel 7: Minstdüngemenge mineralischen Stickstoffs	54
Formel 8: Identität der Summe der Kompost-, Klärschlamm- bzw. Mineraldüngermenge.....	54
Formel 9: Identität der Summe der Wirtschaftsdüngermenge	54
Formel 10: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten, fermentierten und ausgebrachten Wirtschaftsdüngermenge	55
Formel 11: Fermentation der Wirtschaftsdünger	55
Formel 12: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Komposte und Klärschlämme	55
Formel 13: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Mineraldünger	56
Formel 14: Limitierung der Düngemitelesatzmengen durch entsprechende Verordnungen	56
Formel 15: Übereinstimmung der Summe der Anbauflächen je Kreis	56
Formel 16: Identität der irrigierten Flächengröße	56
Formel 17: Limitierung der Flächen auf Grundlage der minimalen Erntemenge	57
Formel 18: Limitierung der Flächen auf Grundlage der maximalen Erntemenge	57
Formel 19: Flächenbezogener Schwermetalleintrag durch Wirtschaftsdünger	63
Formel 20: Berechnung des Schwermetalleintrags durch Komposte und Gärrückstände	67
Formel 21: Flächenbezogener Schwermetalleintrag durch Klärschlammausbringung.....	70
Formel 22: Berechnung des durch Mineraldünger erfolgenden Schwermetalleintrags	73
Formel 23: Die Freundlich-Gleichung	87
Formel 24: Erweiterte Freundlich-Gleichung	88
Formel 25: Bodenabtragsgleichung	91

4 Abkürzungsverzeichnis

Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Ni	Nickel
Pb	Blei
Zn	Zink
ESDB	European Soil Database (EUROPEAN COMMUNITIES, 2009)
AbfKlärV	Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010)
BioAbfV	Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden vom (BIOABFV, 2010).
DüV	Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung; DüV, 2009)
GIS	Geoinformationssystem
ID	Identifikationsnummer
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
N	Stickstoff
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
K ₂ O	Kaliumoxid
C _{Org}	Organischer Kohlenstoff
USLE	Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
TM	Trockenmasse
FM	Frischmasse
HRU	Homogenous Response Unit. Homogene Eigenschaften von Flächen, die auf der Höhenlage, der Hangneigung, der Textur, der Bodentiefe und des Steingehalts des Bodens basieren (vgl. SKALSKY ET AL., 2008)

4.1 **Parameter für die Berechnung der Eingangsdaten des Transportkostenminimierungsmodells**

$\alpha_{KR}^{KlaerMax}$	Maximal für die Klärschlammausbringung verfügbare Fläche je Kreis [1000 ha]
$\alpha_{KR,C_{Klaer}}^{CROP}$	Angebaute Pflanzenarten je Kreis, ausgenommen Grünland-, Obst- oder Gemüseflächen [1000 ha]
α_{KR}^{Inp}	Landwirtschaftlich genutzte Flächen in Nationalparks [1000 ha]
β_{KR}^{nsg}	Der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche in Naturschutzgebieten [%]
β_{KR}^{bio}	Flächenanteil biologisch bewirtschafteter Flächen [%]
β_{KR}^{wsg}	Flächenanteil Wasserschutzgebiete [%]
β_{KR}^{urs}	Flächenanteil Uferrandstreifen [%]
β_{KR}^{gw}	Flächenanteil, bei dem der Grenzwert der Schwermetallkonzentration im Boden nicht überschritten und der Grenzwert der Bodenreaktion nicht unterschritten wird [%]

4.2 Items des Transportkostenminimierungsmodells

A	Tierart (Kühe, Schweine, Legehennen, Broiler, anderes Geflügel, Pferde, Schafe)
C	Pflanzenart (Weizen, Hafer, Roggen, Mais, Gerste, Zuckerrüben, Erbsen, Kartoffeln, Raps, Triticale)
D	Wirtschaftsdünger: Gülle oder Mist
DU	Dünger (Wirtschaftsdünger, Komposte, Klärschlämme, Mineraldünger)
E	Exportierender Kreis
EBL	Exportierendes Bundesland
H	HRU (Jeweilige Höhenlage, Hangneigung, Textur, Tiefe und Steingehalt des Bodens)
I	Importierender Kreis
IBL	Importierendes Bundesland
T	Bewirtschaftungssystem Bewässert und konventionelle Bodenbearbeitung Bewässert und reduzierte Bodenbearbeitung Unbewässert und konventionelle Bodenbearbeitung Unbewässert und reduzierte Bodenbearbeitung
T _{Irr}	Bewässerte Bewirtschaftungssysteme Bewässert und konventionelle Bodenbearbeitung Bewässert und reduzierte Bodenbearbeitung
KL	Klärschlammart (Klärschlamm aus öffentlichen oder nichtöffentlichen Anlagen, Klärschlammkompost)
KO	Komposte und Gärrückstände (Bioabfallkompost, Flüssige Gärrückstände, Feste Gärrückstände, Grüngutabfallkompost)
KR	Landkreis oder kreisfreie Stadt
M	Mineraldüngerart
N	Stickstoff, Phosphor oder Kalium, Trockenmasse, organischer Kohlenstoff, Kalk, basisch wirksame Bestandteile organischer Düngemittel
P	Ausgangsgestein

4.3 Parameter des Transportkostenminimierungsmodells

$\alpha_{KR,C}^{crop}$	Angebaute Pflanzenarten je Kreis [1000 ha]
α_{KR}^{irr}	Bewässerte Flächen je Kreis [1000 ha]
$\tau_{E,I,A,D}^{wirt}$	Transportkosten der Wirtschaftsdünger von Kreis E zu Kreis I [€/t]
$\tau_{E,I,KO}^{komp}$	Transportkosten der Komposte [€/t]
$\tau_{E,I,KL}^{klaer}$	Transportkosten der Klärschlämme [€/t]
$\tau_{EBL,IBL,M}^{komp}$	Transportkosten der Mineraldünger von Bundesland EBL(Exporter) zu Bundesland IBL(Importer) [€/t]
$\pi_{KR,A,D,N}^{wirt}$	Nährstoffgehalt und Gehalt organischen Kohlenstoffs der Wirtschaftsdünger je Tierart [kg/t] bzw. Trockenmassegehalt [kg/kg]
$\pi_{KR,KO,N}^{komp}$	Nährstoffgehalt und Gehalt organischen Kohlenstoffs der Komposte [kg/t] bzw. Trockenmassegehalt [kg/kg]

$\pi_{KR,KL,N}^{klaer}$	Nährstoffgehalt und Gehalt organischen Kohlenstoffs der Klärschlämme [kg/t] bzw. Trockenmassegehalt [kg/kg]
$\pi_{KR,M,N}^{mine}$	Nährstoffgehalt der Mineraldünger [kg/t]
β_{KR}^{gwirt}	Anteil der Wirtschaftsdünger an den Gärrückständen [%]
$\nu_{A,D}^{gwirt}$	Umrechnungsfaktor vom Trockmasseanteil der Gärrückstände zum Trockenmasseanteil von Wirtschaftsdüngern je Tierart [kg/kg]
$\chi_{KR,H,C,T,N}^{crop}$	Nährstoffbedarf, Bedarf an organischem Kohlenstoff oder berechneter Kalkungsbedarf [kg/ha]
$\chi_{KR,H,C,T,"N"}^{crop}$	Stickstoffbedarf [kg/ha]
$\chi_{KR,H,C,T,"COrg"}^{crop}$	Bedarf an organischem Kohlenstoff [kg/ha]
$\mathcal{O}_{KR,A,D}^{wirt}$	Produzierte Wirtschaftsdüngermenge je Kreis [1000 t FM]
$\mathcal{O}_{KR,DU}^{komp}$	Abgegebene Kompostmenge je Kreis [1000 t FM]
$\mathcal{O}_{KR,DU}^{klaer}$	Abgegebene Klärschlammmenge je Kreis [1000 t FM]
$\mathcal{O}_{BL,DU}^{komp}$	Abgegebene Mineraldüngermenge je Bundesland [1000 t FM]
γ_C^{crop}	Ertrag [t/ha]
$\theta_{KR,H,C,T}^{min}$	Minimaler Ertrag je Technologie [t/ha]
$\theta_{KR,H,C,T}^{max}$	Maximaler Ertrag je Technologie [t/ha]
δ_C^{max}	Menge des auf Ackerflächen maximal zuzuführenden organischen Kohlenstoffs als Differenz zum Nettoaustrag: $100 \frac{kg C_{Org}}{ha}$
δ_C^{min}	Menge des mindestens zuzuführenden organischen Kohlenstoffs als Differenz zum Nettoaustrag: $75 \frac{kg C_{Org}}{ha}$
$\psi_{KR,N}^{crop}$	Aufgrund der Verordnungen maximal tolerierte Ausbringungsmenge von Stickstoff bei Wirtschaftsdüngern und anteilig von Gärrückständen (DüV), Trockenmasse der Bioabfallkomposte (BioAbfV) und Trockenmasse der Klärschlämme (AbfKlärV)

4.4 Variablen des Transportkostenminimierungsmodells

$TRANSCOST$	Transportkosten, die im Modell minimiert werden [1000 €]
$CROP_{KR,H,C,T}$	Anbauumfang je Pflanzenart [1000 ha]
$WIRT_{KR,A,D,C}$	Ausgebrachte Wirtschaftsdünger je Kreis [1000 t FM]
$GWIRT_{KR,A,D}$	Ausgebrachte Gärrückstandsmenge, die auf Wirtschaftsdünger zurückzuführen ist [1000 t FM]
$KOMP_{KR,KO,C}$	Ausgebrachte Kompostmenge je Kreis [1000 t FM]
$KLAER_{KR,KL,C}$	Ausgebrachte Klärschlammmenge je Kreis [1000 t FM]
$MINE_{KR,M,C}$	Ausgebrachte Mineraldüngermenge je Kreis [1000 t]
$WTRS_{E,I,A,D}$	Transportmenge der Wirtschaftsdünger [1000 t FM]
$KOTRS_{E,I,KO}$	Transportmenge der Komposte [1000 t FM]

$KLTRS_{E,I,KL}$	Transportmenge der Klärschlämme [1000 t FM]
$MTRS_{EBL,IBL,M}$	Transportmenge der Mineraldünger [1000 t]

4.5 Parameter der Berechnung der Netto-Schwermetalleinträge

$\theta_{C,T}$	Ermittelter Ertrag je Technologie [t/ha]
$e_{KR,A,C,HM}^{wirt}$	Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger [g/ha]
$e_{KR,KO,C,HM}^{komp}$	Schwermetalleinträge durch Komposte [g/ha]
$e_{KR,KL,C,HM}^{klaer}$	Schwermetalleinträge durch Klärschlamm [g/ha]
$e_{KR,M,C,HM}^{mine}$	Schwermetalleinträge durch Mineraldünger [g/ha]
$e_{KR,C,HM}^{crop}$	Schwermetallausträge mit der Erntemasse [g/ha]
$\pi_{A,D, "TM"}^{wirt}$	Trockenmassegehalt Wirtschaftsdünger [%]
$\omega_{A,D, HM}^{wirt}$	Konzentration der Schwermetalle im Wirtschaftsdünger [mg/kg TM]
$\omega_{KO, HM}^{komp}$	Konzentration der Schwermetalle im Kompost [mg/kg TM]
$\omega_{KL, HM}^{klaer}$	Konzentration der Schwermetalle im Klärschlamm [mg/kg TM]
$\omega_{M, HM}^{mine}$	Konzentration der Schwermetalle im Mineraldünger [mg/kg]
$\omega_{C, HM}^{crop}$	Konzentration der Schwermetalle in der Erntemasse [mg/kg]

4.5.1 Freundlich-Gleichung und erweiterte Freundlich-Gleichung

$\omega_{KR,H,C,P, HM}^{sorb}$	Sorbierte Elementkonzentration [$\mu\text{g kg}^{-1}$]
$\omega_{P, HM}^{solu}$	Schwermetall-Konzentration in der Lösung [$\mu\text{g L}^{-1}$]
$\omega_{KR,H,C,T, "pH"}^{soil}$	pH(CaCl_2)-Wert (H^+ -Konzentration) des Bodens
$\omega_{KR,H,C,T, "C_{Org}"}^{soil}$	Konzentration organisch gebundenen Kohlenstoffs im Bodens (in Masse-%)
$\omega_{KR,H,C,T, "Ton"}^{soil}$	Tongehalt des Bodens (in Masse-%)

4.5.2 Konstanten der Freundlich-Gleichung und erweiterten Freundlich-Gleichung

K	Freundlich-Koeffizient [$\mu\text{g}^{1-n} \text{L}^n \text{kg}^{-1}$]
K^*	„intrinsischer“ Sorptionskoeffizient
n	Freundlich-Exponent [-]

5 Einleitung und Zielsetzung

Landwirtschaftliche Böden dienen unter anderem der Produktion von Futter- und Nahrungsmittelpflanzen¹. Um die Erträge optimieren zu können, werden Düngemittel eingesetzt und es werden Pflanzenschutzmittel aufgebracht, um die Erträge abzusichern. Die Düngemittel und Pestizide enthalten Nährstoffe oder Wirkstoffe, jedoch auch teilweise unerwünschte Schwermetalle. Diese werden in der landwirtschaftlichen Fläche akkumuliert, durch die Bodenerosion von den Landwirtschaftlichen Flächen abgetragen, von den Pflanzen aufgenommen und mit dem Sickerwasser im Boden verlagert.

Einflüsse der Schwermetallakkumulation bestehen in der Veränderung der Mikroorganismen im Boden, der Bodenflora und -fauna² sowie der Aufnahmemenge in die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, des Stofftransportes und des Wachstums der Pflanzen³.

Es gibt darüber hinaus einen Einfluss der langfristigen Schwermetallakkumulation im Boden, wenn diese in den essbaren Teilen der Nutzpflanzen angereichert werden und schließlich nach der Ernte als Lebensmittel konsumiert werden, da durch eine vermehrte Aufnahme der nicht essentiellen Schwermetalle in den menschlichen Körper gesundheitsschädigende Wirkungen möglich sind⁴. Des Weiteren können Schwermetalle infolge der Auswaschung verlagert werden und durch die Bodenerosion in andere Gebiete oder in Oberflächengewässer gelangen.

Die Höhe der Einträge und Austräge der Schwermetalle kann auf einzelnen landwirtschaftlichen Flächen ermittelt werden (vgl. MALBURG-GRAF UND BLÜMEL, 2002) oder mittels einer modellhaften Abbildung berechnet werden, wobei in unterschiedlichen Modellen Landkreise, Regionen, Bundesländer oder die gesamte Bundesrepublik erfasst werden. HACKENBERG UND WEGENER (1999) haben für die Landkreise Gießen und Recklinghausen eine Schwermetallbilanz erstellt, die auf Annahmen in unterschiedlichen Szenarien basieren. Bei dieser Methode werden in Szenarien Annahmen getroffen, um die zur Verfügung stehenden Wirtschaftsdünger, Komposte und Klärschlämme auf die Flächen zu verteilen. Auch MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002) treffen Annahmen, welche die Verteilung der Wirtschaftsdünger in den Landkreisen Ludwigsburg und Göttingen auf die landwirtschaftlichen Flächen begründen. MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002) geben zudem Untersuchungsergebnisse auf einzelnen Flächen in den Landkreisen an. KNAPPE ET AL. (2008) haben für unterschiedliche Anbautypen und Anbauregionen den jeweiligen Nährstoffbedarf der Pflanzen ermittelt und mittels unterschiedlicher Düngestrategien, die auf den Stickstoffbedarfen basieren, die jeweiligen Schwermetalleinträge berechnet. Dabei unterscheiden sie die Einträge, die im ökologischen und konventionellen Anbau

¹ siehe Definitionen der Bodenfunktionen im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBODSCHG, 1998)

² Vgl. VAISVALAVICIUS ET AL. (2006), ANTIL ET AL. (2006), ROS ET AL. (2009), SPURGEON ET AL. (2007), GILLER ET AL. (1997)

³ Insbesondere beim Element Cadmium wurden Zusammenhänge zwischen der Konzentration des Schwermetalls im Boden und der Aufnahme desselben in die Pflanzen und des Transportes in den Pflanzen festgestellt (vgl. LEHOCZKY UND KISS, 2002; CHUNILALL ET AL., 2004; MOUSTAKAS ET AL., 2001). Cadmium hat in hohen Konzentrationen negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum (vgl. KEVRESAN ET AL., 2001; MICHALSKA UND ASP, 2001).

⁴ Vgl. BARCELOUX (1999A, 1999B), KIMBROUGH ET AL. (1999), SOVCIKOVA ET AL. (1997), VEROUGSTRAETE ET AL. (2003)

erfolgen. ZÖRNER (2010) hat den in Hessen anfallenden Klärschlamm und die im Untersuchungsgebiet anfallende Wirtschaftsdüngermenge entsprechend der Phosphordüngebedarfe auf die konventionell bewirtschafteten Ackerflächen verteilt.

In diesen Modellen werden jeweils Annahmen getroffen, die basierend auf den Nährstoffbedarfsmengen der Pflanzen Düngestrategien ergeben, auf deren Basis die Schwermetalleinträge berechnet werden. Die Berechnung der Einträge erfolgt jeweils innerhalb eines definierten Gebietes, zum Beispiel auf Feldebene oder auf Kreisebene. Die Feldebene ermöglicht einen Vergleich der modellhaft berechneten und der innerhalb eines definierten Zeitraums gemessenen Schwermetalleinträge. Dabei müssen die jeweils eingesetzte Düngemittelmenge sowie die darin enthaltene Schwermetallkonzentration und die Schwermetallmenge, die durch die atmosphärische Deposition eingetragen wurde, bekannt sein. Die Ergebnisse lassen sich jedoch nicht auf andere Flächen des Kreises übertragen. Eine Modellierung auf Kreisebene ermöglicht im Vergleich zu einer Modellierung auf Regierungsbezirksebene oder Bundeslandesebene eine genauere Berücksichtigung der Tierbestände, Ernteerträge und Anbauflächen der unterschiedlichen Pflanzenarten, die auf Kreisebene verfügbar sind. Die jeweiligen Ausgangsgesteine können auf Kreisebene ebenfalls besser berücksichtigt werden als auf Regierungsbezirksebene oder Bundeslandesebene, sofern diese auf einem 1 km²-Raster verfügbar sind.

In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, auf Grundlage eines linearen Optimierungsmodells, welches die Transportkosten der Düngemittel minimiert, die Menge der ausgebrachten Düngemittel in der Bundesrepublik Deutschland auf Kreisebene zu ermitteln. Die Einsatzmengen der Düngemittel werden in dem Transportkostenminimierungsmodell auf Grundlage der jeweiligen Nährstoffbedarfe und des Bedarfes organischen Kohlenstoffs, aus der zur Verfügung stehenden Düngemittelmenge und den Kosten des Düngemitteltransportes berechnet.

Die Anbauflächen und Erntemengen der Pflanzenarten sowie die Anzahl der gehaltenen Tiere werden den Angaben von STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011A, 2011B, 2011C, 2011D und 2011F) auf Kreisebene entnommen. Im Modell EPIC⁵ werden die Erträge in Abhängigkeit von der Bewässerungsart und der Bodenbearbeitung gemeinsam mit den jeweiligen Nährstoffdüngemengen von Stickstoff und Phosphor angegeben und in dieser Arbeit verwendet. Des Weiteren werden dem EPIC-Modell die Austragsmengen organischen Kohlenstoffs und die in den Ernterückständen verbleibenden Mengen organischen Kohlenstoffs entnommen.

Die Summe aller Transportkosten der Düngemittel sollen in dieser Arbeit mittels eines linearen Optimierungsmodells minimiert werden, so dass sich bei einer vorgegebenen Anbaufläche und einer Einhaltung der Erntemenge unter Beachtung der Nährstoffbedarfe, der zu erhaltenden Humuskonzentration im Boden und der jeweiligen zu beachtenden Verordnungen⁶ die wirtschaftlich optimale Verteilung organischer und mineralischer Düngemittel ergibt.

Weiterführend wird in der Arbeit das Ziel verfolgt, die Hauptbelastungspfade der Schwermetalleinträge auf Kreisebene unter Angabe der Unsicherheiten zu ermitteln sowie die Nettoeinträge und die Effizienz von Min-

⁵ WILLIAMS (1995), WANG ET AL. (2005)

⁶ Berücksichtigt werden die DÜV (2009), die BIOABFV (2010), die ABFKLÄRV (2010) und die VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008)

derungsmaßnahmen zu quantifizieren. In dem verwendeten Transportkostenminimierungsmodell sollen durch die Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation die jeweils statistisch erhobenen Bedarfe und verfügbare Mengen der Nährstoffe berücksichtigt werden, um die Unsicherheiten der Einsatzmengen innerhalb der Modellannahmen abbilden zu können.

Die Austräge der Schwermetalle umfassen die mit der Erntemasse entzogene, die mit der Auswaschung verlagerte und die durch Erosion abgetragene Schwermetallmenge.

In den zitierten Publikationen MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002), KNAPPE ET AL. (2008) und ZÖRNER (2010) werden die Schwermetallausträge durch die Erosion nicht berücksichtigt. Doch die Berechnung der durch Erosion ausgetragenen Schwermetallaustragsmengen und die anschließenden Bilanzierung der Nettoeinträge unter Berücksichtigung der Erosion ist auf den Flächen von Bedeutung, auf denen infolge der Erosion Bodenmasse abgetragen wird. Um diese Flächen in eine Bilanzierung der Nettoeinträge der Schwermetalle einzubeziehen, soll in dieser Arbeit neben der Berechnung der Austräge durch die Erntemasse und die Verlagerung mit dem Sickerwasser die durch Erosion abgetragene Schwermetallmenge berücksichtigt werden. Dies geschieht auf Basis des EPIC-Modells⁷, in welchem die Erosionsmenge in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung, der Bewässerung und der Höhenlage, der Hangneigung, der Textur, der Tiefe und des Steingehaltes des Bodens unter Verwendung der Revised Universal Soil Loss Equation (RENARD ET AL., 1991; RENARD ET AL., 1994) angegeben wird.

In der Monte-Carlo-Simulation werden neben den Wahrscheinlichkeitskurven, die für das Transportkostenminimierungsmodell erstellt wurden, die Häufigkeitsverteilungskurven der Schwermetallkonzentrationen in den Düngemitteln, den Pflanzen, dem Boden und den Pestiziden sowie die Unsicherheit der Schwermetalldeposition berücksichtigt, auf deren Basis die im Modell abgebildeten Unsicherheiten der jeweiligen Schwermetalleinträge, der Austräge und der Nettoeinträge ermittelt werden.

⁷ WILLIAMS, 1995; WANG ET AL., 2005

6 Material und Methode

Zur Erstellung des Transportkostenminimierungsmodells und der anschließenden Berechnung der Netto-Schwermetalleinträge auf landwirtschaftlichen Flächen Deutschlands werden unterschiedliche Geoinformationssysteme verwendet. Diese werden in Kapitel 6.1 vorgestellt.

Da in dieser Arbeit zahlreiche Operationen zur Ermittlung von statistisch relevanten Größen und der Verknüpfung derselben Verwendung finden, wurde eine Beschreibung der verwendeten Quellen und der angewandten Methodik innerhalb der jeweiligen Kapitel einer zentralen Beschreibung vorgezogen.

Die Einsatzmengen von Düngemitteln werden mittels eines Transportkostenminimierungsmodells (vgl. Kapitel 10) berechnet.

Als Grundlage für die Lösung der Transportkostenminimierungsmodells werden dem EPIC-Modell die landwirtschaftlichen Erträge, Stickstoff- und Phosphordüngemengen, die Bodenreaktion, der Tongehalt, die Erosionsmenge und der Nettoaustrag organischen Kohlenstoffs jeweils für unterschiedliche HRUs unter Beachtung der Bewässerungsart und der Bodenbearbeitung entnommen (vgl. Kapitel 6.2).

In das Transportkostenminimierungsmodell fließen außerdem folgende Größen ein:

- die Menge des anfallen Wirtschaftsdüngers (vgl. Kapitel 9.1),
- die an die Landwirtschaft abgegebene Menge von Komposten (vgl. Kapitel 9.2)
- die an die Landwirtschaft abgegebene Menge von Klärschlämmen (vgl. Kapitel 9.3 und 9.5)
- die Absatzmengen mineralischer Düngemittel (vgl. Kapitel 9.4).

Im Transportkostenminimierungsmodell wird die Summe aller Transportkosten (vgl. Kapitel 10) der organischen und mineralischen Düngemittel zwischen den Landkreisen bzw. Bundesländern minimiert. Dies geschieht unter Anwendung des linearen Optimierungssolvers CPLEX.

Gesetzliche Rahmenbedingungen limitieren die Ausbringungsmengen der unterschiedlichen Düngemittel und Pestizide in landwirtschaftliche Nutzflächen, was insbesondere für die Einträge in Naturschutzgebieten (vgl. Kapitel 9.5.2), Nationalparks (vgl. Kapitel 9.5.3), Uferrandstreifen (vgl. Kapitel 9.5.4), Wasserschutzgebieten (vgl. Kapitel 9.5.5) und auf biologisch bewirtschafteten Flächen (vgl. Kapitel 9.5.6) von Belang ist.

Die Schwermetallkonzentration unterscheidet sich zum Teil erheblich zwischen den verschiedenen organischen und mineralischen Düngemitteln. Daher ist der Anteil eines Düngemittels zur Deckung des Nährstoffbedarfes und zur Erhaltung der organischen Bodensubstanz bedeutend für eine anschließende Berechnung der Schwermetalleinträge (vgl. Kapitel 11.2.1 bis 11.14).

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Einträge von Schwermetallen durch Pestizide wird in Kapitel 11.15 vorgestellt. Der Pestizideinsatz unterscheidet sich sowohl hinsichtlich der Quantität als auch der Pestizidart zwischen unterschiedlichen Pflanzenarten, so dass deren Anbauumfang als Grundlage zur Berechnung der Schwermetalleinträge verwendet wird.

Der Austrag von Schwermetallen erfolgt durch die Aufnahme in Pflanzen (vgl. Kapitel 12.1), die Verlagerung im Boden mit dem Sickerwasser (vgl. Kapitel 12.3) und durch die Bodenerosion (vgl. Kapitel 12.5).

Die Aufnahmerate der Schwermetalle unterscheidet sich zwischen den kultivierten Pflanzenarten und richtet sich auch nach den jeweiligen Erträgen. Daher werden sowohl im Transportkostenminimierungsmodell als auch in der anschließenden Berechnung der Schwermetallausträge die Erträge der jeweiligen Pflanzenart unter Einbeziehung der Bewässerung und der Bodenbearbeitung berücksichtigt. Untersuchungsergebnisse bezüglich der Häufigkeitsverteilung der Schwermetallkonzentration in den Pflanzen werden genutzt, um die Unsicherheit des Schwermetallaustrags durch die Pflanzen zu berechnen (vgl. Kapitel 12.1).

Der landwirtschaftlich genutzte Boden enthält einen Anteil an Schwermetallen, deren Höhe unter anderem vom Ausgangsgestein, jedoch auch von den mit Düngemitteln, Pestiziden und atmosphärischen Depositionen zugeführten Schwermetallmengen abhängt. Diese Hintergrundkonzentration ist neben dem Gehalt des organischen Kohlenstoffs, des Tongehalts und der Bodenreaktion für eine Berechnung der mit dem Sickerwasser entzogenen und der mit der Bodenmasse infolge der Erosion (vgl. Kapitel 12.5) verlagerten Schwermetallmenge von Bedeutung.

Die Unsicherheiten der Hintergrundkonzentrationen in den Böden werden in Kapitel 7 quantifiziert. Ein Anteil der im Boden vorkommenden Schwermetalle liegt in gelöster Form vor. Mit dem Sickerwasser können die gelösten Bestandteile dem für Pflanzen verfügbaren Bodenhorizont entzogen werden. Die Berechnung des gelösten Anteils der Schwermetalle und der mit dem Sickerwasser entzogenen Schwermetallmenge wird in Kapitel 12.3 vorgestellt.

Schließlich können die Nettoeinträge als Differenz der Einträge und Austräge der Schwermetalle berechnet und mit dem Hintergrundgehalt im Boden verglichen werden, woraus sich die Zeitspanne ermitteln lässt, in welcher bei einem konstanten Nettoeintrag einer der Vorsorgewerte des Bodens nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2009, Anhang 2 Nummer 4.1) erreicht ist (vgl. Kapitel 11, 11.5, 11.8, 11.11 und 12.8).

Die Unsicherheitsbetrachtung erfolgt auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation. In dieser werden in 500 Berechnungsschritten für jeden verwendeten Parameter mit bekannter Unsicherheit Zufallswerte erstellt und eine Modelllösung auf deren Grundlage generiert. Aus den 500 berechneten Schwermetalleinträgen, den Austragsmengen und den Netto-Schwermetalleinträgen, die für jeden Kreis je angebaute Pflanzenart verfügbar sind, werden in einem letzten Modellschritt jeweils die 10., 50. und 90. Perzentile der Schwermetallflüsse ermittelt.

6.1 Verwendete Geoinformationssysteme

Da eine bundesweite Berechnung der Schwermetalleinträge und -austräge auf Kreisebene erstellt werden soll, werden zahlreiche Informationen bezüglich der Bodeneigenschaften und der Schwermetalleinträge landwirtschaftlich genutzter Böden benötigt.

Für eine räumliche Integration unterschiedlicher Informationen bietet es sich an, Geoinformationssysteme (GIS) zu verarbeiten. Diese geben die Möglichkeit, verschiedene Informationen in unterschiedlichen Auflösungen (z.B. auf Bundeslandebene, Kreisebene und 1 km²-Flächen) durch räumliche Übereinstimmungen

miteinander zu verschneiden. Die Informationen lassen sich daraufhin in eine Datenbank übertragen und gemeinsam verwenden.

Folgende Geoinformationssysteme werden zur Erstellung der Schwermetallbilanz verwendet:

Tabelle 1: Verwendete Geoinformationssysteme

GIS-Kürzel	Ausgeschriebener GIS-Name
Deutschland-Shape (GFK, 2007)	Germany Districts 2007
EMEP-Grid (EMEP, 2008)	Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air pollutants in Europe
ESDB (EUROPEAN COMMUNITIES, 2009) ⁸	European Soil Data Base

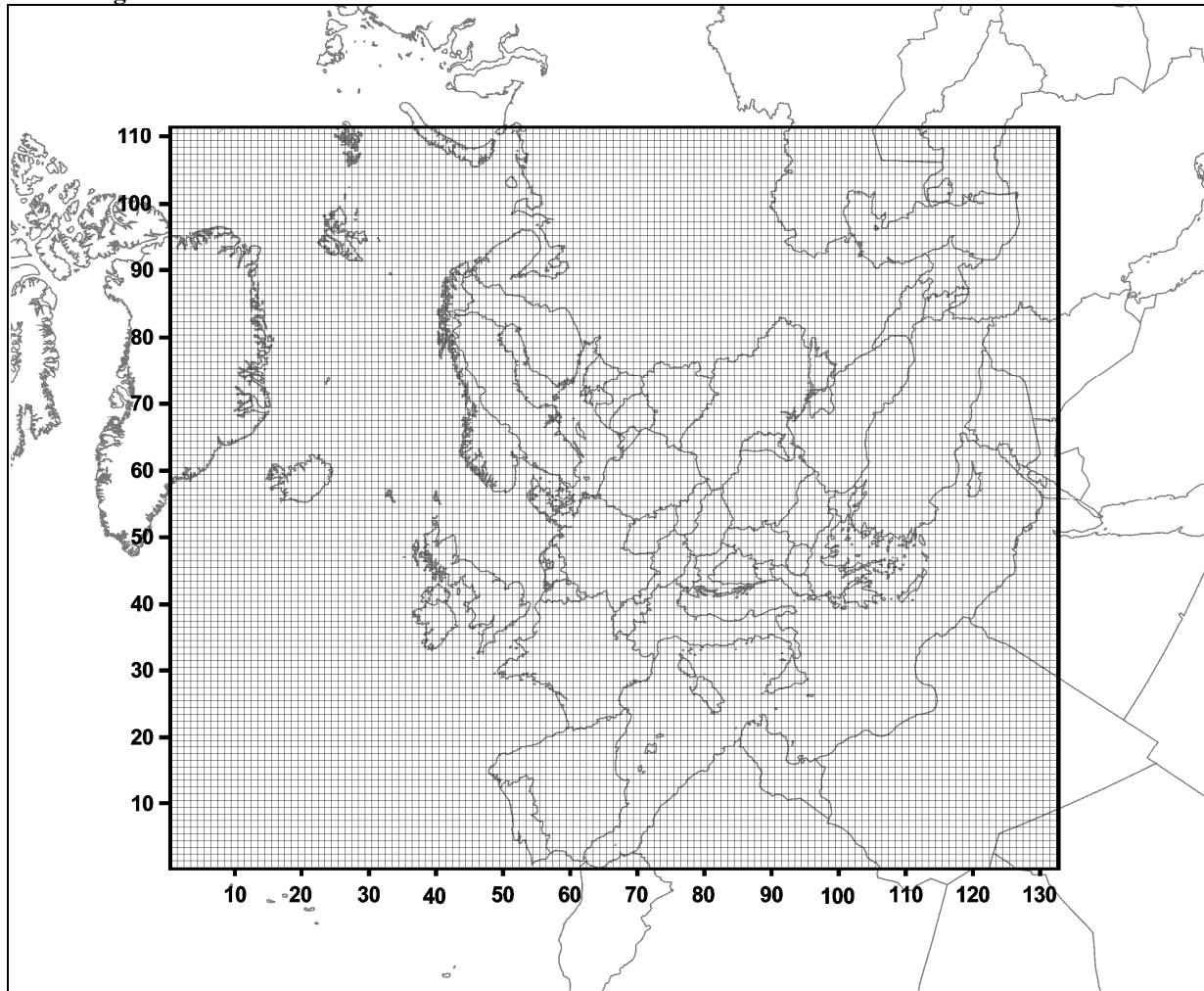
Auf dem Deutschland-Shape (GFK, 2007) sind die Kreise in Deutschland eingetragen. Das EMEP-Grid⁹ umfasst mit einer Feldgröße von etwa 50x50 km² und 132x111 Feldern eine Fläche, die Europa und einige Nachbarregionen einschließt (vgl. Abbildung 1).

Für das EMEP-Grid sind Informationen zu unterschiedlichen atmosphärischen Konzentrationen und Depositionsmengen von Schwermetallen verfügbar. Im Projekt ESPREME („*Estimation of willingness-to-pay to reduce risks of exposure to heavy metals and cost-benefit analysis for reducing heavy metals occurrence in Europe*“) wurden von MSC-East für das Jahr 2000 Schwermetallkonzentrationen in der Atmosphäre sowie nasse und trockene Depositionsmengen der Schwermetalle Cd, Cr, Ni und Pb berechnet (ESPREME, 2008). Die Konzentrationen bzw. Depositionsmengen sind durch Angaben von Koordinaten mit den Zellen des EMEP-Grids verknüpft.

⁸ vgl. PANAGOS ET AL. (2011)

⁹ EMEP (2008)

Abbildung 1: Das EMEP-Grid



Quelle: ESPREME (2008)

In der ESDB (European Soil Data Base)¹⁰ liegen unterschiedliche Informationen der Böden in europäischen Ländern mit einer Auflösung von 1 x 1 km² vor. Für die Berechnung der Hintergrundgehalte sowie der gelösten Anteile der im Boden befindlichen Schwermetalle sind insbesondere folgende Informationen von Bedeutung:

- Primäre und sekundäre Landnutzungsart
- Textur
- Höhenlage
- Hangneigung
- Tiefe des Bodens
- Steingehalt des Bodens
- Ausgangsgestein

Die folgenden primären und sekundären Nutzungsformen sind in der ESDB erfasst:

¹⁰ EUROPEAN COMMUNITIES (2009), PANAGOS ET AL. (2011)

Tabelle 2: primäre und sekundäre Landnutzungsformen, die in der ESDB angegeben werden

Nutzung-ID	Nutzungsform
1	Grünland, Weideland
2	Pappeln
3	Ackerland, Getreide
4	Ödland, Sträucher
5	Wald, Niederwald
6	Gartenbau
7	Weingüter
8	Heide
9	Büsche, Sträucher
10	Moor
11	Halophiles Grünland
12	Obstgüter
13	Energiepflanzen
14	Reis
15	Baumwolle
16	Gemüse
17	Olivenbäume
18	Erholungsflächen
19	Extensives Weideland
22	Wildtierreservate
0	Keine Information

Quelle: EUROPEAN COMMUNITIES (2009)

Anhand dieser Daten könnte eine Spezifizierung der Rasterpunkte mit landwirtschaftlich genutzten Flächen zu Ackerland, Gemüse- und Obstbauflächen sowie Weinbauflächen und Grünland vorgenommen werden.

Von den aufgeführten Nutzungsformen, welche in manchen Ländern Europas differenziert aufgeführt sind, sind jedoch in Deutschland nur die Folgenden aufgenommen:

- Grünland, Weideland
- Ackerland, Getreide
- Ödland, Sträucher
- Wald, Niederwald
- Moor

Demnach kann bei der Nutzung der ESDB (EUROPEAN COMMUNITIES, 2009) in Deutschland nicht zwischen Ackerland, Gemüse- und Obstbauflächen sowie Weinbauflächen unterschieden werden. Sie werden in der Rubrik Ackerland zusammengefasst. Für die Schwermetallbilanz werden diejenigen Punkte aus der ESDB verwendet, bei denen eine der Landnutzungsformen Ackerbau bzw. Grünland ist. Die übrigen Nutzungsformen (Ödland, Wald und Moor) werden für die folgenden Betrachtungen und Verschneidungen nicht genutzt. In der ESDB sind den Gitterzellen unterschiedliche Texturklassen zugeordnet. Die Klassen unterscheiden sich durch den jeweiligen Sand- und Tongehalt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: In der ESDB aufgeführte Texturklassen

Textur-ID	Textur	Beschreibung
1	Grob	< 18% Ton und >65 % Sand
2	Mittel	18% < Ton < 35% und >=15% Sand oder < 18% Ton und 15% < Sand < 65%
3	Mittelfein	< 35% Ton und <15% Sand
4	Fein	35% < Ton < 60%
5	Sehr fein	>60% Ton
9	Torfböden	Keine mineralische Textur
0	Keine Information	Keine Information

Quelle: EUROPEAN COMMUNITIES (2009)

6.2 Verwendete Informationen des EPIC-Modells

Das EPIC-Modell (Environmental Policy Integrated Climate)¹¹ ist ein biophysisches prozess-orientiertes Modell. In das Modell fließen neben Wachstums- und Erosionsfunktionen Informationen bezüglich des Wetters, der Hydrologie, Bodentemperaturen und Nährstoffen ein und es hat eine zeitliche Auflösung von einem Tag¹¹. In dem Modell werden auf Nuts-2-Ebene unter Beachtung der jeweiligen HRU für die Jahre 1995 bis 2005 folgende in diesem Modell verwendete Größen für Systeme mit und ohne Bewässerung angegeben, die unter Anwendung einer konventionellen oder reduzierten Bodenbearbeitung genutzt werden:

- landwirtschaftliche Erträge (vgl. WILLIAMS, 1995; WANG ET AL., 2005)
- Stickstoff- und Phosphordüngemengen als Eingangsparameter (vgl. SCHÖNHART ET AL., 2010)
- Die Lagerungsdichte, die Bodenreaktion, der Tongehalt und der Organischer Kohlenstoffgehalt im Boden als Eingangsparameter (vgl. WANG ET AL., 2005)
- Verminderung der Menge des organischen Kohlenstoffgehaltes durch Bodenrespiration, Versickerung, Oberflächenabfluss und Erosion und andererseits Erhöhung der Menge des organischen Kohlenstoffs in Form von Ernterückständen (vgl. IZAURRALDE ET AL., 2006; POTTER ET AL., 2004)
- Aus dem Modell CropRota (SCHÖNHART ET AL. 2011) fließen die Pflanzenarten ein, die je HRU angebaut werden
- Die Erosionsmenge, berechnet nach der RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation; RENARD ET AL., 1991, 1994)

Da diese Informationen unter Angabe der jeweiligen Nuts-Region sowie der Höhenlage, der Hangneigung, der Textur, der Tiefe und des Steingehaltes des Bodens angegeben sind, können sie mit der European Soil Database und den Positionen der Kreise verknüpft werden. Daraufhin wird der relative Anteil der Flächen je Kreis bestimmt, auf denen eine landwirtschaftliche Nutzung stattfindet und die jeweilige HRU vorzufinden ist.

¹¹ vgl. WILLIAMS(1995), WANG ET AL. (2005), SCHMID ET AL. (2007)

Anschließend wird das jeweilige Minimum und das Maximum der landwirtschaftlichen Erträge, der Düngemengen, der Bodenreaktion, des Tongehaltes und des organischen Kohlenstoffgehaltes, der Netto-Kohlenstoffausträge und der Lagerungsdichte je Landkreis, HRU sowie der Bodenbearbeitung und der Bewässerung ermittelt.

In der Monte-Carlo-Simulation wird je Kreis, HRU, Bodenbearbeitung, Bewässerung und Pflanzenart jeweils ein zufälliger Wert innerhalb der ermittelten Minima und Maxima unter Annahme einer uniformen Verteilung erstellt, so dass die jeweils innerhalb des angegebenen Zeitraums 1995 bis 2005 angegebenen Informationen in der Berechnung der Gesamtunsicherheiten berücksichtigt werden.

6.3 Zusammenfassende Methodik der Berechnung der Schwermetallfrachten

Die Berechnung der Schwermetallfrachten und der im Boden akkumulierten Schwermetallmenge erfolgt nach folgendem Prinzip, bei dem der Eintrag über Düngemittel auf Grundlage des EPIC-Modells berechnet wird. In der Bilanzierung werden neben den Einträgen von Schwermetallen durch Düngemittel Pestizide und die atmosphärische Deposition berücksichtigt sowie als Austragsfaktoren die Entzüge der Schwermetalle durch Pflanzen, die Verlagerung mit dem Sickerwasser und die mit dem erodierten Bodenmaterial abgetragene Schwermetallmenge.

Zur Erstellung des Transportkostenminimierungsmodells und der anschließenden Berechnung der Netto-Schwermetalleinträge bedarf es einer Vielzahl von Eingangsparametern, welche nach folgendem Schema erstellt werden:

Nährstoffzufuhr durch Düngemittel und Entzug organischen Kohlenstoffs:

- Die **Nährstoffzufuhr** von Stickstoff und Phosphor der jeweiligen Nutzpflanzen werden dem EPIC-Modell entnommen und sind für unterschiedliche Technologien angegeben.
- Die empfohlene **Kaliumdüngungsmenge** in Abhängigkeit vom Ertrag wird für Weizen, Gerste, Roggen, Triticale, Hafer, Maissilage, Futtererbsen, Raps und Zuckerrübe LfL (2011) und die Kaliumdüngemenge der anderen berücksichtigten Pflanzenarten ACHILLES(2001) entnommen.
- Aus den Daten des EPIC-Modells werden die Nettoausträge **organischen Kohlenstoffs** je Technologie abgeleitet. Dabei wird auch die mit den Ernterückständen verbleibende Kohlenstoffmenge berücksichtigt.
- Der **Kalkungsbedarf** der Kreise wird auf Basis der Tongehalte, des Gehaltes organischen Kohlenstoffs im Boden und Bodenreaktionen des EPIC-Modells für die unterschiedlichen Technologien abgeleitet.

Wirtschaftsdünger:

- Ermittlung der anfallenden Wirtschaftsdüngermenge sowie der darin enthaltenen Nährstoffe, des organischen Kohlenstoffgehalte und des Gehaltes basisch wirksamer Bestandteile
- Ermittlung der maximal auszubringenden **Stickstoffmenge** durch Wirtschaftsdünger unter Berücksichtigung der **DÜV** (2009)
- Die in einem Kreis anfallenden Wirtschaftsdünger werden in dem jeweiligen Kreis ausgebracht oder in andere Kreise exportiert.

Komposte und Gärrückstände:

- Berechnung der in einem Bundesland zur Verfügung stehenden **Bioabfallkomposte, Gärrückstände und Grünkomposte** und der darin enthaltenen Makronährstoffe, des organischen Kohlenstoffgehalte und des Gehaltes basisch wirksamer Bestandteile.

- Die insgesamt in einem Bundesland anfallenden Gärrückstandsmengen werden auf Grundlage der **Leistung von Biogasanlagen** in den Kreisen auf diese verteilt, um die anfallenden Gärrückstandsmengen zu erhalten. Dazu wird die **relative Anlagenleistung in den Kreisen** in Relation zu der Gesamtleistung im Bundesland berechnet und mit der anfallenden Gärrückstandsmenge multipliziert. In Bundesländern, in welchen keine Anlagenleistung auf Kreisebene verfügbar ist, werden die anfallenden Gärrückstandsmengen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen bezogen.
- Ermittlung der nach der **BioAbfV** (2010) maximal einzubringenden **Bioabfallkompostmenge**. Es wird von einer Abhängigkeit des Bioabfallkompostanfalls von der Bevölkerungshöhe ausgegangen.
- Es wird von festen Verhältnissen von **landwirtschaftlicher Nutzfläche** und **anfallender Grün-
gutkompostmenge** ausgegangen.
- Der in einem Kreis anfallende Kompost steht in dem Transportkostenminimierungsmodell für eine Ausbringung in dem jeweiligen Kreis oder einen Export in andere Kreise zur Verfügung

Klärschlamm:

- Ermittlung der landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Kreises, auf denen gemäß der **ABFKLÄRV** (2010) eine **Klärschlammausbringung** gestattet ist (ausgenommen sind Flächen des ökologischen Landbaus gemäß VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008, Anhang 1). Darauf basierend wird die Klärschlammmenge abgeleitet, die in dem jeweiligen Kreis maximal ausgebracht werden darf.
- Neben der bekannten, in den Landkreisen produzierten **Klärschlammmenge** aus öffentlichen Anlagen wird die durchschnittlich anfallenden Klärschlammmenge aus nichtöffentlichen Anlagen und die **Klärschlammkompostmenge**, die nur auf Bundeslandebene bekannt sind, **anhand der Einwohnerzahl der Kreise** gewichtet.
- Die in einem Kreis anfallende **Klärschlammmenge** wird in dem Transportkostenminimierungsmodell in dem Kreis der Produktion ausgebracht oder in andere Kreise des **Bundeslandes** exportiert. Der Transport von Klärschlamm zwischen **Stadtstaaten** und angrenzenden Bundesländern wird in dem Modell zugelassen, ansonsten wird der Klärschlamm in dem Bundesland ausgebracht, in welchem er an die Landwirtschaft abgegeben wird.

Mineraldüngemittel:

- Ermittlung der zur Verfügung stehenden Mineraldüngermenge je **Bundesland**
- Ermittlung der unter Beachtung der VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008, Anhang 1) maximal einzubringenden **mineralischen Stickstoffmenge**
- Es wird bei den **konventionell** genutzten Ackerflächen davon ausgegangen, dass der Anteil des **mineralischen Stickstoffs** zur Deckung des Stickstoffbedarfs aus betriebsbedingten Erfordernissen mindestens 20 % beträgt.

- Die **Mineraldünger** werden im Transportkostenminimierungsmodell in den Bundesländern ausgebracht, in welchen sie verkauft werden oder in andere Bundesländer exportiert.

Transportkostenminimierungsmodell (vgl. Kapitel 10):

- **Minimierung der Transportkosten** in der Zielfunktion
- Die **Düngemittelmengen** sind ebenso wie die **Erträge** in der Summe durch die Vorgaben des EPIC-Modells restriktiert
- Die **organischen Düngemittel** werden in den Kreisen ausgebracht, in denen sie produziert werden oder in andere Kreise exportiert
- Die **mineralischen Düngemittel** werden in dem Bundesland ausgebracht, in dem sie verkauft werden oder in andere Bundesländer exportiert
- Dabei werden die jeweiligen **Verordnungen** beachtet

Das Modell wird innerhalb der **Monte-Carlo-Simulation 500 Mal** gelöst (vgl. Kapitel 6).

Schwermetalleinträge durch Düngemittel:

- Ermittlung der **Häufigkeitsverteilungskurven der Schwermetallgehalte** in den organischen und mineralischen Düngemitteln
- Für jede Lösung der Monte-Carlo-Simulation wird eine **Schwermetallkonzentration** jedes Düngemittels auf Grundlage der Häufigkeitsverteilungskurve ermittelt.
- Berechnung der mit den Düngemitteln **eingetragenen Schwermetallmenge** durch Multiplikation der eingesetzten, flächenbezogenen **Wirtschaftsdüngermenge, der Kompost-, Klärschlamm- und Mineraldüngermenge** je Kreis und der jeweils darin enthaltenen **Schwermetallkonzentration**

Pflanzenschutzmittel:

- Ermittlung der eingesetzten **Pflanzenschutzmittelmenge**, der eingesetzten Schwermetalle als **Wirkstoffe** und der durch **Verunreinigungen** eingetragenen Schwermetallmenge

Schwermetalldeposition aus der Luft:

- Ermittlung der **Schwermetalldepositionen** auf Kreisebene

Summe der Schwermetalleinträge:

- Berechnung der **Summe der Schwermetalleinträge** durch Düngemittel, Pflanzenschutzmittel und die atmosphärische Deposition

Entzüge durch Pflanzen:

- Ermittlung der **Häufigkeitsverteilungskurven** der in den **geernteten Pflanzenteilen** enthaltenen **Schwermetallkonzentration**
- Ermittlung der mit den **Pflanzen entzogenen Schwermetallmenge**

Verlagerung der Schwermetalle mit dem Sickerwasser:

- Ermittlung des **Schwermetallgehaltes** in den Ackerböden auf **Kreisebene**
- Bestimmung der **Häufigkeitsverteilung** der **Sickerwassermenge** auf **Kreisebene**
- Ermittlung der in **Lösung befindlichen Schwermetallmenge** im Boden
- Berechnung der mit dem **Sickerwasser verlagerten Schwermetallmenge**

Austrag der Schwermetalle durch Erosion:

- Ermittlung der **Erosionsmenge** gemäß den Angaben von EPIC (vgl. Kapitel 12.5)
- Berechnung der mit dem erodierten Bodenmaterial **abgetragenen Schwermetallmenge** auf Grundlage der Gesamt-**Schwermetallkonzentrationen** in der oberen Bodenschicht

Summe der Schwermetallausträge:

- Berechnung der **Summe der Schwermetallausträge** durch die Erntemasse, die Verlagerung mit dem Sickerwasser und den Abtrag mit dem erodierten Bodenmaterial

Berechnung der Differenz der Ein- und Austräge:

- Berechnung der **Differenz** aus der Summe der Einträge und der Summe der Austräge der jeweiligen Schwermetallmenge, die, sofern sie positiv ist, der **Schwermetallakkumulation** im Boden entspricht.

7 Berechnung der Ausgangskonzentration der Schwermetalle in den landwirtschaftlich genutzten Böden

In den landwirtschaftlich genutzten Böden werden Schwermetallkonzentrationen ermittelt, die teilweise auf die Freisetzung der Schwermetalle aus dem Ausgangsgestein zurückzuführen sind (vgl. GARRETT, 2000) und teilweise auf durch die Landnutzung bedingte oder durch atmosphärische Deposition hervorgerufene Einträge der Schwermetalle. Für eine Berechnung der Veränderung der Schwermetallkonzentration muss dieser Ausgangszustand ("Hintergrundkonzentration") bekannt sein. Die Hintergrundkonzentration ist insbesondere für die Berechnung der Verlagerung der Schwermetalle durch Erosion (vgl. Kapitel 12.5) und der Verlagerung mit dem Sickerwasser (vgl. Kapitel 12.3) von Bedeutung.

Die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2003) gibt Hintergrundkonzentrationen von Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn landwirtschaftlich genutzter Böden an. In LABO (2003) wird eine bundesweite Zuordnung von Hintergrundgehalten in landwirtschaftlichen Böden vorgenommen. Die Hintergrundgehalten in den Böden werden untergliedert nach:

- Bundesländern
- Landnutzungsformen (Ackerland bzw. Grünland)
- Ausgangsgesteinen (z.B. Sandstein)
- Kreistypen (von der Bevölkerungsdichte und Bevölkerungshöhe abhängig)
- Schwermetallen (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)
- Perzentilen (50%, 90%)

Nicht für jedes der Bundesländer liegt in der Datenquelle eine Differenzierung der Hintergrundgehalten nach Ausgangsgesteinen vor. Teilweise werden sowohl für unterschiedliche Ausgangsgesteine Hintergrundgehalten angegeben als auch unspezifische Werte.

Daher muss für eine Verwendung im Modell eine Priorisierung der zur Verfügung stehenden Hintergrundgehalten eines Ausgangsgesteins vorgenommen werden, welche im Folgenden beschrieben wird.

In LABO (2003) werden drei unterschiedliche Kreistypen definiert, für die jeweils Hintergrundwerte angegeben werden (vgl. Tabelle 4). Die Zuordnung der Kreistypen im Modell erfolgt auf Grundlage der in der Regionaldatenbank Deutschland (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011) angegebenen Bevölkerungshöhe und der in (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011G) angegebenen Kreisgröße. In LABO (2003) wird alternativ eine Zuordnung auf Gemeindeebene empfohlen, welche jedoch aufgrund einer fehlenden Datenbasis auf dieser Ebene in dem vorliegenden Modell keine Verwendung findet.

Tabelle 4: Zuordnung der Kreistypen

Typ I	Regionen mit großen Verdichtungsräumen	Regionen mit einem Oberzentrum von mindestens 300.000 Einwohnern und/oder einer Bevölkerungsdichte von über 300 Einwohnern/km ²
Typ II	Regionen mit Verdichtungsansätzen	Regionen mit durchschnittlich über 150 E/km ² und i.d.R. einem Oberzentrum von mindestens 100.000 Einwohnern
Typ III	ländlich geprägte Regionen	Kreise mit einer Bevölkerungsdichte unter 150 Einwohnern/km ²
Typ 0	Keine Zuordnung vorgenommen	Zuordnung ist nicht möglich oder nicht vorgenommen worden

Quelle: verändert nach LABO (2003)

LABO (2003) liefert zum einen Informationen zu Hintergrundgehalten in den einzelnen Bundesländern für die Typ I-, Typ II- und Typ III-Regionen und zum anderen bundesweit gültige Mediane und Perzentile ausschließlich für die Typ III-Regionen.

In der ESDB (EUROPEAN COMMUNITIES, 2009) sind zahlreiche Ausgangsgesteine aufgeführt. In Europa sind 73 Ausgangsgesteine verzeichnet, von denen folgende 37 in Deutschland vorkommen und für die Zuordnung verwendet werden:

Tabelle 5: In der ESDB aufgeführte Ausgangsgesteine in Deutschland

Ausg. ID	Ausgangsgestein
120	Psammite oder Arenite
121	Sandstein
131	Tonstein
211	Lehmstein
214	Mergel
310	Saure bis mittelsaure plutonisches Gestein
311	Granit
350	Basisches bis ultrabasisches vulkanisches Gestein
351	Basalt
412	Schiefer
420	Saure metamorphe Gesteine
500	Zusammengefasst: Ablagerungen (Alluvium, Verwitterungsrückstände und kolluviale Ablagerungen)
510	Marine Sande und Flussmündungssande
530	Fluvialer Sand und Kies
531	Flussterrassen -Sand oder -Kies
540	Fluvialer Ton, Schluff oder Lehm
541	Fluss -Ton oder -Schluff
561	Residuallehm
571	Residualton
611	Glaziales Sediment
620	Glaziale Ablagerungen
621	Glaziale Sandablagerungen
710	Löss
712	Sandiger Löss
720	Äolische Sande
721	Dünensand
800	Organische Böden

Quelle: verändert nach EUROPEAN COMMUNITIES (2009)

Die Zuordnung der Ausgangsgesteine aus der ESDB (EUROPEAN COMMUNITIES, 2009) und der LABO-Datenbasis ist gemäß LABO (2003, TABELLE 3) vorgenommen worden.

Für jeden Rasterpunkt in dem 1x1 km² Gitter der ESDB ist ein Ausgangsgestein der Tabelle 5 angegeben. Durch eine Zuordnung der Ausgangsgesteine der ESDB zu den Rubriken der LABO-Datenbank (LABO, 2003) können zahlreiche Hintergrundgehalte dieser Datenbank mit den Ausgangsgesteinen verknüpft werden. Nicht jedes Ausgangsgestein der ESDB lässt sich einem der Ausgangsgesteine der LABO zuordnen. Einige Gründe dafür sind:

- Der entsprechende Kreistyp ist nicht berücksichtigt
- Nicht für alle Ausgangsgesteine sind Hintergrundwertinformationen vorhanden
- Die Ausgangsgesteine der ESDB lassen sich keinem Ausgangsgestein der LABO-Datenbank im entsprechenden Bundesland zuordnen.

Die Verknüpfung der Ausgangsgesteine geschieht auf Bundeslandebene sowie auf Bundesebene jeweils durch eine Abfrage in MICROSOFT ACCESS (2003), die jedem Punkt, an dem die Landnutzung Ackerland bzw. Grünland ist, einem Ausgangsgestein der ESDB-Datenbank zuordnet, sofern eine Zuordnung möglich ist.

Falls eine Zuordnung nicht möglich ist, werden länderübergreifende Hintergrundwerte für Ausgangsgesteine gewählt, die auf der Zusammenstellung von HINDEL UND FLEIGE (1991) basieren.

Die Hintergrundgehalte in HINDEL UND FLEIGE (1991) gelten einheitlich für alle Kreistypen und Bundesländer. Es werden hier nicht wie bei (LABO, 2003) Mediane und 90%-Perzentile angegeben, sondern

- das arithmetische Mittel
- die Standardabweichung der entsprechenden Lognormal-Verteilung sowie
- die Vertrauensgrenzen des 95%-Konfidenzintervalls der Elementkonzentration je Ausgangsgestein.

Die Auswahl der Mediane der Hintergrundgehalte und die entsprechenden Perzentile jedes Rasterpunktes wird nach folgendem Schema vorgenommen, wobei nach Landnutzungstypen differenziert wird und nur diejenigen Punkte berücksichtigt werden, bei denen Ackerland oder Grünland als primäre bzw. sekundäre Landnutzungsform vorliegt:

1. Die Perzentile der Schwermetallkonzentration von Ausgangsgesteinen, deren Hintergrundgehalte für die Kreistypen I, II oder III in einem Bundesland bekannt sind, werden der LABO-Datenbank entnommen (LABO, 2003). Sollte in LABO (2003) der Hintergrundgehalt für Bodenartenhauptgruppen angegeben sein, wie beispielsweise für das Bundesland Brandenburg, so wird entsprechend der jeweils vorliegenden Tongehalte eine Bodenart identifiziert und der zuzuordnende Hintergrundgehalt für eine Berechnung gewählt
2. In der LABO-Datenquelle stehen für den Kreistyp III bundeslandunabhängige Perzentile der Hintergrundgehalte zur Verfügung. Sind in der LABO-Datenquelle keine bundeslandspezifischen Hintergrundgehalte für ein Schwermetall des Kreistyps III angegeben, doch entsprechende Angaben in der bundeslandunabhängigen Tabelle vorhanden, so werden diese verwendet.
3. Ist in einem Bundesland für das jeweilige Ausgangsgestein nur ein Hintergrundgehalt des Kreistypes 0 (vgl. Tabelle 4) bekannt, also keine Differenzierung nach Kreistypen möglich, so wird das 50. und das 90. Perzentil des Kreistypes 0 aus der LABO-Datenbank in dem entsprechenden Bundesland übernommen.
4. Lässt sich einem Rasterpunkt kein Ausgangsgestein nach der LABO-Datenbank zuordnen, so wird der Hintergrundgehalt gemäß der Angaben von HINDEL UND FLEIGE (1991) ermittelt.

In einer anschließenden Abfrage wird für jeden Kreis die Anzahl der Punkte ermittelt, die sich nach obigem Schema einem Ausgangsgestein zuordnen lassen.

Die relativen Häufigkeiten des Vorkommens von Ausgangsgesteinen in einem Kreis werden berechnet und kumulativ auf einer Skala von 0 bis 100% aufgetragen.

Entsprechend der relativen Häufigkeit der in der ESDB aufgeführten Ausgangsgesteine wird für jeden Landkreis unter Berücksichtigung des gemäß der EPIC-Daten relativen Vorkommens der jeweiligen HRU in jedem Durchlauf der Monte-Carlo-Simulation eines dieser Ausgangsgesteine je Pflanzenart zufällig ausgewählt. Die Parameter (Median und 90. Perzentil bzw. Mittelwert und Standardabweichung) der Hintergrundkonzentration der Ausgangsgesteine werden verwendet, um in GAMS (2011) lognormalverteilte Zufallswerte zu erstellen. Die Lognormalverteilung wurde für die Berechnungen gewählt, da die Häufigkeitsverteilungskurven von Hintergrundgehalten annähernd jener Verteilungskurven entsprechen (vgl. MÖLLER ET AL., 2005). Da das relative Vorkommen der Ausgangsgesteine sowie die entsprechenden Verteilungskurven der Konzentrationen in den Berechnungen von Hintergrundgehalten berücksichtigt werden, ergeben die Zufallswerte der Hintergrundgehalte im Ablauf der zahlreichen Schritte der Monte-Carlo-Simulation eine Verteilungsfunktion, die für die Schwermetallkonzentration in dem entsprechenden Kreis mit den dort vorkommenden Ausgangsgesteinen für die jeweilige Pflanzenart repräsentativ ist.

8 Verwendete Daten zur Berechnung der mit den Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffmenge

Landwirtschaftliche Nutzpflanzen werden mit organischen und mineralischen Düngemitteln gedüngt, um den Nährstoffbedarf der Pflanzen zu decken. Um eine optimale Erntemenge zu gewährleisten, sollte der Gehalt an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Boden den Bedürfnissen der Pflanzen angepasst werden. Das Pflanzenwachstum nimmt bei niedrigen Nährstoffgehalten mit zusätzlich zugeführten Nährstoffen zu, bleibt bei einem bestimmten Level konstant und sinkt bei einer zu hohen Versorgung ("Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses").

Um die Bedürfnisse der Pflanzen an Nährstoffen zu decken, werden die Felder gedüngt bzw. es werden für die Stickstoffbereitstellung Leguminosen angebaut.

In dem EPIC-Modell (vgl. Kapitel 6.2) werden für unterschiedliche Technologien des Nutzpflanzenanbaus auf Regierungsbezirkebene flächenbezogene Nährstoffausbringungsmengen von Stickstoff und Phosphor angegeben und in diesem Modell verwendet. Die Kaliumdüngung wird in Abhängigkeit der Erntemenge ermittelt, die im EPIC-Modell spezifiziert für die dort berücksichtigten Technologien angegeben ist. Dies geschieht auf Grundlage der in ACHILLES (2001) empfohlenen Kaliumdüngungsmenge, welche in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Ertrag angegeben ist.

Die Bilanzierung der organischen Kohlenstoffmenge ergibt sich im EPIC-Modell aus der Entnahme des organischen Kohlenstoffs mit dem Erntegut, der Bodenrespiration, der Versickerung, dem Oberflächenabfluss, der Erosion und den auf dem Feld verbleibenden Ernterückständen. Aus den Werten wird für das Transportkostenminimierungsmodell die je Pflanze, Bewässerung und Bodenbearbeitung die einzutragende Kohlenstoffmenge durch organische Düngemittel je ha ermittelt.

Als Nährstofflieferanten können organische oder mineralische Düngemittel zugeführt werden. Zu den organischen Düngemitteln zählen Wirtschaftsdünger (vgl. Kapitel 9.1), Gärrückstände und Komposte (vgl. Kapitel 9.2), Klärschlamm (vgl. Kapitel 9.3) und Leguminosen. Mineralische Düngemittel umfassen Einnährstoffdünger und Mehrnährstoffdünger (vgl. Kapitel 9.4). Die organischen Düngemittel dienen nicht nur der Nährstoffzufuhr, sondern werden auch zur Erhöhung bzw. zur langfristigen Erhaltung des Anteils organischer Substanz im Boden verwendet.

8.1 Methodik zur Ermittlung des Anbauumfangs von Ackerkulturen und der Erntemenge in den Kreisen

In der Regionaldatenbank Deutschland (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011A) wird angegeben, in welchem Umfang die Ackerkulturen in den Landkreisen angebaut werden.

Dieser Statistik sind die Anbauflächen und STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011F) die Erträge von folgenden Kulturarten entnommen:

- Weizen
- Roggen
- Wintergerste
- Sommergerste
- Hafer
- Triticale
- Kartoffeln
- Zuckerrüben
- Winterraps
- Silomais
- Futtererbse

Zusätzlich werden folgende Statistiken aus der Regionaldatenbank verwendet:

- Dauergrünlandflächen (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011B)
- Dauerkulturflächen (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011B)
- Ökologisch bewirtschaftete Flächen (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011C)

Die ökologisch bewirtschafteten Flächen werden nicht nach Fruchtarten unterschieden. Daher wird vereinfacht davon ausgegangen, dass auf ökologisch bewirtschafteten Flächen die Fruchtarten in gleichen Relationen wie auf konventionell bewirtschafteten Flächen angebaut werden.

Die Anbauflächen der Kreise werden in eine MICROSOFT EXCEL (2003)-Tabelle übertragen und anschließend mit GAMS (2011) ausgelesen.

Die Flächengrößen und die Erträge folgender Kulturen sind auf Grundlage der Regionalstatistik von Eurostat (EUROSTAT, 2010) und der Regionaldatenbank Deutschland (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2010B) erhoben worden:

- Gemüseflächen
- Weinflächen
- Dauerkulturen

Die Anbauflächen von Gemüse sind der Regionalstatistik von Eurostat entnommen, jedoch nur auf Regierungsbezirksebene verfügbar, während in der Regionaldatenbank Deutschland Gartenbaubetriebe auf Kreisebene angegeben sind und auch Gemüseflächen umfassen. Innerhalb eines Regierungsbezirkes werden unter Annahme von gleichen Relationen zwischen Gemüsebetrieben und Gartenbaubetrieben die Flächen von Regierungsebene auf die Kreisebene übertragen.

Für die Unsicherheitsbetrachtung werden innerhalb der Monte-Carlo-Simulation die berichteten Minima und Maxima der jeweiligen Flächen bzw. Erträge des Zeitraumes 2000 bis 2011 als Rahmen für die Erstellung zufälliger Flächen bzw. Erträge unter Annahme einer uniformen Verteilungsfunktion verwendet. Somit wird dieser Zeitraum innerhalb der Monte-Carlo-Simulation bei der Generierung von Zufallswerten berücksichtigt.

9 Nährstoffbereitstellung durch organische und mineralische Düngemittel

9.1 *Methodik zur Berechnung des Anfalls der Makronährstoffe mit dem produzierten Wirtschaftsdünger*

Um die mit dem Wirtschaftsdünger anfallende Menge von Stickstoff, Phosphor und Kalium berechnen zu können, müssen die Tierzahlen und die jeweiligen Ausscheidungsraten der Nährstoffe bekannt sein. Der Wirtschaftsdünger der verschiedenen Tierarten weist ein unterschiedliches Mengenverhältnis zwischen den drei Elementen auf (vgl. WENDLAND ET AL., 2011).

Der Gülle- und Mistanfall sowie der Nährstoffgehalt inklusive der anrechenbaren gasförmigen Stickstoffverluste, der Stickstoffgehalt des Mistes abzüglich des Gehaltes im Stroh und der im Anwendungsjahr verfügbare Stickstoff wurden in dieser Arbeit von WENDLAND ET AL. (2011) übernommen. Dort ist der Anfall des Rottemistes je Stallplatz unterschieden nach Festmist- und Tiefstallmisthaltungsverfahren. Die basisch wirksamen Bestandteile der Wirtschaftsdünger sind von KNAPPE ET AL. (2008)¹² übernommen worden.

Die prozentualen Anteile dieser Systeme an den strohbasierten Systemen werden DÖHLER ET AL. (2002) entnommen. Wirtschaftsdünger können eingesetzt werden, um den Humusgehalt im Boden zu bewahren. Die Humusreproduktionsleistung der unterschiedlichen Wirtschaftsdünger wird in TLL (2006) als Richtwert der Kohlenstoff-Reproduktionsmenge angegeben.

Die Anzahl der in den Kreisen gehaltenen Tiere wird der Regionaldatenbank Deutschland (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011D) entnommen und es werden für die Unsicherheitsbetrachtung jeweils zufällige Tierzahlen innerhalb der berichteten Minima und Maxima des Zeitraumes 2000 bis 2011 unter Annahme einer uniformen Verteilung erstellt. Die Tierbestände werden in dieser Statistik beispielsweise für Rinder nicht genauer differenziert, wurden mir jedoch freundlicherweise von Herrn Dämmgen (DÄMMGEN, 2007) zur Verfügung gestellt. Die in STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011D) angegebenen Tierbestände werden auf Grundlage der Angaben von DÄMMGEN (2007) gewichtet.

Die Anteile der in Güllesystemen und strohbasierten Systemen gehaltenen Tiere werden LÜTTICH ET AL. (2006) entnommen. Die Angaben liegen auf Bundeslandebene für folgende Tierkategorien vor:

¹² KNAPPE ET AL. (2008) beziehen sich auf KRATZ ET AL. (2005)

- Kälber
- Mastbullen
- Färsen
- Zuchtbullen
- Mutterkühe
- Milchkühe
- Mastschweine
- Sauen
- Ferkel
- Pferde
- Schafe ohne Lämmer
- Lämmer

Der Anteil der in strohbasierenden Systemen ausgeschiedenen Stickstoffanteile unter Beachtung der Haltungsart wird LÜTTICH ET AL. (2006) entnommen.

Da ein Anteil der Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen verwendet wird und die Gärrückstände in die Berechnung der Schwermetallbilanz einfließen, wird der Wirtschaftsdüngeranteil der Trockenmasseinputs der Anlagen auf Grundlage der Trockenmasse der Wirtschaftsdünger und der Trockenmasse der produzierten Gärrückstände berechnet. Die Wirtschaftsdüngermenge, welche in die Anlagen eingebracht wird, wird von der insgesamt in dem jeweiligen Kreis anfallenden Wirtschaftsdüngermenge abgezogen.

In der Düngeverordnung (DüV, 2009) ist die Höchstbegrenzung des ausgebrachten Gesamtstickstoffs tierischer Herkunft mit 170 kg/ha auf Ackerland bzw. 230 kg/ha auf Grünland festgelegt. Die Ausbringung von 230 kg N/ha auf Grünland erfordert die Einhaltung der in der Düngeverordnung §4 Absatz 4 festgelegten Konditionen. Diese konnten aufgrund mangelnder Informationen nicht im Modell als Konditionen eingefügt werden. Im Transportkostenminimierungsmodell wird davon ausgegangen, dass die in der Düngeverordnung geforderten Bedingungen im Bedarfsfall erfüllt und auf Grünland maximal 230 kg N/ha ausgebracht werden dürfen.

9.2 Methodik zur Berechnung der anfallenden Kompostmenge und Gärrückstände

Die Menge der Komposte und Gärrückstände, die in der Landwirtschaft verwendet werden, sind der Abfallentsorgung 2006 (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2008) und der Abfallentsorgung 2008 (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2010B) entnommen. In diesen Statistiken werden die Inputs in die Kompostierungsanlagen und die landwirtschaftlich bzw. forstwirtschaftlich verwendeten Kompostmengen sowie die Gärrückstandsmengen auf Bundeslandebene (vgl. Tabelle 6) angegeben.

Tabelle 6: Zur Verfügung stehende Kompost- und Gärrückstandsmenge in den Bundesländern

Bundesland	Kompostabgabe an die Land- und Forstwirtschaft aus den jeweiligen Anlagen [1000 t]					Gärrückstände
	Bioabfall-Kompostierungsanlagen	Grünabfall-kompostierungsanlagen	Biogas-/Vergärungsanlagen	Klärschlamm-kompostierungsanlagen	Biologische Behandlungsanlagen Insgesamt	Insgesamt [1000 t]
Schleswig-Holstein	73,4	32,7	9,4	-	115,5	219,8
Niedersachsen	170,6	175	-	-	347,5	892,7
Nordrhein-Westfalen	430,3	91,7	41,1	18,9	581,9	256,8
Hessen	127,6	23,5	-	-	165,2	65,1
Rheinland-Pfalz	63,1	21,4	21,9	-	106,4	118,7
Baden-Württemberg	86	78,8	17,4	-	182,2	132,7
Bayern	139,8	247,5	28,4	-	416,5	535,8
Saarland	4,4	7,8	-	-	12,2	5,8
Brandenburg	-	14,1	-	25,2	69,7	148,2
Mecklenburg-Vorpommern	24,1	12,8	-	-	36,9	335,8
Sachsen	46,7	9,9	-	8,1	64,7	50,7
Sachsen-Anhalt	91,2	-	11,8	34,6	137,8	122,3
Thüringen	91,9	3,7	-	26,5	122	89,2

Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT (2010B)

In dieser Arbeit werden folgende Kompost- und Gärrückstandskategorien berücksichtigt:

- Bioabfallkompost
- Grünabfallkompost
- Flüssige und feste Gärrückstände
- Klärschlammkompost (wird im Folgenden als Klärschlammkategorie behandelt)

Wird in einem Bundesland mehr Kompost erzeugt als den einzelnen Kategorien zugeordnet ist, so wird dieser entsprechend der Anzahl der bislang unberücksichtigten Anlagen innerhalb des Bundeslandes aufgeteilt.

Innerhalb der berichteten Kompostabgabemengen aus STATISTISCHES BUNDESAMT (2008) und STATISTISCHES BUNDESAMT (2010B) werden für die Monte-Carlo-Simulation jeweils uniform verteilte Abgabemengen an die Landwirtschaft erstellt. Es wird dabei angenommen, dass die in der Forstwirtschaft eingesetzte Kompostmenge im Vergleich zur in der Landwirtschaft eingesetzten Kompostmenge vernachlässigbar gering ist (vgl. BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E.V., 2009).

Die basisch wirksamen Bestandteile der Komposte wurden KRATZ ET AL. (2005) entnommen. Die Reproduktion der Humusmenge, ausgedrückt in den Humus-Äquivalenten Humus-C pro t Substrat wird TLL (2006) entnommen. In der genannten Quelle sind Richtwerte der Humusreproduktionsmenge der unterschiedlichen Komposte und Gärrückstände angegeben. Die N-, P₂O₅- und K₂O-Gehalte in den Komposten und Gärrückständen werden von WENDLAND ET AL. (2011) bzw. LFL (2011) übernommen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Anteil von N, P₂O₅ und K₂O in Komposten und Gärrückständen

	N	N-schnell¹³	P₂O₅	K₂O
Bioabfallkompost [kg/t FM]*	8,5	0,4	5,4	7,9
Gärrückstände flüssig [kg/m³]**	4,9	3,3	2,3	6,2
Gärrückstände fest [kg/t FM]**	5,8	3,0	5,0	5,8
Grüngutkompost [kg/t FM]*	6,6	0,3	3,9	5,1

Quellen:

* WENDLAND ET AL. (2011)

** LfL(2011)

Die innerhalb eines Bundeslandes anfallende Gärrückstandsmenge wird, sofern diesbezüglich Daten vorliegen, auf Grundlage der Anlagenleistung von Biogasanlagen zur Berechnung der in den Landkreisen bereitgestellten Menge verwendet. Dazu wird die Anlagenleistung innerhalb eines Kreises in Relation zu der Gesamtleistung des Bundeslandes bzw. im Fall Sachsens die Anzahl der Anlagen innerhalb eines Kreises in Relation zu der Anlagenzahl des Bundeslandes berechnet und dieser Quotient mit der Gesamtmenge der anfallenden Gärrückstände des Bundeslandes multipliziert.

Folgende Datenquellen werden für die jeweiligen Bundesländer verwendet:

- Baden-Württemberg: MESSNER (2008)
- Bayern: RÖHLING UND KEYMER (2007)
- Hessen: LANDESBETRIEB LANDWIRTSCHAFT HESSEN (2009)
- Mecklenburg-Vorpommern: MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN (2009)
- Niedersachsen: 3N KOMPETENZZENTRUM (2008), zitiert von HÖHER (2008)
- Nordrhein-Westfalen: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW (2009), zitiert von DAHLHOFF (2009)
- Sachsen: SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2008)
- Thüringen: REINHOLD (2005)

Sofern die Anlagenleistung der Biogasanlagen eines Bundeslandes nicht vorgegeben ist, wird der Quotient aus der anfallenden Gärrückstandsmenge und der landwirtschaftlichen Nutzfläche berechnet und die Fläche eines Kreises mit diesem Quotienten multipliziert. Das Produkt entspricht der mit der Fläche gewichteten anfallenden Gärrückstandsmenge in den Kreisen.

Gemäß der Bioabfallverordnung (BIOABFV, 2010) §6 darf innerhalb eines Zeitraumes von drei Jahren, abhängig vom Schwermetallgehalt im Bioabfallkompost, maximal eine Menge von 20 t/ha bzw. 30 t/ha Trockenmasse ausgebracht werden (vgl. Tabelle 8).

Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Ausbringungsmenge von 6,7 bzw. 10 t/ha.

¹³ Im Ausbringungsjahr verfügbarer Stickstoff

Tabelle 8: Maximal tolerierter Schwermetallgehalt im Bioabfallkompost gemäß BioAbfV [mg/kg TM]

Schwermetall	BioAbfV Ausbringung von 20 t/ha in drei Jah- ren	BioAbfV Ausbringung von 30 t/ha in drei Jah- ren
Cd	1,5	1
Cr	100	70
Cu	100	70
Ni	50	35
Pb	150	100
Zn	400	300

Quelle: Bioabfallverordnung (BIOABFV, 2010) §6

Bei einer Überschreitung folgender Schwermetallgehalte im Boden ist gemäß der Bioabfallverordnung §9 (2) die Aufbringung von Bioabfällen zu untersagen (vgl. Tabelle 9):

Tabelle 9: Maximal tolerierter Schwermetallgehalt im Boden gemäß BioAbfV [mg/kg]

Schwermetall	Ton	Lehm	Sand
Cd	1,5	1	0,4
Cr	100	60	30
Cu	60	40	20
Ni	70	50	15
Pb	100	70	40
Zn	200	150	60

Quelle: Bioabfallverordnung (BIOABFV, 2010) §9(2)

Der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche, auf der die Konzentration eines der Schwermetalle im Boden höher ist als in der Bioabfallverordnung angegeben, wird von den berechneten Häufigkeitsverteilungskurven der Hintergrundgehalte im Boden abgeleitet (vgl. Kapitel 7).

Die maximal in einem Kreis auszubringende Kompostmenge errechnet sich aus dem Produkt der landwirtschaftlichen Fläche, der nach BIOABFV (2010) §6 erlaubten jährlichen Ausbringungsmenge und dem Anteil der landwirtschaftlichen Nutzflächen, auf denen die Schwermetallkonzentration nach BioAbfV §9 (2) nicht überschritten wird.

9.3 Methodik zur Berechnung der anfallenden Klärschlammmenge

Die Menge des in öffentlichen Anlagen anfallenden, in der Landwirtschaft verwendeten Klärschlammes wird in STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011e) auf Kreisebene angegeben. Das bedeutet, dass ein Transport des Klärschlammes in andere Kreise möglich ist, da in der Quelle die Abgabemenge des Klärschlammes aus Abwasserbehandlungsanlagen in dem jeweiligen Kreis angegeben ist, jedoch nicht die ausgebrachte Menge.

In STATISTISCHES BUNDESAMT (2009) wird zudem auf Bundeslandebene die Menge des Klärschlammes angegeben, der aus nichtöffentlichen Anlagen zur Verwendung in der Landwirtschaft abgegeben wird und wird auf Grundlage einer Gewichtung mit der Einwohnerzahl auf die Kreise verteilt.

Für die Monte-Carlo-Simulation werden die jeweils verfügbaren Abgabemengen des Zeitraumes 2000 bis 2011 verwendet, um uniform verteilte Abgabemengen innerhalb der berichteten Minima und Maxima zu erstellen.

Klärschlamm wird für eine Zuführung organischer Substanz in den Boden verwendet. Die Reproduktionsleistung von organischem Kohlenstoff durch Klärschlamme wird TLL (2006) entnommen. Die basisch wirksamen Bestandteile von Klärschlamm wurden KRATZ ET AL. (2005), und die basisch wirksamen Bestandteile von Klärschlammkompost wurden SÜBENBACH ET AL. (2001) entnommen. Klärschlämme enthalten zudem folgende Nährstoffe:

Tabelle 10: Konzentration von N, P₂O₅ und K₂O in Klärschlamm

	Klärschlamm * [kg/t TM]	Klärschlammkompost ** [kg/t TM]
N	45	11
P₂O₅	65	22
K₂O	8	3

Quellen:

* WENDLAND ET AL. (2011)

** SÜBENBACH ET AL. (2001)

9.4 Methodik zur Berechnung der anfallenden Mineraldüngermenge

Die Liefermengen mineralischer Düngemittel an die Landwirtschaft werden STATISTISCHES BUNDESAMT (2010) auf Bundeslandebene entnommen. Die Minima und Maxima der berichteten Abgabemengen der Mineraldünger der Jahre 2000 bis 2010 werden verwendet, um für die Monte-Carlo-Simulation zufällige, uniform verteilte Abgabemengen innerhalb der berichteten Minima und Maxima zu erstellen.

Um aus den Absatzmengen der Düngemittel in t aktiver Substanz den Düngemittelaufwand, also die Gesamtmasse der eingesetzten Düngemittel, berechnen zu können, werden folgende Umrechnungsfaktoren verwendet:

Tabelle 11: Umrechnungsfaktoren der Nährstoffgehalte in Düngemittelaufwand ([t/t])

Einnährstoffdünger		Mehrnährstoffdünger			
	[t Gesamtmasse pro t N, P₂O, K₂O bzw. CaO]		[t/t N]	[t/t P₂O₅]	[t/t K₂O]
Kalkammonsalpeter	3,7	NP-Dünger	5,56	2,17	
Harnstoff	2,17	NK-Dünger	6,25		6,67
Andere N-Dünger	4,35	PK-Dünger		7,14	5,88
Superphosphat	3,13	NPK-Dünger	6,25	9,09	6,67
andere P-Dünger	4,17				
Kaliumchlorid	2,5				
Kalirohsalz	8,29				
Kaliumsulfat	3,29				
AHL	3,57				
Thomasphosphat	6,25				
Kohlensaurer Kalk	1,15				
Brantkalk	1,15				
Hüttenkalk	2,22				
Andere Kalkdünger	1,67				

Quelle: FRÜCHTENICHT ET AL. (1993), zit. von HACKENBERG UND WEGENER (1999)

Während im ökologischen Landbau nach der VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008, Anhang 1) keine mineralischen Stickstoffdünger zugelassen sind, gelten Ausnahmen für Phosphor-, Kalium- und Kalkdünger. Für die Berechnung der mineralischen Stickstoffdünger werden daher die biologisch bewirtschafteten Flächen in einem Kreis von einer Ausbringung ausgeschlossen.

9.5 Methodik der Berechnung der maximal auszubringenden Klärschlammmenge in den Kreisen unter Beachtung der Klärschlammverordnung und der EG-Verordnung Ökologischer Landbau

Gemäß der Klärschlammverordnung ist es verboten, Klärschlamm auf Gemüse- und Obstanbau- (ABFKLÄRV, 2010, § 4 Abs. 2) sowie Dauergrünlandflächen (§ 4 Abs. 4) aufzubringen. Es ist weiterhin ohne Ausnahmeregelung verboten, den Klärschlamm auf Böden in Naturschutzgebieten, Naturdenkmälern, Nationalparks, geschützten Landschaftsbestandteilen (ABFKLÄRV, 2010, § 4 Abs. 6), Uferrandstreifen und in den Zonen I und II von Wasserschutzgebieten auszubringen (§ 4 Abs. 7).

Der pH-Wert des Bodens muss über 5 liegen (§ 4 Abs. 9). Zudem dürfen folgende Schwermetallgehalte im Boden nach der Klärschlammverordnung §4 nicht überschritten werden (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Maximal tolerierte Schwermetallmenge im Boden [mg/kg TM] gemäß AbfKlärV

Schwermetall	AbfKlärV Leichte Böden mit pH 5-6	AbfKlärV Sonstige Böden
Cd	1	1,5
Cr	100	100
Cu	60	60
Ni	50	50
Pb	100	100
Zn	150	200

Quelle: ABFKLÄRV (2010) §4, Absatz 8

Folgende Grenzwerte der Schwermetallkonzentration im Klärschlamm gelten nach der Klärschlammverordnung:

Tabelle 13: Maximal tolerierte Schwermetallkonzentration im Klärschlamm [mg/kg] gemäß AbfKlärV

Schwermetall	Leichte Böden mit pH 5-6	Sonstige Böden
Cadmium	5	10
Chrom	900	900
Kupfer	800	800
Nickel	200	200
Blei	900	900
Zink	2.000	2.500
Quecksilber	8	8

Quelle: ABFKLÄRV (2010) §4, Absatz 12

Nach der VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008, Anhang 1) ist es zudem nicht zulässig, Klärschlamm auf ökologisch bewirtschafteten Flächen auszubringen.

Auf den Flächen, die für eine Klärschlammausbringung zur Verfügung stehen, beträgt die maximal erlaubte Ausbringungsmenge nach der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010 §6, Absatz 1) innerhalb von drei Jahren 5 t/ha. Eine Menge von 10 t/ha darf ausgebracht werden, wenn die Hälfte der Schwermetallkonzentration, die in Tabelle 13 genannt sind, nicht überschritten wird und die Hälfte der in §4(10) der Klärschlammverordnung festgelegten Konzentration organischer Schadstoffe nicht überschritten wird.

Die Methodik der Berücksichtigung der Verordnungen wird im Folgenden beschrieben (vgl. Kapitel 9.5.2 bis 9.5.6).

9.5.1 Nährstoffbedarf

Nach dem §3(1) der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) darf Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden nur so aufgebracht werden, dass die Menge „auf den Nährstoffbedarf der Pflanzen unter Berücksichtigung der im Boden verfügbaren Nährstoffe und organischen Substanz sowie der Standort- und Anbaubedingungen ausgerichtet ist.“ Diese Einschränkung wird in dem Modell durch folgende Gleichungen berücksichtigt (vgl. Kapitel 10):

- Formel 3: Minimum der Nährstoffzufuhr
- Formel 4: Maximum der Nährstoffzufuhr durch mineralische Düngemittel

- Formel 5: Minimum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs
- Formel 6: Maximum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs

9.5.2 Naturschutzgebiete

Die Naturschutzgebietsflächen sowie deren Lage wurden auf Grundlage eines GIS von WOOD (2005) ermittelt und für eine Berechnung der Flächenanteile der Naturschutzgebiete übernommen.

9.5.3 Nationalparks

Die Flächengrößen der Nationalparks in Deutschland sowie die Flächenanteile mit landwirtschaftlicher Nutzung sind SCHLOTT (2004) und BIBELRIETHER ET AL. (1997) entnommen. Es werden die Kreise ermittelt, in welchen sich Nationalparkflächen befinden. Die landwirtschaftlich nutzbare Fläche eines Nationalparks wird gleichmäßig auf das Gebiet der betroffenen Kreise aufgeteilt.

9.5.4 Uferrandstreifen

Nach dem § 4 (7) der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) ist das Aufbringen von Klärschlamm im Bereich der Uferrandstreifen bis zu einer Breite von 10 Metern verboten.

Diese Fläche ist für eine Aufteilung der Klärschlammmengen zu beachten. Als Grundlage einer Berechnung der Flächengröße wird auf ENZIAN UND GOLLA (2006) zurückgegriffen. Darin wird die räumliche Lage gewässerferner Gebiete die Anteile landwirtschaftlich genutzter Flächen ermittelt, die sich in einem Bereich von weniger als 75 m bzw. 150 m an einem Gewässerrand befinden (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Anteile der Gewässernahen und Gewässerfernen landwirtschaftlich genutzten Flächen (Stand: 2005)

Bundesland	Landw. Fläche Prozent < 75 m	Landw. Fläche Prozent > 75 m	Landw. Fläche Prozent < 150 m	Landw. Fläche Prozent > 150 m
Brandenburg	74,9	25,1	51,1	48,9
Baden-Württemberg	42,2	57,8	53,6	46,4
Bayern	67,3	32,7	61,4	38,6
Hessen	44,1	55,9	46,6	53,4
Mecklenburg-Vorpommern	89,5	10,5	72,4	27,6
Niedersachsen	62,5	37,5	75,5	24,5
Nordrhein-Westfalen	61,0	39,0	56,7	43,3
Rheinland-Pfalz	31,1	68,9	40,0	60,0
Schleswig-Holstein	81,5	18,5	61,9	38,1
Saarland	50,7	49,3	43,7	56,3
Sachsen	71,5	28,5	65,1	34,9
Sachsen-Anhalt	57,5	42,5	49,2	50,8
Thüringen	75,3	24,7	67,3	32,7
BRD	65,7	34,3	52,63	47,37

Quelle: ENZIAN UND GOLLA (2006)

Um die Flächenanteile zu ermitteln, die sich in einem Uferrandstreifen bis zu 10 Metern befinden, wird unter Annahme einer Gleichverteilung der Quotient aus den Flächenanteilen mit einem Uferabstand von weniger als 75 m und 7.5 gebildet. Die so ermittelte Flächengröße wird in dem Modell von einer Klärschlammausbringung ausgenommen.

9.5.5 Wasserschutzgebiete

SCHLOTT (2004) hat eine Aufstellung der verfügbaren Literaturangaben zu Wasserschutzgebietsflächen und dem Vorkommen der Zonen I, II und III in den Bundesländern vorgenommen. Er ermittelte dabei folgende Anteile der landwirtschaftlichen Flächen, die sich in Wasserschutzgebieten befinden (vgl. Tabelle 15). Der Anteil der Zonen von Wasserschutzgebietsflächen in den jeweiligen Bundesländern ist ebenfalls in der Tabelle aufgeführt.

Der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen an den Wasserschutzgebieten wird mit der Summe der Flächenanteile in den Wasserschutzgebietszonen I und II multipliziert. Daraus ergibt sich der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche, die in den Zonen I und II liegt und daher nach der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) nicht für eine Klärschlammausbringung in Frage kommt.

Tabelle 15: Landwirtschaftlich genutzte Flächen in Wasserschutzgebieten

Bundesland	LF	WSG- Fläche	L- Fläche	WSG- Anteil	L- Anteil	Anteil den Zonen an der Wasserschutzgebietsflä- che			Stand
						Zone I	Zone II	Zone III	
	[km ²]	[km ²]	[km ²]	LF [%]	WSG [%]	[%]	[%]	[%]	[Jahr]
Baden-Württemberg	35.751	7.253	4.134	20,3	57,0	2	8	90	1997
Bayern	70.548	2.265	1.246	3,2	55,0	1,7	36,1	62,2	1996
Berlin	889	236	112	26,5	47,6	1,2	15,6	83,3	1994
Brandenburg	29.481	1.79	987	6,1	55,1	1,2	15,6	83,3	1998
Bremen	404	75	50	18,6	66,0	1,2	15,6	83,3	1998
Hamburg	755	88	48	11,7	54,1	0,5	2,6	96,9	1998
Hessen	35.751	5.786	2.628	16,2	45,4	0,1	7,8	92	1997
Mecklenburg-Vorp.	23.17	4.37	2.491	18,9	57,0	1,5	6	92,5	1997
Niedersachsen	23.17	4.533	2.338	19,6	51,6	0,2	10,7	89,1	1997
Nordrhein-Westfalen	34.072	3.558	1.502	10,4	42,2	1,7	17,8	80,5	1998
Rheinland-Pfalz	19.845	1.547	774	7,8	50,0	0,5	42,4	57,2	1997
Saarland	2.57	404	138	15,7	34,2	0	14,5	85,5	1998
Sachsen	18.409	2.218	1.024	12,0	46,2	4	16	80	1997
Sachsen-Anhalt	20.446	1.593	797	7,8	50,0	1,2	7,9	90,9	1997
Schleswig-Holstein	15.739	172	145	1,1	84,2	1,2	15,6	83,3	1997
Thüringen	16.175	4.917	2.286	30,4	46,5	0,6	16,8	82,6	1997
Deutschland	347.175	40.806	20.698	11,8	50,8	1,2	15,6	83,3	1994-98

Quelle: SCHLOTT (2004)

9.5.6 Biologisch bewirtschaftete Flächen

Die Ausbringung von Klärschlamm ist gemäß der VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008, Anhang 1) auch auf Flächen des ökologischen Anbaus nicht zugelassen. Für das Modell werden die Flächengrößen in jedem Kreis, auf denen biologische Landwirtschaft betrieben wird, aus der Regionaldatenbank Deutschland (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011C) entnommen.

9.6 Ermittelte, für Klärschlammausbringung geeignete Landwirtschaftsflächen

Für die Berechnung der Gesamtackerfläche, die für eine Klärschlammausbringung geeignet ist, muss bedacht werden, dass einige biologisch bewirtschaftete Flächen, Wasserschutzgebiete und Uferrandstreifen in den Nationalparks bzw. Naturschutzgebieten zu finden sind. Es ist ferner möglich, dass sich biologisch bewirt-

schaftete Flächen in Wasserschutzgebieten und an Uferrandstreifen befinden oder dass sich die berechneten Größen der Uferrandstreifen und die Wasserschutzgebiete teilweise überschneiden und dass auf einem Anteil der Flächen der zulässige Grenzwert der Schwermetallkonzentration nach AbfKlärV §4 (8) bzw. ein pH-Wert von 5 unterschritten wird und somit eine Ausbringung des Klärschlammes untersagt ist.

In dem Modell wird von einer gleichmäßigen Verteilung der Gebiete und darauf aufbauend von einer Überlagerung der Flächen ausgegangen, so dass sich durchschnittlich für die gesamte zur Klärschlammausbringung geeignete Fläche aus folgender Formel ergibt.

Formel 1: Zur Klärschlammausbringung geeignete Flächen

$$\alpha_{KR}^{KlaerMax} = \left(\sum_C \alpha_{KR,C}^{crop} - a_{KR}^{lnp} \right) * (1 - \beta_{KR}^{nsg}) * (1 - \beta_{KR}^{bio}) * (1 - \beta_{KR}^{wsg}) * (1 - \beta_{KR}^{urs}) * \beta_{KR}^{gw}$$

9.7 Methodik der Berechnung der Bedarfe von Kalkdüngemitteln in den Kreisen

Kalkhaltige Düngemittel werden zur Erhöhung der pH-Werte von landwirtschaftlichen Böden eingesetzt. Das ist insbesondere erforderlich, wenn der pH-Wert des Bodens unter dem Niveau liegt, bei dem ein optimales Pflanzenwachstum gewährt werden kann. Der optimale pH-Wert hängt unter anderem vom Humusgehalt und der Bodengruppe ab. Die Bodenreaktion hat einen Einfluss auf die Löslichkeit der Schwermetalle im Boden¹⁴. In der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) §4 (9) ist festgelegt, dass für eine Klärschlammabfuhr der pH-Wert landwirtschaftlich genutzter Böden nicht geringer als 5 sein darf. Daher ist die Bodenreaktion der landwirtschaftlichen Nutzflächen in den Kreisen essentiell für eine Berechnung der Schwermetalleinträge. Sie wird dem EPIC-Modell (vgl. Kapitel 6.2) entnommen. Dort liegt sie auf Regierungsbezirksebene vor und wird dort spezifisch je Feldfrucht, der HRU, der Bewässerung und der Bodenbearbeitung angegeben. In der ESDB (vgl. Kapitel 6.1) sind die Standorte landwirtschaftlicher Nutzflächen in km²-Gitterzellen verfügbar. Diese beinhalten Informationen über die jeweilige HRU der Böden. Es wird in Grünlandflächen und Ackerflächen unterschieden. Die Datenquellen werden miteinander verknüpft, so dass im Modell die Bodenreaktion der jeweils angebauten Pflanzenarten ermittelt werden können.

9.7.1 Ermittlung der Bodenreaktion und der Kalkdüngermenge

In SCHWEDER ET AL. (2004) werden Kalkungsempfehlungen angegeben. Diese berücksichtigen sowohl die Bodenreaktion als auch die Bodenartengruppe und den Humusgehalt des Bodens (vgl. Tabelle 16).

¹⁴ vgl. ALCÂNTARA UND CAMARGO (2004), PHILLIPS (1999), YE ET AL. (2006)

Tabelle 16: Kalkungsempfehlungen mineralischer Böden

	Bodengruppe 1	Bodengruppe 2	Bodengruppe 3	Bodengruppe 4	Bodengruppe 5
Ausgangs-	CaO	CaO	CaO	CaO	CaO
pH-Wert	dt/ha	dt/ha	dt/ha	dt/ha	dt/ha
4,5	30	57	87	117	160
4,6	27	53	82	111	152
4,7	24	49	77	105	144
4,8	22	46	73	100	136
4,9	19	42	68	94	128
5,0	16	38	63	88	121
5,1	13	34	58	82	113
5,2	10	30	53	76	105
5,3	7	26	49	70	98
5,4	6	22	44	65	90
5,5	6	19	39	59	82
5,6	6	15	34	53	75
5,7	6	11	29	47	67
5,8	6	10	25	41	59
5,9	0	10	20	36	52
6,0	0	10	15	30	44
6,1	0	10	14	24	36
6,2	0	10	14	18	29
6,3	0	10	14	17	21
6,4	0	0	14	17	20
6,5	0	0	14	17	20
6,6	0	0	14	17	20
6,7	0	0	14	17	20
6,8	0	0	0	17	20
6,9	0	0	0	17	20
7,0	0	0	0	17	20
7,1	0	0	0	0	20
7,2	0	0	0	0	20
7,3	0	0	0	0	0

Quelle: SCHWEDER ET AL. (2004)

Der Tongehalt und die Bodenreaktion sind dem EPIC-Modell entnommen. Es gibt gemäß Tabelle 17 sechs Bodenartengruppen, welche vom Tongehalt im Boden abhängen (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Bodenartengruppen nach VDLUFA

Bodenartengruppen nach VDLUFA			
BG -Nr.	Bodenartengruppe(BG) Vorwiegende Bodenart	Symbol	% Korngrößen¹ In mineralischer Trockenmasse Tongehalt <0.002 mm
1	Sand	S	<= 5
2	Schwach lehmiger Sand	L`S	> 5 – 12
3	Stark lehmiger Sand	IS	> 12 – 17
4	Sandiger/ schluffiger Lehm	sL/uL	> 17 – 25
5	Toniger Lehm bis Ton Schwach toniger Lehm Toniger Lehm Lehmiger Ton Ton	t`L/T</b> <b>t`L tL IT T	> 25 > 25 - 35 > 35 - 45 > 45 – 65 > 65
6	Moor	Mo	Böden mit Humusgehalt über 30%

Quellen: Verändert nach SCHWEDER ET AL. (2004) ¹ Korngrößen nach DIN 19682

Für jeden pH-Wert ist entsprechend der Bodenartengruppen eine empfohlene Kalkmenge nach Tabelle 16 zuordenbar. Auf diese Weise können für jeden Landkreis und jede Kulturart jeweils Kalkbedarfe ermittelt werden, welche mit den vorliegenden Höhenstufen, dem Gefälle, der Bodentextur, der Tiefe und dem Stein-gehalt des Bodens gewichtet werden können.

10 Das Transportkostenminimierungsmodell

Die Transportkostenberechnung je Düngemittel und Distanz ist für dieses Modell notwendig, da eine Minimierung der Transportkosten vorgenommen werden soll.

Als Rahmenbedingung für die Berechnung der Ausbringungsmengen der Düngemittel sind bereits der Ertrag der Pflanzen bekannt, ebenso sind die Einsatzmengen der Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium durch das EPIC-Modell und der Entzug des organischen Kohlenstoffs aus den Daten des EPIC-Modells ermittelt worden (vgl. Kapitel 6.2). Der Kalkbedarf wurde auf Grundlage der Bodenreaktion und der Bodenartengruppen ermittelt (vgl. Kapitel 9.7).

Die Anzahl der gehaltenen Tiere und der anfallenden Wirtschaftsdünger, die Abgabemengen der Komposte, Klärschlämme und mineralischer Düngemittel wurden auf Kreisebene ermittelt.

Die Summe aller Transportkosten der Düngemittel sollen in dieser Arbeit mittels eines linearen Optimierungsmodells minimiert werden, so dass sich bei einer vorgegebenen Anbaufläche und einer Einhaltung der Erntemenge unter Beachtung der Nährstoffbedarfe, der zu erhaltenden Humuskonzentration im Boden und der jeweiligen zu beachtenden Verordnungen die wirtschaftlich optimale Verteilung organischer und mineralischer Düngemittel ergibt.

Es ist demzufolge bei vorgegebener Nährstoffmenge, der gegebenen Erträge und eines Ausgleichs des Entzugs des organischen Kohlenstoffs durch organische Düngemittel möglich, die Transportkosten der Düngemittel unter Einhaltung der erforderlichen Limitierungen zu minimieren.

Es werden auf Grundlage von LEIBLE ET AL. (2003) folgende Transportarten der Düngemittel berücksichtigt und die jeweiligen Kosten integriert:

- landwirtschaftliche Züge, bestehend aus einem Schlepper und einem Vakuumfass
- landwirtschaftliche Züge, bestehend aus einem Schlepper und unterschiedlicher Anhängertypen
- der Transport mittels eines LKW und
- der Transport auf Schienen.

Die jeweiligen Kosten wurden von LEIBLE ET AL. (2003) übernommen.

Für den Transport mit Schleppern werden beispielsweise folgende Transportkostengleichungen angegeben mit x =Entfernung zwischen dem Ort des Aufkommens und dem Ort der Verwendung und y =Kosten der Fahrt¹⁵:

Schlepper (90 KW) mit Vakuumfass (12 m ³):	$y = 2,8359 x + 58,561$
Schlepper (70 KW) mit 2 Hängern von je 6 Mg Nutzlast:	$y = 2,4417 x + 66,902$
Schlepper (90 KW) mit 2 Hängern von je 14 Mg Nutzlast:	$y = 3,1271 x + 89,905$

¹⁵ Quelle: KTBL (2000b) und FIRMENINFORMATIONEN (2000), zitiert von LEIBLE ET AL. (2003)

Für die Berechnung der Transportkosten bei einer Beförderung mittels eines LKW und auf dem Schienenweg wurden jeweils Mautgebühren gemäß LEIBLE ET AL. (2003) berücksichtigt.

Für einen Transport zwischen zwei Kreisen wurde jeweils die mittlere Distanz der Kreise auf Grundlage der gegebenen Geoinformationen ermittelt. Es stehen für jedes Düngemittel jeweils mehrere Transportmöglichkeiten zur Wahl. Für das Transportkostenminimierungsmodell wurde bereits in der Berechnung der Eingangsdaten davon ausgegangen, dass jeweils das günstigste Transportmittel gewählt wird.

Für den Transport von Mineraldüngern zwischen zwei Bundesländern wird die mittlere Entfernung zwischen den Bundesländern ermittelt und für eine Berechnung der Transportkosten herangezogen.

Das Transportkostenminimierungsmodell besteht aus folgenden Gleichungen und Restriktionen.

Zielfunktion: Dies ist die Gleichung, in welcher die Transportkosten der Wirtschaftsdünger, der Komposte und des Klärschlammes bei einem Transport zwischen den Landkreisen und die Kosten des Transports von mineralischen Düngemitteln zwischen den Bundesländern berechnet werden. Sie enthält die Variable TRANSCOST, welche bei der Lösung des Modells minimiert wird.

Formel 2: Zielfunktion

$$TRANSCOST = \left(\begin{array}{l} \sum_{E,I,A,D} (\tau_{E,I,A,D}^{wirt} \cdot WTRS_{E,I,A,D}) \\ \sum_{E,I,KO} (\tau_{E,I,KO}^{komp} \cdot KOTRS_{E,I,KO}) \\ \sum_{E,I,KL} (\tau_{E,I,KL}^{klaer} \cdot KLTRS_{E,I,KL}) \\ \sum_{EBL,IBL,M} (\tau_{EBL,IBL,M}^{komp} \cdot MTRS_{EBL,IBL,M}) \end{array} \right)$$

Minimum der Nährstoffzufuhr: Die Menge der Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie die Basisch wirksamen Bestandteile, die anhand EPIC-Daten als Bedarfe innerhalb der jeweiligen Minima und Maxima zufällig erstellt wurden, müssen, multipliziert mit der Anbaufläche, mindestens der Zufuhr der Stoffe durch Wirtschaftsdünger, Komposte, Klärschlämme und Mineralische Düngemittel entsprechen.

Formel 3: Minimum der Nährstoffzufuhr

$$\sum_{H,T} \chi_{KR,H,C,T,N}^{crop} \cdot CROP_{KR,H,C,T} \leq \left(\begin{array}{l} \sum_{A,D} \pi_{KR,A,D,N}^{wirt} \cdot WIRT_{KR,A,D,C} \\ \sum_{KO} \pi_{KR,KO,N}^{komp} \cdot KOMP_{KR,KO,C} \\ \sum_{KL} \pi_{KR,KL,N}^{klaer} \cdot KLAER_{KR,KL,C} \\ \sum_M \pi_{KR,M,N}^{mine} \cdot MINE_{KR,M,C} \end{array} \right)$$

Maximum der Nährstoffzufuhr durch mineralische Düngemittel: Die Menge der Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie die Basisch wirksamen Bestandteile, die anhand EPIC-Daten als Bedarfe innerhalb der jeweiligen Minima und Maxima zufällig erstellt wurden, dürfen, multipliziert mit der Anbaufläche, maximal der Zufuhr der Stoffe durch Mineralische Düngemittel entsprechen.

Formel 4: Maximum der Nährstoffzufuhr durch mineralische Düngemittel

$$\sum_{H,T} \chi_{KR,H,C,T,N}^{crop} \bullet CROP_{KR,H,C,T} \geq \sum_M \pi_{KR,M,N}^{mine} \bullet MINE_{KR,M,C}$$

Minimum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs: Auf Grundlage der EPIC-Daten sind die Minima und Maxima der Netto-Austragsmengen organischen Kohlenstoffs für jede Pflanzenart und Technologie berechnet worden (vgl. Kapitel 6.2). In jedem Durchlauf der Monte-Carlo-Simulation wird jeweils eine Nettoaustragsmenge unter Annahme einer ubiquitären Verteilungsfunktion berechnet, die für die jeweilige Fläche angenommen wird. Auf Grundlage der Empfehlung, die im VDLUFA-Standpunkt "Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland" (KÖRSCHENS ET AL., 2004) angegeben ist, wird gefordert, dass die flächenbezogene Düngung von organischem Kohlenstoff mindestens der Differenz des Nettoaustrags des organischen Kohlenstoffs im Boden und 75 kg/ha betragen muss. Da zur Berechnung der Nettokohlenstoffaustragsmenge bereits auf dem Feld verbleibende Pflanzenreste berücksichtigt sind, wird im Modell gefordert, dass die zu verabreichende Menge organischen Kohlenstoffs den Böden durch Wirtschaftsdünger, Komposten und Klärschlamm zugeführt werden muss.

Formel 5: Minimum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs

$$\sum_{H,T} \left((\chi_{KR,H,C,T,"COrg"}^{crop} - \delta_C^{\min}) \bullet CROP_{KR,H,C,T} \right) \leq \left(\begin{array}{l} \sum_{A,D} \pi_{KR,A,D,"COrg"}^{wirt} \bullet WIRT_{KR,A,D,C} \\ \sum_{KO} \pi_{KR,KO,"COrg"}^{komp} \bullet KOMP_{KR,KO,C} \\ \sum_{KL} \pi_{KR,KL,"COrg"}^{klaer} \bullet KLAER_{KR,KL,C} \end{array} \right)$$

Maximum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs: Gemäß des VDLUFA-Standpunktes "Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland" (KÖRSCHENS ET AL., 2004) wird empfohlen, dass die flächenbezogene Düngung von organischem Kohlenstoff maximal der Summe des Nettoaustrags des organischen Kohlenstoffs im Boden und 100 kg/ha betragen sollte. Diese Forderung wird in der Formel 6 umgesetzt.

Formel 6: Maximum der Menge des eingebrachten organischen Kohlenstoffs

$$\sum_{H,T} \left((\chi_{KR,H,C,T,"COrg"}^{crop} + \delta_C^{\max}) \cdot CROP_{KR,H,C,T} \right) \geq \left(\begin{array}{l} \sum_{A,D} \pi_{KR,A,D,"COrg"}^{wirt} \cdot WIRT_{KR,A,D,C} \\ \sum_{KO} \pi_{KR,KO,"COrg"}^{komp} \cdot KOMP_{KR,KO,C} \\ \sum_{KL} \pi_{KR,KL,"COrg"}^{klaer} \cdot KLAER_{KR,KL,C} \end{array} \right)$$

Minstdüngemenge mineralischen Stickstoffs: In dieser Formel wird definiert, dass die in im EPIC-Modell (vgl. Kapitel 6.2) definierte eingesetzte Stickstoffdüngemenge auf konventionell bewirtschafteten Betrieben aus betriebsbedingten Erfordernissen mindestens zu 20 % aus mineralischem Stickstoff bestehen muss (vgl. KNAPPE ET AL., 2008).

Formel 7: Minstdüngemenge mineralischen Stickstoffs

$$\sum_{H,T} \left(\chi_{KR,H,C,T,"N"}^{crop} \cdot CROP_{KR,H,C,T} \right) \cdot 20\% \cdot (1 - \beta_{KR}^{bio}) \leq \sum_M \pi_{KR,M,"N"}^{mine} \cdot MINE_{KR,M,C}$$

Identität der Summe der Kompost-, Klärschlamm- bzw. Mineraldüngermenge: Die Menge des Komposts, Klärschlamms und der Mineraldüngemittel, die gemäß der statistischen Erhebung zur Verwendung in der Landwirtschaft abgegeben wird, muss in der Summe jeweils den im Modell berechneten Ausbringungsmengen entsprechen.

Formel 8: Identität der Summe der Kompost-, Klärschlamm- bzw. Mineraldüngermenge

$$\left(\begin{array}{l} + \sum_{KR} o_{KR,DU}^{komp} \\ + \sum_{KR} o_{KR,DU}^{klaer} \\ + \sum_{BL} o_{BL,DU}^{mine} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \sum_{KR,C} KOMP_{KR,DU,C} \\ \sum_{KR,C} KLAER_{KR,DU,C} \\ \sum_{KR,C} MINE_{KR,DU,C} \end{array} \right)$$

Identität der Summe der Wirtschaftsdüngermenge: Der gesamte verfügbare Wirtschaftsdünger wird ausgebracht oder fermentiert und als Gärrückstand ausgebracht.

Formel 9: Identität der Summe der Wirtschaftsdüngermenge

$$\sum_{KR} o_{KR,A,D}^{wirt} = \left(\begin{array}{l} + \sum_{KR,C} WIRT_{KR,A,D,C} \\ + \sum_{KR} GWIRT_{KR,A,D} \cdot v_{A,D}^{gwirt} \end{array} \right)$$

Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten, fermentierten und ausgebrachten Wirtschaftsdüngermenge: Die in einem Kreis ausgebrachte Wirtschaftsdüngermenge ergibt sich aus der in dem Kreis produzierten, aus dem Kreis exportierten, in den Kreis importierten und der für eine Fermentation verwendeten Menge.

Formel 10: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten, fermentierten und ausgebrachten Wirtschaftsdüngermenge

$$+O_{KR,A,D}^{wirt} = \left(\begin{array}{c} +\sum_C WIRT_{KR,A,D,C} \\ -\sum_E WTRS_{E,KR,A,D} \\ +\sum_I WTRS_{KR,I,A,D} \\ +GWIRT_{KR,A,D} \bullet v_{A,D}^{gwirt} \end{array} \right)$$

Fermentation der Wirtschaftsdünger: Das Produkt der in einem Kreis verfügbaren Gärrückstände und dem Anteil der Gärrückstände, welche aus der Tierhaltung stammen, ergibt die Gärrückstandsmenge, welche durch die Fermentation von Wirtschaftsdüngern erzeugt wird.

Formel 11: Fermentation der Wirtschaftsdünger

$$GWIRT_{KR,A,D} = \sum_C o_{KR,"GAER",C}^{komp} \bullet \beta_{Kr}^{gwirt}$$

Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Komposte und Klärschlämme: Die in einem Kreis ausgebrachte Kompost- bzw. Klärschlammmenge ergibt sich aus der in dem Kreis anfallenden, der importierten und exportierten Kompost- bzw. Klärschlammmenge

Formel 12: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Komposte und Klärschlämme

$$\left(\begin{array}{c} +O_{KR,DU}^{komp} \\ +O_{KR,DU}^{klaer} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} +\sum_C KOMP_{KR,DU,C} \\ -\sum_E KOTRS_{E,KR,DU} \\ +\sum_I KOTRS_{KR,I,DU} \\ +\sum_C KLAER_{KR,DU,C} \\ -\sum_E KLTRS_{E,KR,DU} \\ +\sum_I KLTRS_{KR,I,DU} \end{array} \right)$$

Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Mineraldünger: Die in den Kreisen eines Bundeslandes ausgebrachte Menge eines Mineraldüngers ergibt sich in der Summe aus der in dem Bundesland verkauften, der in das Bundesland importierten und der aus dem Bundesland exportierten Menge des Mineraldüngers

Formel 13: Übereinstimmung der anfallenden, exportierten, importierten und ausgebrachten Menge der Mineraldünger

$$O_{BL,M}^{mine} = \left(\begin{array}{l} + \sum_{KR(BL),C} MINE_{KR,M,C} \\ - \sum_{EBL} MTRS_{EBL,BL,M} \\ + \sum_{IBL} MTRS_{BL,IBL,M} \end{array} \right)$$

Limitierung der Düngemittelsatzmengen durch entsprechende Verordnungen: Die DÜV (2009), die BIOABFV (2010), die ABFKLÄRV (2010) und die VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008 (2008) werden bei der Berechnung der maximal auszubringenden Düngemittelmenge berücksichtigt.

Formel 14: Limitierung der Düngemittelsatzmengen durch entsprechende Verordnungen

$$\psi_{KR,N}^{crop} \cdot \sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T} \geq \left(\begin{array}{l} \sum_{A,D} \pi_{KR,A,D,N}^{wirt} \cdot WIRT_{KR,A,D,C} \\ \sum_{KO} \pi_{KR,KO,N}^{komp} \cdot KOMP_{KR,KO,C} \\ \sum_{KL} \pi_{KR,KL,N}^{klaer} \cdot KLAER_{KR,KL,C} \\ \sum_M \pi_{KR,M,N}^{mine} \cdot MINE_{KR,M,C} \end{array} \right)$$

Übereinstimmung der Summe der Anbauflächen je Kreis: Die Summe der in dem Modell auf Kreisebene berechneten Flächen je Pflanzenart muss, unter Einbeziehung der jeweiligen HRU, der jeweiligen Bodenbearbeitung und der Bewässerung, der Gesamtfläche der Pflanzenart, die aus den Statistiken entnommen werden (vgl. Kapitel 8.1) entsprechen.

Formel 15: Übereinstimmung der Summe der Anbauflächen je Kreis

$$\alpha_{KR,C}^{crop} = \sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T}$$

Identität der irrigierten Flächengröße: Die Größe irrigierter Flächen muss in der Summe der in der Statistik der Wasserversorgung in der Landwirtschaft (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004) gegebenen irrigierten Gesamtflächengröße entsprechen. Dies gilt jedoch nur für die Pflanzenarten in den Bundesländern, für die in EPIC die in Kapitel 6.2 genannten Informationen verfügbar sind.

Formel 16: Identität der irrigierten Flächengröße

$$\sum_{H,C,T_{irr}} CROP_{KR,H,C,T_{irr}} = \alpha_{KR}^{irr}$$

Limitierung der Flächen auf Grundlage der minimalen Erntemenge: Die Summe des Ertrages nach STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011F), multipliziert mit der Gesamtfläche einer Pflanzenart, entspricht unter Einbeziehung der jeweiligen HRU, der Bodenbearbeitung und der Bewässerung

mindestens der Summe der Produkte des jeweilig berechneten minimalen Ertrags der EPIC-Daten (vgl. Kapitel 6.2) in dem Zeitraum 1995 bis 2005 und der jeweils berechneten Anbaufläche der Pflanzenart.

Formel 17: Limitierung der Flächen auf Grundlage der minimalen Erntemenge

$$\gamma_C^{crop} \cdot \alpha_{KR,C}^{crop} \geq \sum_{H,T} \theta_{KR,H,C,T}^{\min} \cdot CROP_{KR,H,C,T}$$

Limitierung der Flächen auf Grundlage der maximalen Erntemenge: Die Summe des Ertrages nach STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011f), multipliziert mit der Gesamtfläche einer Pflanzenart, entspricht unter Einbeziehung der jeweiligen HRU, der Bodenbearbeitung und der Bewässerung maximal der Summe der Produkte des jeweilig berechneten maximalen Ertrags der EPIC-Daten (vgl. Kapitel 6.2) in dem Zeitraum 1995 bis 2005 und der jeweils berechneten Anbaufläche der Pflanzenart.

Formel 18: Limitierung der Flächen auf Grundlage der maximalen Erntemenge

$$\gamma_C^{crop} \cdot \alpha_{KR,C}^{crop} \leq \sum_{H,T} \theta_{KR,H,C,T}^{\max} \cdot CROP_{KR,H,C,T}$$

11 Ergebnisse

11.1 Vorsorgewerte

Nach der Bundes-Boden-Schutz- und Altlastenverordnung (BBODSCHV 2009, Anhang 2 Absatz 4.1) gelten folgende Vorsorgewerte der Schwermetallkonzentration für landwirtschaftlich genutzten Böden (vgl. Tabelle 18). Für "Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten" (BBODSCHV 2009, Anhang 2 Absatz 4.1) gelten diese Vorsorgewerte nur, sofern "eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nach § 9 Abs. 2 und 3 dieser Verordnung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen." Da auf Grundlage der verwendeten Hintergrundgehalte nach LABO (2003) keine Rückschlüsse auf die naturbedingten Hintergrundgehalte möglich sind, werden die landwirtschaftlich genutzten Flächen, auf denen ein Vorsorgewert erreicht ist, in dieser Arbeit nicht gesondert behandelt, es kann also auch auf diesen im Modell ohne spezifische Restriktionen gewirtschaftet werden.

Tabelle 18: Vorsorgewerte nach der BBodSchV ([mg/kg], Feinboden, Königswasseraufschluss)

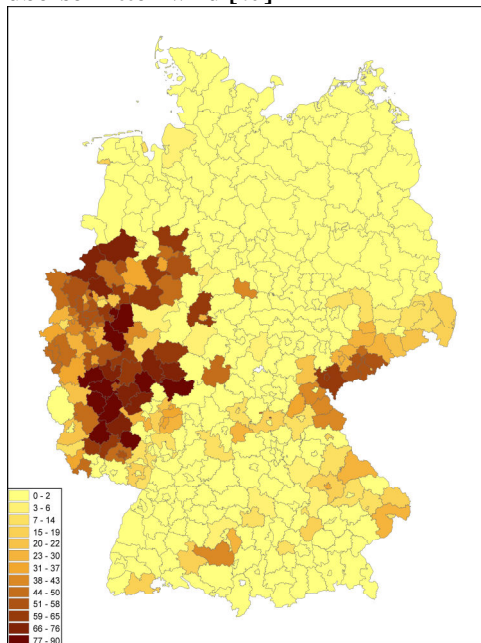
Element	Bodenart Ton	Bodenart Lehm	Bodenart Sand
Cd	1,5	1	0,4
Cr	100	60	30
Cu	60	40	20
Ni	70	50	15
Pb	100	70	40
Zn	200	150	60

Quelle: BBODSCHV (2009), Anhang 2, Absatz 4.1

Auf Grundlage der Tongehalte, die aus den EPIC-Daten (vgl. Kapitel 6.2) entnommen werden, für die jeweilige HRU und den berechneten Hintergrundgehalten der Ausgangsgesteine (vgl. Kapitel 7) die relative Anzahl der bereits erreichten Vorsorgewerte je Kreis berechnet. Dies wird in jedem Schritt der Monte-Carlo-Simulation für jede Pflanzenart ausgeführt, so dass durch die Vielzahl der berechneten Hintergrundgehalte die Konzentrationskurven der Hintergrundgehalte berücksichtigt werden.

Die durchschnittlich relative Anzahl der landwirtschaftlichen Flächen der Kreise, auf denen einer der Vorsorgewerte überschritten ist, ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Abbildung 2: Relative Anzahl der Ackerböden, auf denen einer der Vorsorgewerte nach der BBodSchV überschritten wird [%]



Quelle: Eigene Berechnung

Nur die Flächen, auf denen keiner der Vorsorgewerte erreicht ist, gestatten eine Berechnung der verbleibenden Zeitspanne bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte bei konstanten, positiven Nettoeinträgen. Ist auf einer Fläche bereits einer der Vorsorgewerte nach der BBodSchV erreicht, gelten die zulässigen zusätzlichen Schadstofffrachten über alle Wirkungspfade nach der BBodSchV, Anhang 2, Absatz 5, die in der folgenden Tabelle angegeben sind.

Tabelle 19: Zulässige zusätzliche Schadstofffrachten über alle Wirkungspfade gemäß der BBodSchV [g/ha]

Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
6	300	360	100	400	1200

Quelle: BBODSCHV (2009), Anhang 2, Absatz 5

11.2 Berechnung der Schwermetalleinträge und -austräge aus den landwirtschaftlichen Flächen

Nachdem die lineare Optimierung der Transportkosten der Düngemittel erfolgt ist, werden in jedem Durchlauf der Monte-Carlo-Simulation die Schwermetalleinträge berechnet, die mit den Düngemitteln in die landwirtschaftlichen Nutzflächen eingetragen werden. Jedes Düngemittel weist unterschiedliche Schwermetallkonzentrationen auf. Zum einen liegen verschiedene Mittelwerte der Konzentration vor, zum anderen werden unterschiedliche Standardabweichungen der Schwermetallkonzentrationen angegeben.

Die Höhe der Schwermetalleinträge in landwirtschaftliche Böden über unterschiedliche Düngemittel hängt von der ausgebrachten Menge der Düngemittel und der jeweils darin enthaltenen Schwermetallkonzentration ab.

Zur Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsverteilungskurven der Schwermetallkonzentrationen in Düngemitteln wird auf Literaturdaten zurückgegriffen.

Die Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren wie der Tierart, der Nutzungsart und von unterschiedlich bemessenen Sicherheitszuschlägen ab. Die Methodik der Berechnung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger ist in Kapitel 11.3 und 11.4 vorgestellt. Auf die Methodik zur Ermittlung der Schwermetalleintragsmengen durch Komposte wird in Kapitel 11.6 sowie 11.7, durch Klärschlämme in Kapitel 11.9 und 11.10 und durch Mineralische Düngemittel in Kapitel 11.12 bis 11.13 eingegangen. Die Methodik der Berechnung der Einträge von Schwermetallen durch Pestizide sind in Kapitel 11.15 erläutert und durch atmosphärische Deposition in Kapitel 11.17.

Als Austräge der Schwermetalle werden die Abfuhr durch die Ernte (vgl. Kapitel 11.1), der Abtrag infolge der Erosion (vgl. Kapitel 12.5) und die Verlagerung mit dem Sickerwasser (vgl. Kapitel 11.3) berücksichtigt.

11.2.1 Berechnung des Schwermetallaufkommens durch Wirtschaftsdünger

Eine bedeutende Quelle der Schwermetalleinträge in landwirtschaftliche Böden sind Wirtschaftsdünger. Die Schwermetalle werden von den Nutztieren überwiegend mit der Nahrung aufgenommen. Die Schwermetalle Kupfer und Zink sind essentiell für landwirtschaftliche Nutztiere (GFE 1987, 1994, 1995, 1999, 2001) und werden unter anderem zugefüttert, um Mangelsymptome zu vermeiden.

Eine weitere Eintragsquelle der Schwermetalle in die Wirtschaftsdünger stellen die schwermetallhaltigen Desinfektionsmittel und Einstreumaterialien dar und sie können auch durch Korrosion von Ställen und Lagerungsbehältern¹⁶ in die Wirtschaftsdünger gelangen.

11.2.2 Retention und Exkretion der Schwermetalle

Nach HAPKE (2002) ist die durchschnittliche enterale Absorptionsrate der Schwermetalle:

- Cu 35 bis 50%
- Zn < 10%
- Pb < 10%
- Cd < 2%
- Cr(III) 0,2 bis 3%, meist 0.5%
- Cr(VI) 2 bis 10%
- Ni je nach Bindung bis 5%.

Die Retentionsraten hängen unter anderem von der Konzentration des aufgenommenen Schwermetalls ab. So nimmt beispielsweise bei Geflügel die Zinkretention mit steigender Konzentration des aufgenommenen Elements ab (THIEL ET AL., 1993)¹⁷. BURRELL ET AL. (2004) berichten, dass die Zinkexkretion von Hähnchen um 50 % abnimmt, wenn die Zinksupplementierung von 120 mg/kg auf 40 mg/kg reduziert wird (vgl. auch

¹⁶ BOLAN ET AL. (2004), SCHULTHEISS ET AL. (2002)

¹⁷ zitiert von MOHANNA UND NYS (1998)

DOZIER ET AL., 2003). Das Alter der Tiere beeinflusst die Retentionsraten und auch die Verbindung, in der das Element aufgenommen wird, kann einen Einfluss auf dessen Verfügbarkeit im Organismus haben (MOHANNA UND NYS, 1999).

Schwermetalle können mit anderen Elementen im Körper des Nutztieres in Wechselwirkung treten, so dass diese die Absorption der Schwermetalle beeinflussen (vgl. FLACHOWSKY, 2002). Beispielsweise treten antagonistische Effekte bezüglich der Kupferverwertung im Körper von Milchkühen auf, wenn Schwefel, Molybdän oder Eisen in hoher Dosierung verabreicht werden (GFE, 2001). Bei Schafen wurde ebenfalls ein Einfluss des Molybdäns auf die Kupferabsorption festgestellt (GOVASMAR ET AL., 2005). Eine hohe Zinksupplementierung kann nach HAPKE (2002) zu Eisen- oder Kupfermangelerscheinungen führen. Vitamin D₃, das Hennen zusätzlich zu Cadmium verabreicht wird, verringert die Cadmiumkonzentration insbesondere in der Leber und der Niere verglichen mit einer reinen Cadmiumgabe ohne die Zufuhr des Vitamins (KORÉNEKOVÁ ET AL., 2002).

Chrom spielt im Körper der landwirtschaftlichen Nutztiere in zwei Wertigkeiten eine Rolle. Während Cr(III) für den Organismus essentiell ist, hat Cr(VI) toxische Effekte (HAPKE, 2002). Die Absorptionsrate von Cr(III) ist mit 0,2 % bis 3 % jedoch wesentlich geringer als von Cr(VI), die zwischen 2 % und 10% liegt (HAPKE, 2002).

Die Retention der Schwermetalle variiert zwischen den unterschiedlichen Organen der Nutztiere. Sie werden in einzelnen Organen, speziell der Leber und der Niere, akkumuliert (vgl. ALONSO ET AL., 2000, 2002).

11.2.3 Einfluss von Schwermetallen auf das Wachstum von Nutztieren

Kupfer und Zink können das Wachstum von Nutztieren fördern¹⁸. Kupfer wird beispielsweise bei Schweinen zur Leistungsförderung eingesetzt. APGAR ET AL. (1995) beschreiben bis zu einer Konzentration von 200 mg/kg einen linearen Zusammenhang zwischen der Kupferdosis und dem Wachstum von Ferkeln.

CROMWELL ET AL. (1998) beobachteten ebenfalls einen positiven Einfluss von Kupferchlorid und Kupfersulfat auf das Wachstum von Ferkeln.

Ein positiver Einfluss von Zink auf die Gewichtszunahme von Küken wurde von WEDEKIND ET AL. (1992) beschrieben¹⁹. Eine Obergrenze, von der an keine weitere Leistungsförderung mehr erfolgt, wurde in den Versuchen von MOHANNA UND NYS (1999) bei 45 mg/kg festgestellt.

Chrom hat ebenfalls einen positiven Einfluss auf das Wachstum von Geflügel (CHEN ET AL., 2001) und die Futterverwertungsrate von Schweinen (LINDEMANN, 1999).

¹⁸ vgl. SKRIVAN ET AL. (2000), PERSIA ET AL. (2004), RUIZ ET AL. (2000); COFFEY (1994)

¹⁹ Siehe auch ABDULRAHIM ET AL. (1999)

11.2.4 Einfluss von Schwermetallen auf die Gesundheit landwirtschaftlicher Nutztiere

Zink ist ein essentielles Element im Organismus landwirtschaftlicher Nutztiere²⁰. Kupfer und Zink werden daher beispielsweise bei Schafen und Rindern in Klauenbädern verwendet und zugefüttert (SCHENKEL, 2002b). Eine hohe Kupfergabe führt jedoch zu einer Anreicherung des Stoffes in der Leber und kann toxische Effekte auf den Organismus haben (vgl. ENGLE ET AL., 2001).

Dreiwertiges Chrom ist essentiell für den Körper der Nutztiere (LIEN ET AL., 1999). Eine Aufnahme von sechswertigem Chrom wirkt jedoch toxisch unter anderem auf Leber und Niere (HAPKE, 2002).

Ein Nickelmangel kann die Pansenflora beeinträchtigen (HAPKE, 2002). Blei ist toxisch und führt bei einer zu hohen Konzentration im Körper der Tiere zum Tod (vgl. FRANCISCO ET AL., 2003).

11.3 Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern

Die Schwermetallkonzentration in den Wirtschaftsdüngern hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Die Konzentration in den Exkrementen wurde vielfach in Experimenten unter Laborbedingungen gemessen und dabei wurde ein Zusammenhang der Schwermetallzufütterung und der Konzentration im Wirtschaftsdünger festgestellt (APGAR ET AL., 1996).

Für eine Schwermetallbilanzierung ist es bedeutend, die entsprechenden Konzentrationen unter Praxisbedingungen zu berücksichtigen. Dazu können repräsentative, langjährige Messungen der Elementkonzentration in dem Wirtschaftsdünger verwendet werden. Für das Modell wurde eine umfassende Datensammlung von KRATZ ET AL. (2005) verwendet. Darin werden jeweils die Probenmenge, das Minimum, das Maximum, der Mittelwert und die Standardabweichung der Schwermetallkonzentration angegeben (Mittelwerte: vgl. Tabelle 20). Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden verwendet, um jeweils eine Konzentrationskurve unter Annahme einer Lognormalverteilung zu erstellen.

²⁰ Vgl. JEROCH ET AL. (1999), ANDERSSON (2002), DARDENNE UND BACH (1993), CUI ET AL. (2004), FRAKER ET AL. (1986)

Tabelle 20: Mittlere Schwermetallkonzentration in den Wirtschaftsdüngern [mg/kg]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Rindergülle	0,28	4,8	53,7	5,4	4,7	225
Rindermist	0,24	9,7	34,2	7,4	5,8	144
Schweinegülle	0,29	6,7	225	9,8	4,5	864
Schweinemist	0,36	12,3	213	5,2	1,9	491
Hühner, Festmist	0,86	6,1	67,8	7,7	7,2	419
Broiler, Festmist	0,44	30,7	112	13,2	3,3	337
Pute, Festmist	0,5	14,7	122	5,1	2,8	362
Pferd, Festmist	0,21	5,9	12,2	6,9	4,2	63,2
Schaf, Festmist	0,38	54,7	24,3	15,8	25,2	101

Quelle: KRATZ ET AL. (2005)

11.4 Methodik zur Berechnung des flächenbezogenen Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Wirtschaftsdünger

Um die flächenbezogene Menge der mit den Wirtschaftsdüngern in einem Kreis anfallenden Schwermetallmenge zu bestimmen, sind folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Die Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern (vgl. Kapitel 11.3)
- Die ausgebrachte Wirtschaftsdüngermenge je Kreis (vgl. Kapitel 10)
- Die landwirtschaftlich genutzte Fläche je Kreis (vgl. Kapitel 8.1)

Die flächenbezogenen Schwermetalleinträge in den landwirtschaftlichen Boden durch Wirtschaftsdünger werden folgendermaßen berechnet:

Formel 19: Flächenbezogener Schwermetalleintrag durch Wirtschaftsdünger

$$e_{KR,A,C,HM}^{WIRT} = \frac{\sum_D (WIRT_{KR,A,D,C} * \pi_{A,D,"TM"}^{WIRT} * \omega_{A,D,HM}^{WIRT})}{\sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T}}$$

11.5 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Wirtschaftsdünger

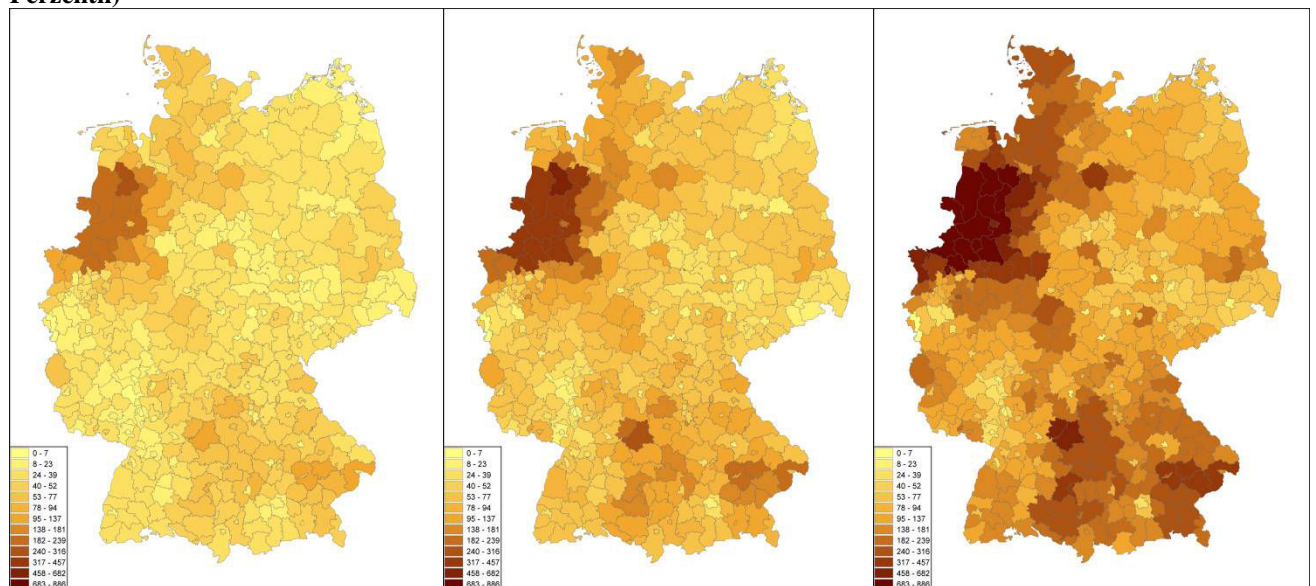
In der folgenden Tabelle sind die mittleren Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen angegeben. Aus der Tabelle geht hervor, dass der überwiegende Anteil der Schwermetalleinträge durch Rinderdung und Schweinedung verursacht wird.

Tabelle 21: Mittlere Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger in Deutschland [g/ha]

Schwermetall	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Rinder	0,268	6,28	47,74	5,88	4,81	202,45
Schweine	0,080	2,05	57,39	2,31	1,03	207,42
Legehennen	0,023	0,16	1,71	0,20	0,19	11,03
Masthähnchen	0,014	1,05	3,53	0,37	0,11	11,21
Sonstiges Geflügel	0,012	0,35	2,90	0,12	0,07	8,64
Schafe	0,025	3,55	1,59	1,02	1,68	6,67
Pferde	0,024	0,65	1,42	0,81	0,48	7,54
Gesamt	0,447	14,08	116,28	10,71	8,37	454,95

Quelle: Eigene Berechnung

In der folgenden Abbildung sind die 10. Perzentile, die Mediane und die 90. Perzentile der Kupfereinträge durch Wirtschaftsdünger auf Kreisebene dargestellt. In diesen Abbildungen sind die durchschnittlichen Einträge, bezogen auf die Gesamtheit der Flächen des jeweiligen Kreises, dargestellt. In einigen Landkreisen Nordrhein-Westfalens wurden die höchsten Kupfer-Einträge durch Wirtschaftsdünger berechnet. Die 10., 50. und 90. Perzentil unterscheiden sich teilweise erheblich voneinander. Dies liegt zum einen an den im Modell verwendeten lognormalverteilten Kupferkonzentrationen in den Wirtschaftsdüngern und zum anderen an den aus den unterschiedlichen aus dem Transportkostenminimierungsmodell hervorgehenden Ausbringungsmengen derselben.

Abbildung 3: Cu-Eintrag durch Wirtschaftsdünger [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)

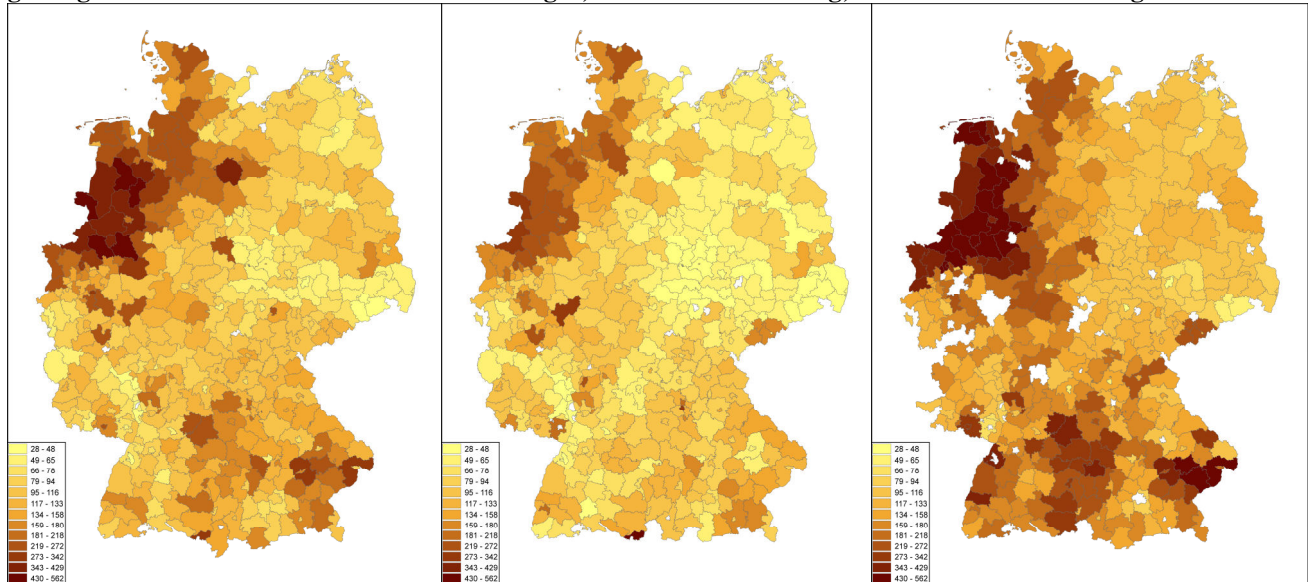
Quelle: Eigene Berechnungen

Die folgende Abbildung (Abbildung 4 links) zeigt die Mediane der Kupfereinträge durch Wirtschaftsdünger auf denjenigen Flächen, die überwiegend²¹ mit Wirtschaftsdüngern gedüngt werden. Diese unterscheiden sich von den in Abbildung 3 dargestellten Medianen, da diese sich auf die Gesamtheit der im Kreis vorhandenen

²¹ das betrifft in diesen Abbildungen Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch die jeweiligen Wirtschaftsdünger an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt. Berücksichtigt wurden aufgrund von potentiellen "Ausreißern" nur diejenigen Landkreise, in denen mindestens 10% der Durchläufe der Monte-Carlo-Simulation Flächen ergeben haben, die überwiegend mit den jeweiligen Wirtschaftsdüngern gedüngt wurden.

Flächen beziehen. In Abbildung 4 (Mitte) sind die Mediane der Kupferausträge aus überwiegend mit Wirtschaftsdüngern aus der Rinderhaltung und in Abbildung 4 (rechts) aus überwiegend mit Wirtschaftsdüngern aus der Schweinehaltung gedüngten Flächen angegeben.

Abbildung 4: Mediane der Summe der Kupfereinträge [g/ha] auf überwiegend²¹ mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Ackerböden. Links: Wirtschaftsdünger; Mitte: Rinderhaltung; Rechts: Schweinehaltung



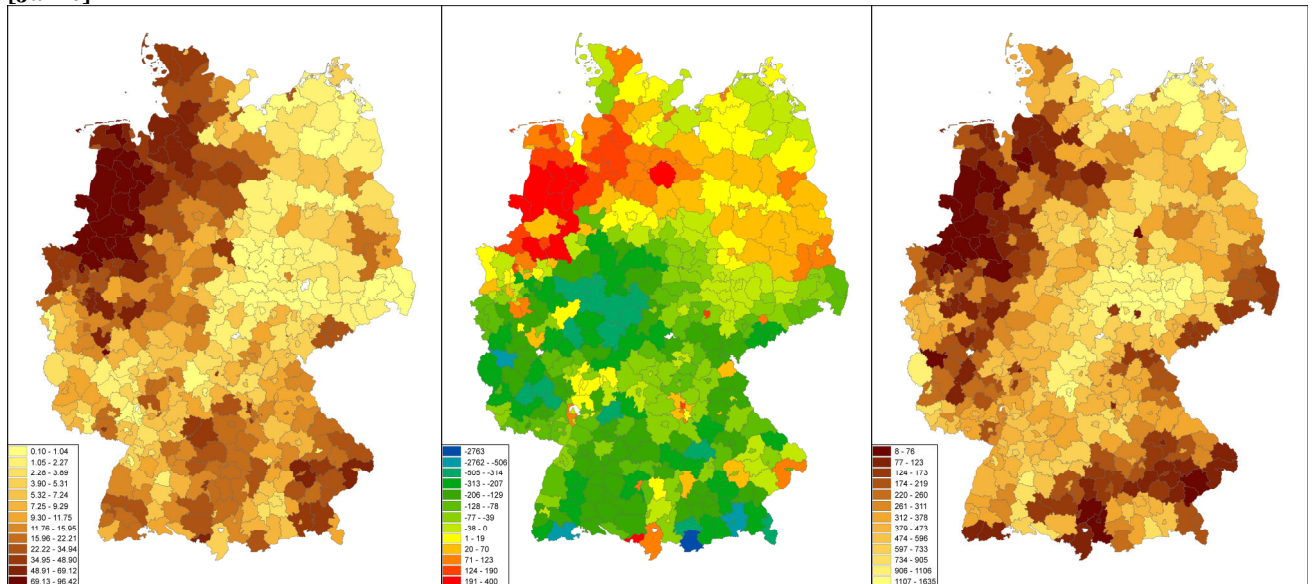
Quelle: Eigene Berechnung

In der folgenden Abbildung (Abbildung 5 links) sind die berechneten relativen Flächengrößen derjenigen Flächen dargestellt, auf denen die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht nach der BBodSchV (vgl. Kapitel 11) überschritten werden würde, sofern die Vorsorgewerte erreicht wären. Es sind nur diejenigen Flächen in die Berechnung eingeschlossen, auf denen die Zufuhr organischen Kohlenstoffs überwiegend²² durch Wirtschaftsdünger erfolgt. Dabei werden neben den Schwermetalleinträgen durch Wirtschaftsdünger auch die übrigen Eintragsquellen berücksichtigt, da in der BBodSchV gefordert wird, dass die zusätzlichen Schadstofffrachten über alle Wirkungspfade nicht überschritten werden. In der Abbildung 5 (Mitte) sind die Mediane der Kupfer-Nettoeinträge der überwiegend mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Flächen dargestellt.

Auf der rechten Seite (Abbildung 5 rechts) sind die durchschnittlichen Zeiträume angegeben, die auf den überwiegend mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Flächen bei konstanten Nettoeinträgen verbleiben, bis einer der Vorsorgewerte nach der BBodSchV erreicht ist. Es sind dabei nur die Flächen berücksichtigt worden, auf denen ein positiver Nettoeintrag des jeweiligen Schwermetalls erfolgt und keiner der Vorsorgewerte erreicht ist (vgl. dazu Kapitel 11).

²² das betrifft in Abbildung 5 die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Wirtschaftsdünger an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt

Abbildung 5: Überwiegend²² mit Wirtschaftsdüngern gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Cu-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]



Quelle: Eigene Berechnung

11.6 Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärrückständen

Für die Berechnung der Häufigkeitsverteilungskurven der Schwermetallkonzentration der Komposte und Gärrückstände wurden Mittelwerte und Maxima verwendet, welche in DITTRICH UND KLOSE (2008) und KRATZ ET AL. (2005) angegeben sind (vgl. Tabelle 22). Im Modell werden lognormalverteilte Zufallswerte erstellt, welche den angegebenen Mittelwert und das Maximum als 95. Perzentil besitzen, sofern dies angegeben wurde. Ansonsten wird von einer Standardabweichung von 50 % ausgegangen.

Tabelle 22: Mittelwerte und Maxima der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärrückständen [mg/kg]

	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max
Bioabfallkompost [*]	0,78	2,43	27,4	75	69,3	392	19,9	149	55,5	130	275	929
Gärrückstände flüssig [*]	0,41	0,9	11	29	98,9	220	5,7	17	4,92	13	314	650
Gärrückstände fest ^{**}	0,488		22,1		53,4		14,8		32,1		198,8	
Grünkompost [*]	0,53	0,79	21,5	30,9	41,6	63,4	18,4	35,2	59,9	74,2	225	326

Quellen:

^{*} DITTRICH UND KLOSE (2008)

^{**} KRATZ ET AL. (2005)

Nachstehend sind zum Vergleich die Grenzwerte der Schwermetalle nach der Bioabfallverordnung (BIOABFV, 2010) angegeben. Es wird deutlich, dass der Mittelwert der Schwermetallkonzentration von Bioabfällen der Tabelle 22 die Grenzwerte, die in Tabelle 23 angegeben sind, unterschreitet, jedoch das Maximum die Grenzwerte teilweise überschreitet.

Tabelle 23: Grenzwerte für Bioabfall gemäß Bioabfallverordnung [mg/kg]

Element	Maximal 30 t TS/ha	Maximal 20 t TS/ha
Cadmium	1,0	1,5
Chrom	70	100
Kupfer	70	100
Nickel	35	50
Blei	100	150
Zink	300	400

Quelle: BIOABFV §4(2) Satz 2

In der Bioabfallverordnung §4(3) wird gefordert, dass der Grenzwert im "gleitenden Durchschnitt der vier zuletzt [...] durchgeführten Untersuchungen" des Schwermetallgehaltes von je 2000 Tonnen Frischmasse nicht überschritten wird und "kein Analysenergebnis den Wert um mehr als 25 vom Hundert überschreitet" (BIOABFV, 2010). Die Überschreitung einzelner Schwermetallgehalte kann jedoch mit Ausnahme von Cadmium von "der zuständigen landwirtschaftlichen Fachbehörde" zugelassen werden, "wenn Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind". Da Abweichungen im Bioabfallkompost von den Grenzwerten nach der Bioabfallverordnungen durch die Bildung von Durchschnittswerten und Variabilitäten des Schwermetallgehaltes im Kompost möglich sind und auch ermittelt wurden, werden zunächst die Abweichungen vom Grenzwert in dieser Arbeit toleriert. In der Diskussion der Minderungsoptionen (vgl. Kapitel 0) wird die Auswirkung einer Einhaltung von reduzierten Schwermetallgrenzwerten des Bioabfalls quantifiziert.

11.7 Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Komposte und Gärrückstände

Der Schwermetalleintrag durch Komposte und Gärrückstände in die landwirtschaftlichen Böden berechnet sich aus der ausgebrachten Kompost- bzw. Gärrückstandsmenge und der darin enthaltenen Schwermetallkonzentration. Der flächenbezogene Eintrag wird durch folgende Formel bestimmt:

Formel 20: Berechnung des Schwermetalleintrags durch Komposte und Gärrückstände

$$e_{KR,KO,C,HM}^{KOMP} = \frac{KOMP_{KR,KO,C} * \pi_{KO,"TM"}^{KOMP} * \omega_{KO,HM}^{KOMP}}{\sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T}}$$

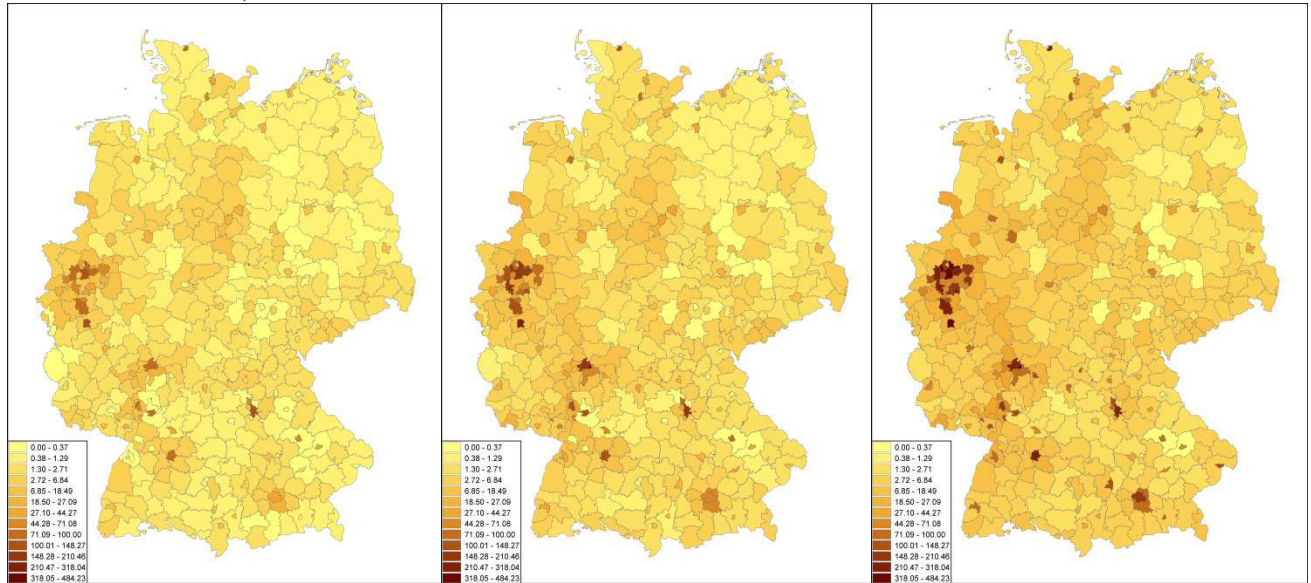
Diese Berechnung wird für jedes Paar von Zufallswerten der Ausbringungsmenge, Schwermetallgehalte und Flächengrößen vorgenommen.

11.8 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Komposte und Gärrückstände

In der nachfolgenden Abbildung sind die Bleieinträge, die durch Komposte und Gärrückstände verursacht werden, dargestellt. Es wird deutlich, dass innerhalb der Kreise teilweise erhebliche Unterschiede der Bleieinträge berechnet wurden. In kreisfreien Städten ist der Eintrag teilweise besonders erheblich höher als in den

umgebenden Landkreisen. Dies ist damit zu begründen, dass in dem Modell angenommen wird, dass die Bioabfallkomposte von der Bevölkerungshöhe abhängen und dass in kreisfreien Städten relativ zur landwirtschaftlich genutzten Fläche eine relativ hohe Einwohnerzahl vorliegt. Im Rahmen der Vorgaben der Bioabfallverordnung (BIOABFV, 2010) ist es möglich, dass die in dem jeweiligen Landkreis anfallende Bioabfallkompostmenge auch ausgebracht wird, sofern dies wirtschaftlich günstiger ist als ein Import von alternativen organischen Düngemitteln.

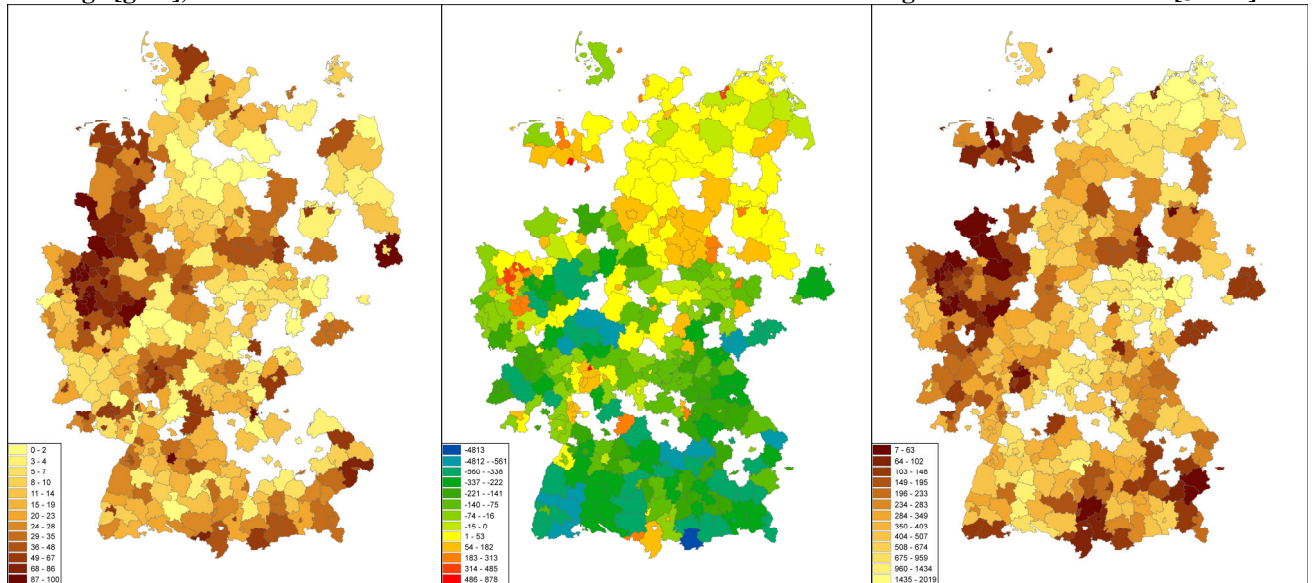
Abbildung 6: Pb-Eintrag durch Komposte und Gärrückstände [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

In der folgenden Abbildung (links) sind die relativen Anteile der landwirtschaftlichen Flächen dargestellt, auf denen einer der Schadstoffe in der Summe aller Einträge überschritten wird, sofern auf der jeweiligen Fläche überwiegend²³ Komposte und Gärrückstände zur Bereitstellung des organischen Kohlenstoffs verwendet werden. Die rechte Abbildung zeigt die gewichteten Mittel der verbleibenden Jahre bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte nach der BBodSchV (vgl. Kapitel 11) bei konstanten durchschnittlichen Nettoeinträgen auf den überwiegend mit Komposten und Gärrückständen gedüngten Flächen. Dabei werden nur diejenigen Flächen berücksichtigt, auf denen bislang keiner der Vorsorgewerte erreicht ist und positive Nettoeinträge vorliegen.

Abbildung 7: Überwiegend²³ mit Komposten gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Pb-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]



Quelle: Eigene Berechnung

11.9 Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration im Klärschlamm

Als Grundlage einer Berechnung der Häufigkeitsverteilung von Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm werden Mittelwerte und Maxima nach DITTRICH UND KLOSE (2008) verwendet.

Die Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm sind in Tabelle 24 angegeben.

Tabelle 24: Schwermetallkonzentration im Klärschlamm [mg/kg]

	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max
Klärschlammkompost	1,66	3,89	72	190	192	390	26,8	44	121	300	963	1700
Klärschlamm	1,57	3,63	41,9	52	161	234	21,5	42,6	97	285	842	1445

Quelle: DITTRICH UND KLOSE (2008)

RATTAN ET AL. (2005) haben in Langzeitexperimenten in Indien beobachtet, dass durch eine zehn Jahre anhaltende Düngung mit Klärschlamm eine signifikante Erhöhung der Zink-, Blei und Nickelkonzentration in den Böden erfolgte. ANTONIADIS UND ALLOWAY (2002, 2003) berichten, dass Böden durch eine Applizierung mit Klärschlamm, insbesondere wenn dieser eine hohe Konzentration der Schwermetalle aufweist, anfällig für eine Verlagerung derselben im Boden werden.

Der maximal tolerierte Schwermetallgehalt in Klärschlämmen für die Aufbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden liegt gemäß Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) §4 (12) bei:

²³ das betrifft in Abbildung 7 die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Komposte und Gärrückstände an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt. Berücksichtigt wurden aufgrund von potentiellen "Ausreißern" nur diejenigen Landkreise, in denen mindestens 10% der Durchläufe der Monte-Carlo-Simulation Flächen ergeben haben, die überwiegend mit Komposten und Gärrückständen gedüngt wurden.

Tabelle 25: Obergrenzen der tolerierten Schwermetallgehalte in Klärschlammen zur Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden gemäß Klärschlammverordnung [mg/kg]

Schwermetall	Leichte Böden mit pH 5-6	Sonstige Böden
Cadmium	5	10
Chrom	900	900
Kupfer	800	800
Nickel	200	200
Blei	900	900
Zink	2.000	2.500
Quecksilber	8	8

Quelle: Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) §4 (12)

Die Toleranzmengen liegen über den maximalen Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm nach DITTRICH UND KLOSE (2008).

Für die Berechnung von zufälligen Konzentrationen der Schwermetalle in Klärschlamm auf Grundlage der angegebenen mittleren und maximalen Schwermetallkonzentrationen wird eine lognormalverteilung angenommen, dessen Mittelwert dem angegebenen Mittelwert und dessen 95. Perzentil dem berichteten Maximum entspricht.

11.10 Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Klärschlamm

Der Schwermetalleintrag durch die Klärschlamm- und Klärschlammkompostausbringung berechnet sich in jedem Schritt der Monte-Carlo-Simulation nach folgender Formel:

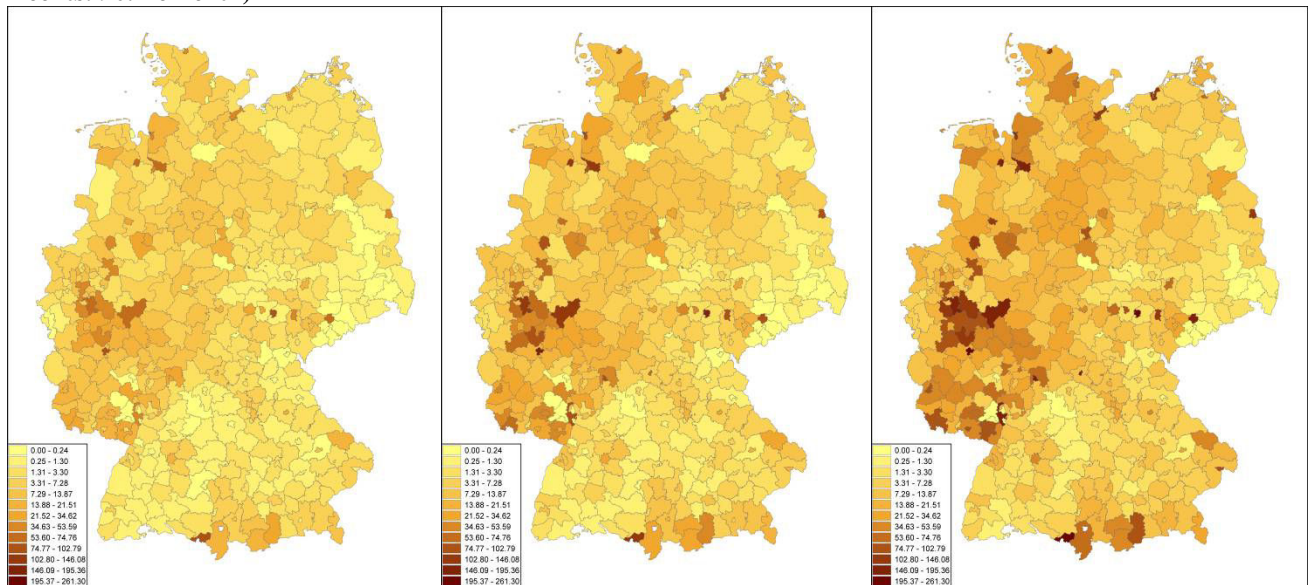
Formel 21: Flächenbezogener Schwermetalleintrag durch Klärschlammausbringung

$$e_{KR,KL,C,HM}^{KLAER} = \frac{KLAER_{KR,KL,C,T} * \pi_{KL, "TM"}^{KLAER} * \omega_{KL, HM}^{KLAER}}{\sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T}}$$

11.11 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Klärschlamm

Die folgende Abbildung zeigt die 10., 50. und 90. Perzentile der durch Klärschlamm verursachten mittleren Bleieinträge auf Ackerflächen. Diese sind teilweise in kreisfreien Städten höher als in den umgebenden Landkreisen. Dies ist damit zu begründen, dass in jenen kreisfreien Städten mehr Klärschlamm aus den Anlagen in Relation zur Ackerfläche abgegeben wird und zur Erhaltung der organischen Kohlenstoffmenge im Boden verwendet werden kann. Im Transportkostenminimierungsmodell ergibt sich teilweise im Rahmen der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 2010) die relativ hohe flächenbezogene Ausbringungsmenge von Klärschlamm in den betreffenden Landkreisen und daraus resultierend, ein hoher Schwermetalleintrag.

Abbildung 8: Pb-Eintrag durch Klärschlamm auf Ackerböden [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)

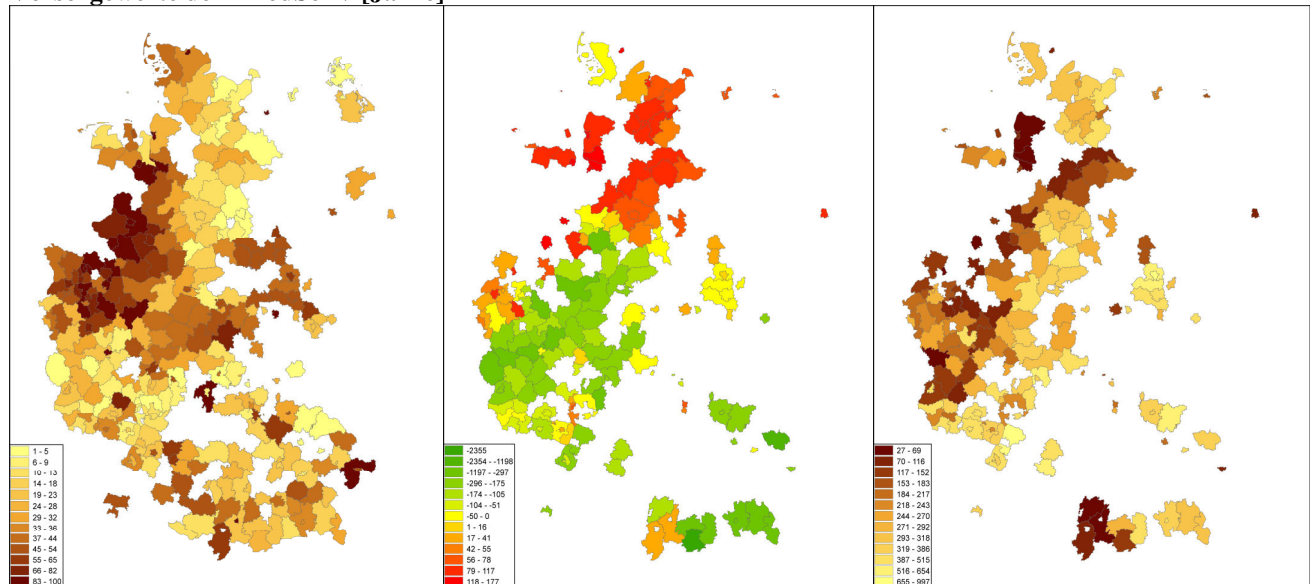


Quelle: Eigene Berechnung

In der folgenden Abbildung (links) sind die relativen Anteile der überwiegend²⁴ mit Klärschlamm gedüngten Flächen dargestellt, auf denen die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten der Schwermetalle über alle Wirkungspfade nach der BBodSchV (vgl. Kapitel 11) überschritten würden. Dabei werden nur die Flächen berücksichtigt, die in den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells überwiegend mit Klärschlamm gedüngt werden. In der rechten Abbildung wird die Anzahl der Jahre angegeben, die bei einer überwiegenden Düngung mit Klärschlamm durchschnittlich bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte gemäß der BBODSCHV (2009), Anhang 2 Absatz 4.1 verbleiben. Dabei werden nur die Flächen berücksichtigt, auf denen positive Nettoeinträge vorliegen und keiner der Vorsorgewerte erreicht ist. Aufgrund der geringen Anzahl der aus dem Modell ergebenden Flächen, die überwiegend mit Klärschlamm gedüngt werden, sind zahlreiche Landkreise für die Auswertung nicht berücksichtigt worden.

²⁴ das betrifft Abbildung 9 die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Klärschlamm und Klärschlammkompost an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt. Berücksichtigt wurden aufgrund von potentiellen "Ausreißern" nur diejenigen Landkreise, in denen mindestens 10% der Durchläufe der Monte-Carlo-Simulation Flächen ergeben haben, die überwiegend mit Klärschlamm gedüngt wurden.

Abbildung 9: Überwiegend²⁴ mit Klärschlamm und Klärschlammkompost gedüngte Ackerböden. Links: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%], Mitte: Mediane der Netto-Pb-Einträge [g/ha], Rechts: Verbleibende Zeit bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV [Jahre]



Quelle: Eigene Berechnung

11.12 Methodik zur Ermittlung der Schwermetallkonzentration in Mineraldüngemitteln

In Tabelle 26 sind die mittleren und maximalen Schwermetallgehalte von Einnährstoffdüngern (Stickstoff, Phosphor und Kalium), Mehrnährstoffdüngern und Kalkdüngern dargestellt. Sofern ein Mittelwert und ein Maximum angegeben sind, werden die Zufallswerte von Schwermetallkonzentrationen unter der Annahme einer Lognormalverteilung erstellt mit dem angegebenen Mittelwert und einem 95%-Perzentil, welches dem angegebenen Maximum entspricht.

Tabelle 26: Mittelwerte und Maxima der Schwermetallgehalte mineralischer Düngemittel [mg/kg]

	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max	Mit	Max
Kalkammonsalpeter³ Standardabweichung	0,19 +- 0,133		2,99 +- 1,28		4,77 +- 5,83		2,16 +- 1,50		17,6 +- 15,5		31,0 +- 22,4	
Harnstoff¹	0,01	0,05	0,61	1,42	1,56	18,54	0,45	20,36	0,16	3,92	3,1	8,09
andere N-Dünger²	0,1		6,55		5,15		10,4		1		4	
Superphosphat¹	28,3	33,3	229	478	15,3	34,2	20,9	48,4	14,7	57,9	354	527
Andere P-Dünger²	7,51		146,67		15,37		15,37		1,83		225,33	
Kaliumchlorid¹	0,01	0,02	0,58	1,95	0,74	2,1	0,62	2,68	0,29	1,56	2,26	11,8
Kaliumsulfat¹	0,02	0,03	2,06	3,43	1,88	2,45	0,37	0,5	0,12	0,17	10	14,1
Kalirohsalz¹	0,01		0,74		0		0,22		0,01		0,01	
NP-Dünger¹	9,24	18,75	144	343	23,8	407	19,5	51,9	3,69	61,2	191	894
PK-Dünger¹	11,0	13,0	77,6	222	20,1	64,4	17,9	25,7	0,38	1,04	202	287
NPK-Dünger¹	2,15	10,4	43,4	200	26,7	321	23,1	198	2,18	20,7	82,8	296
Kohlensaurer Kalk¹	0,52	54,2	9,84	343	5,42	407	3,62	51,9	38	61,2	91,9	894
Hüttenkalk¹	0,01	0,01	51,8	74,9	0,09	0,35	0,01	0,01	0,01	0,01	60,7	62,9
Andere Ca-Dünger²	0,33		17		19,5		12,5		23,75		35	

QUELLEN: ¹DITTRICH UND KLOSE (2008) ²HACKENBERG UND WEGENER (1999)²⁵ ³KÜHNEN UND GOLDBACH (2004)

11.13 Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Mineraldünger

Der Schwermetalleintrag wird anhand der berechneten Ausbringungsmengen der jeweiligen Mineraldünger und der entsprechenden, darin enthaltenen Schwermetallkonzentrationen nach folgender Formel berechnet:

Formel 22: Berechnung des durch Mineraldünger erfolgenden Schwermetalleintrags

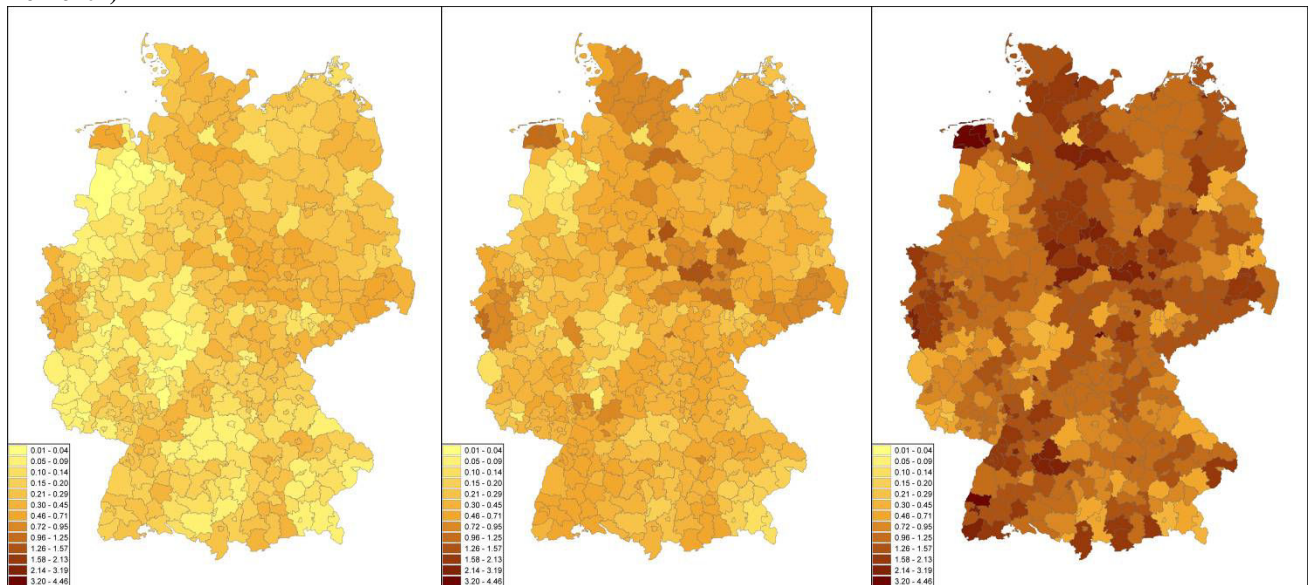
$$e_{KR,M,C, HM}^{MINE} = \frac{MINE_{KR,M,C} * \omega_{M, HM}^{MINE}}{\sum_{H,T} CROP_{KR,H,C,T}}$$

11.14 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Mineraldünger

In den folgenden Abbildungen sind die Cd-Einträge dargestellt, die durch mineralische Düngemittel verursacht werden. Sie hängen von dem jeweiligen Bedarf der Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie von dem berechneten Kalkungsbedarf ab sowie von dem Anteil der Nährstoffe, die durch organische Dünger zugeführt werden.

²⁵ Zitiert von WILCKE UND DÖHLER (1995)

Abbildung 10: Cd-Eintrag durch Mineraldünger [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

11.15 Methodik zur Berechnung des Schwermetalleintrags in landwirtschaftliche Böden durch Pestizide

Die Schwermetalleinträge durch Pestizide erfolgen entweder durch Wirkstoffpräparate, die Schwermetalle als erwünschte Bestandteile enthalten oder durch Verunreinigungen in den Präparaten.

Einige Pflanzenschutzmittel enthalten Schwermetalle, die als Wirkstoffe dienen. Insbesondere gilt dies für Kupfer und Zink. PERKOW UND PLOSS (1994)²⁶ haben eine Aufstellung über Schwermetallgehalte in einigen Wirkstoffen gemacht und die Anzahl der Pflanzenschutzmittel, in welchen diese enthalten sind, angegeben (vgl. Tabelle 27).

²⁶ zitiert von FREIMUTH (2006)

Tabelle 27: Gehalte von Kupfer und Zink in Pflanzenschutzmitteln

Wirkstoff	Gehalte [%]		Anzahl Pflanzen- schutzmittel
	Cu	Zn	
Kupfer	100		6
Kupfer (als Oxid)	89		
Kupfer (als Hydroxyd)	64		8
Kupfer (als Hydroxid-Calciumchlorid)			2
Kupfer (als Kalkpräparat)			5
Kupfer (als Octanoat)			1
Kupfer (als Oxychlorid)	15-60		33
Kupfersulfat	25		4
Kupfer (als Salzmischung)			4
Kupfernaphthenat	8		
Mancozeb		2.5	35
Metiram		18	1
Propineb		22	4
Zineb		24	10
Ziram		21	2

Quelle: PERKOW UND PLOSS (1994), zitiert von FREIMUTH (2006)

Die Applizierungsmengen von Metiram und Mancozeb sind für Deutschland in EUROSTAT (2007) kulturart-spezifisch angegeben. Allerdings werden hier jeweils nur die „top-5“ der am häufigsten applizierten Substanzen für jede Kulturart angegeben. Für Kartoffeln und Wein sind folgende Applizierungsmengen der Wirkstoffe in Deutschland angegeben:

Tabelle 28: Applizierungsmengen der zinkhaltigen Pestizide in Deutschland [t aktiver Substanz]

	Wirkstoff	1999	2000	2001	2002	2003
Kartoffeln	Mancozeb	884	761	600	692	704
	Metiram	123	97	88	79	149
Wein	Metiram	289	253	230	205	388

Quelle: EUROSTAT (2007)

Die Kupferausbringungsmengen werden in dieser Statistik für Deutschland leider nicht angegeben. Diese sind jedoch kulturartenspezifisch auf europäischer Ebene verfügbar (vgl. Tabelle 29).

Tabelle 29: Kulturartenspezifische Kupferausbringungsmengen in der Europäischen Union [t aktiver Substanz]

	1999	2000	2001	2002	2003
Getreide	1	7	22	7	7
Mais	-	0	-	-	-
Ölsaaten	78	2	1	5	0
Kartoffeln	255	136	127	128	124
Zuckerrübe	16	14	11	7	0
Trauben+Wein	6842	2326	1883	2223	1984
Obstbäume	1455	476	765	786	835
Gemüse	698	333	279	371	391

Quelle: EUROSTAT (2007)

Die jeweiligen Flächengrößen der Kulturarten werden in der Statistik ebenfalls angegeben, so dass die durchschnittliche Ausbringungsmenge pro ha ermittelt werden kann. Diese wird als Maßstab für die Verteilung der kupferhaltigen Präparate auf die Kulturarten in Deutschland herangezogen. Die durchschnittliche Kupfer-einsatzmenge im Zeitraum 1997 bis 2001 wird von NOLTING (2003)²⁷ mit 295 t in Deutschland angegeben.

²⁷ zitiert von HILLENBRAND ET AL. (2005)

Die flächenbezogene Ausbringungsmenge auf europäischer Ebene kann unter Berücksichtigung der Anbauflächen in Deutschland also auf diese Einsatzmenge bezogen werden. Daraus ergibt sich eine kulturartenspezifische Kupfereinsatzmenge für Deutschland. Der Einsatz der kupferhaltigen Präparate auf ökologisch bewirtschafteten Flächen wird im Kapitel 13.4.4 diskutiert.

Neben den Wirkstoffen Cu und Zn gelangen mit den Pflanzenschutzmitteln auch Verunreinigungen in die landwirtschaftlichen Nutzflächen. KLOKE (1985)²⁸ hat eine Aufstellung von Spannweiten von Schwermetallgehalten in Form von Verunreinigungen in den Präparaten gemacht (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Konzentration der Elemente als Verunreinigung in Pflanzenschutzmitteln [g/kg]

Element	Konzentration
Cd	0 - 0,4
Cu	0.005 - 0.25
Pb	0 - 1
Zn	0.002 - 0.3

Quelle: KLOKE (1985)²⁸

Die Verunreinigungsmengen werden im Modell auf die Summe der applizierten Pflanzenschutzmittel bezogen, welche in EUROSTAT (2007) kulturartenspezifisch für Deutschland angegeben sind:

Tabelle 31: In Deutschland ausgebrachte Pflanzenschutzmittel [t aktiver Substanz]

	1999	2000	2001	2002	2003
Getreide	11.304	15.795	15.710	15.336	12.366
Mais	1.969	1.444	1.462	1.315	1.529
Ölsaaten	1.567	1.724	1.875	2.348	1.619
Kartoffeln	1.923	1.787	1.567	1.762	1.777
Zuckerrüben	1.481	1.647	1.407	1.654	1.037
Trauben+Wein	2.816	2.087	2.308	2.331	3.052
Obstbäume	634	705	965	906	982
Gemüse	232	254	323	405	469

Quelle: EUROSTAT (2007)

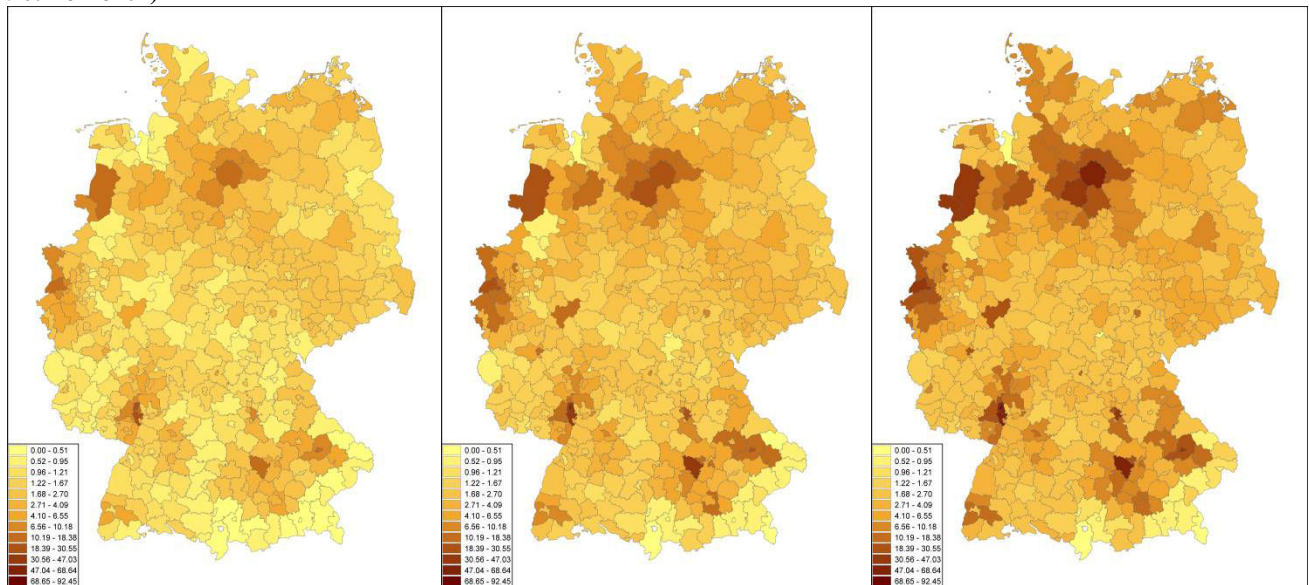
Die Anbauflächen für die Kulturarten werden in EUROSTAT (2007) ebenfalls angegeben, so dass der Quotient aus applizierter Pestizidmenge und der Flächengröße verwendet wird, um die entsprechenden Kulturen zuzuordnen und den flächenbezogenen Einsatz zu ermitteln.

11.16 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Pestizide

Das 10., 50. und 90. Perzentil des mittleren berechneten Kupfereintrags durch Pestizide auf Ackerflächen ist in der unteren Abbildung dargestellt. Dabei sind Sonderkulturen nicht berücksichtigt. Diese würden beispielsweise in Weinanbaugebieten zu sehr hohen durchschnittlichen Kupfereinträgen führen, so dass hier aufgrund der Vergleichbarkeit der Einträge auf eine Berücksichtigung der Sonderkulturen verzichtet wurde.

²⁸ Zitiert von HARTMANN ET AL. (2000)

Abbildung 11: Cu-Eintrag durch Pestizide auf Ackerböden [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

11.17 Methodik zur Berechnung der atmosphärischen Deposition der Schwermetalle

Schwermetalle werden durch nasse und trockene Depositionen aus der Atmosphäre eingetragen. In dieser liegen sie überwiegend in Verbindung mit Staubpartikeln und Aerosolen vor (WEIGEL UND HELAL, 2001). Es gibt sowohl natürliche als auch anthropogen bedingte Emissionen von Schwermetallen in die Atmosphäre. Zu den anthropogen verursachten Emissionen gehören unter anderem industrielle Prozesse sowie die Abgase von Kraftfahrzeugen²⁹.

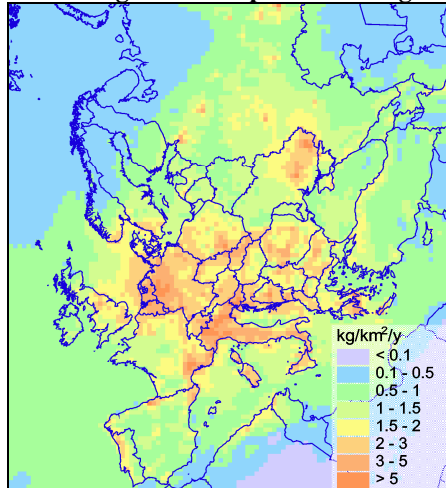
MSC-East hat mit Hilfe eines Euler-Modells, das natürliche und anthropogen bedingte Emissionen berücksichtigt, nasse und trockene Depositionsraten von Cd, Cr, Ni und Pb ermittelt (vgl. Abbildung 12)³⁰.

Die Ergebnisse beziehen sich auf das Jahr 2000.

²⁹ Vgl. HLAWICZKA UND FUDALA (2004), HETTELINGH ET AL. (2006)

³⁰ ESPREME (2008)

Abbildung 12: Pb-Depositionsmengen in Europa für das Jahr 2000

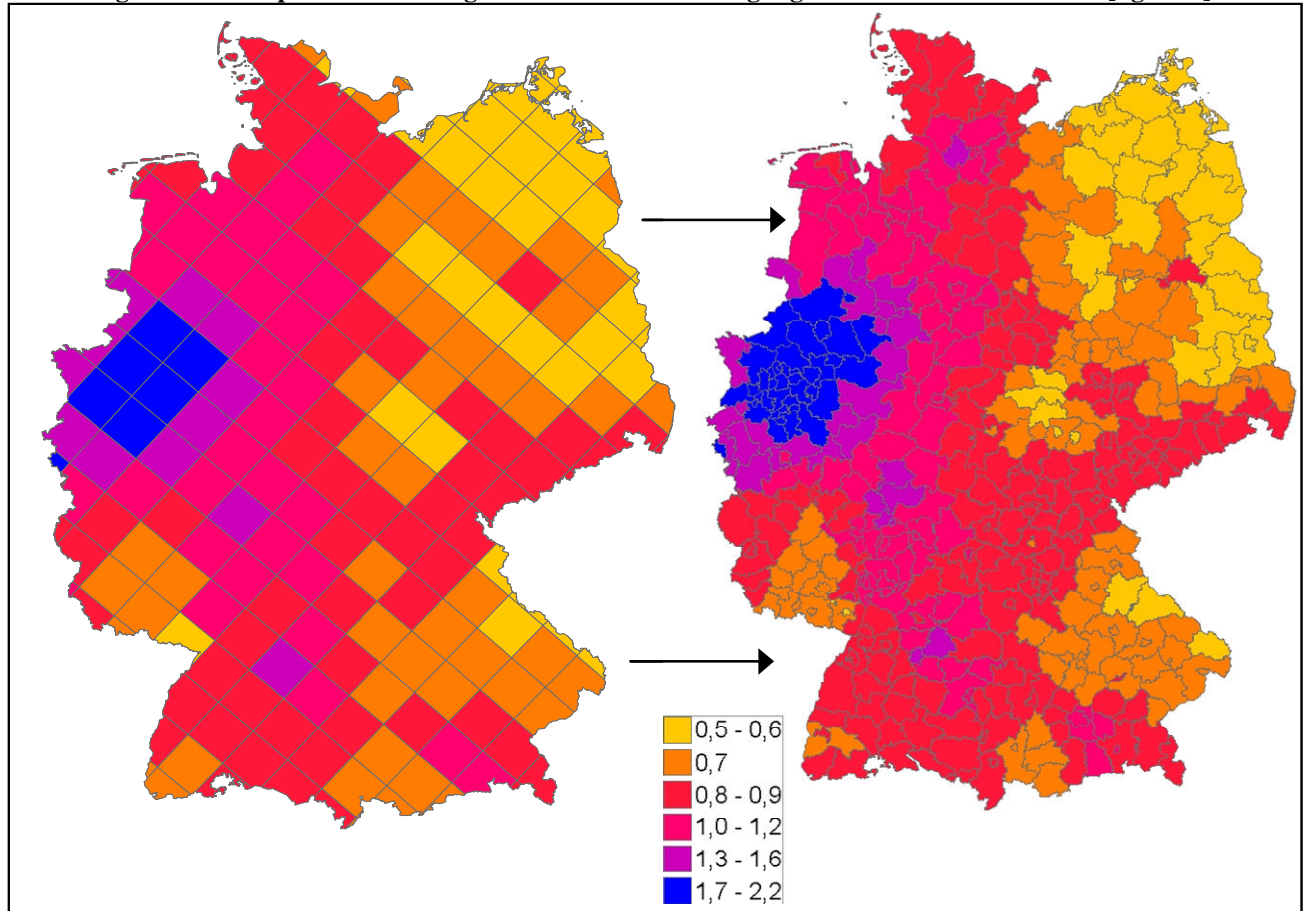


Quelle: ESPREME (2008)

Die Schwermetalldepositionen sind von MSC-East für einzelne Kompartimente wie Wälder, Städte, landwirtschaftliche Flächen und Grünland spezifiziert worden.

Die entsprechenden Depositionsmengen sind den Zellen des EMEP-Shapes (EMEP, 2008) mit einer Auflösung von 50 x 50 km² zugeordnet. Die von MSC-East berechneten Depositionsraten werden den EMEP-Flächen zugeordnet. Auf Grundlage dieser Zuordnung können in jedem Kreis die gewichteten Depositionsraten der Schwermetalle ermittelt werden. (vgl. Abbildung 13).

Abbildung 13: Nickeldepositionen auf Agrarflächen und Übertragung der Daten auf Kreisebene [kg/m²/a]



Quelle: Eigene Bearbeitung, GFK (2007), EMEP (2008) und ESPREME (2008)

In dem MSC-East Bericht des Projektes ESPREME werden die Unsicherheiten der Konzentrationen in der Luft mit durchschnittlich 43%, in der nassen Deposition mit 40% und in der Gesamtd deposition mit 33% angegeben (TRAVNIKOV UND ILYIN, 2007; vgl. Tabelle 32).

Tabelle 32: Unsicherheiten der Schwermetallkonzentration und -Deposition im Modell von MSC-East

Output parameter	Uncertainty, %
	As, Cd, Cr, Ni, Pb
Air concentration	43 (22-64)
Concentration in precipitation	40 (20-57)
Total deposition	33 (19-49)

Quelle: TRAVNIKOV UND ILYIN (2007)

Mittels dieser Unsicherheiten und der mittleren Depositionsmengen je Kreis werden zufällige, normalverteilte Gesamtdositionsmengen von Schwermetallen erstellt. Eine Differenzierung der Unsicherheit für nasse und trockene Depositionen ist nicht möglich, da keine Unsicherheit für die trockene Depositionsmenge angegeben ist. Es wird daher generell von der mittleren Unsicherheit von 33% der Gesamtdositionsmenge ausgegangen.

In den Berechnungen von MSC-East wurden Kupfer und Zink nicht berücksichtigt. Da diese Schwermetalle jedoch auch durch trockene und nasse Depositionen abgelagert werden, sind sie für eine Schwermetallbilanz nicht zu vernachlässigen.

In den Messstationen des Umweltbundesamtes werden Niederschläge auf Schwermetallgehalte untersucht.

Daraus wurden folgende Gesamtdepositionen für das Jahr 2000 ermittelt:

Tabelle 33: Jährliche Schwermetalleinträge durch nasse Depositionen [g/ha]

Station	Blei	Kupfer	Zink
Ansbach	6.6	9.2	66
Bassum	5.4	12.2	84.1
Bornhöved		7.7	85.6
Brotjacklriegel	14.5	17.6	
Deuselbach	13.8	9.5	123.3
Doberlug	5.8	5.2	119.3
Eining	6.4	5.4	73.4
Hilchenbach	30.3	11.2	237.9
Kehl		7.6	124.5
Lehnmühle	17.1	11.8	104.8
Leinefelde	11.6	8.3	193.2
Lückendorf	19.7	10.4	112.6
Melpitz	4.4	3.7	43.8
Neuglobsow	12		
Regnitzlosau	7.7	5.2	
Schauinsland	16.9	13.4	127.5
Schmücke	24.4	9.7	165.9
Solling	18.9	20.1	220
Teterow	7.4	8.4	78.1
Ueckermünde	11.1	9.9	93.2
Waldhof	8.4	5.1	75.5
Westerland	8.5		95.6
Wiesenburg	9.1	4.3	94.3
Wurmberg		23.4	157.7
Zingst	12.3	17.2	94.1

Quelle: UBA (2001)

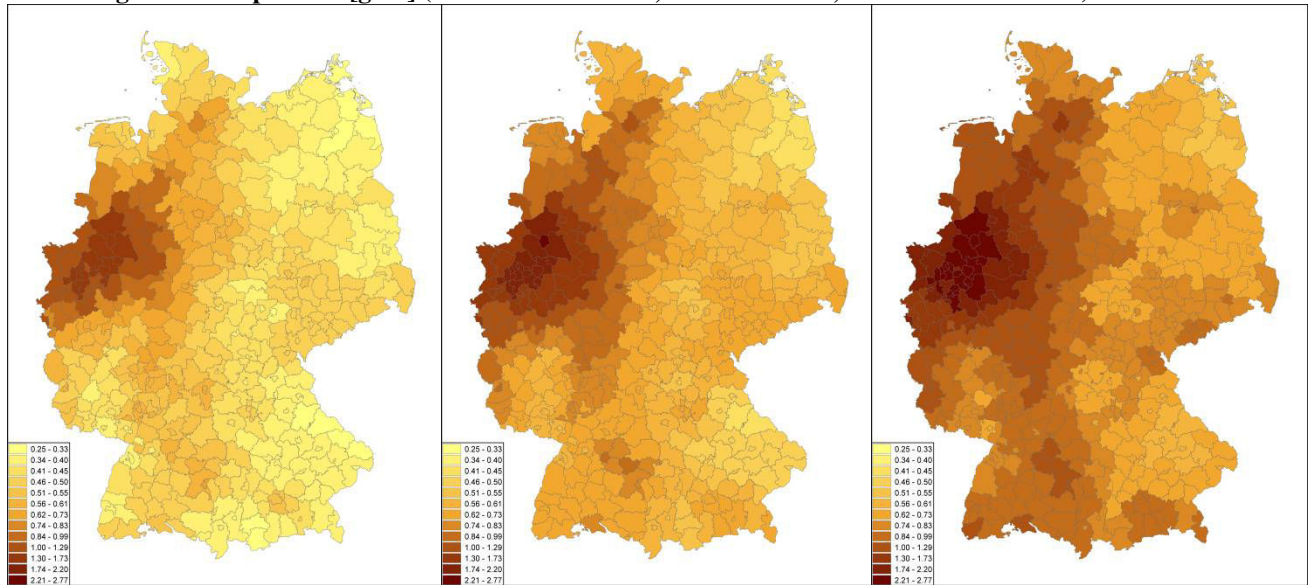
Um die Zusammenhänge von Kupfer- bzw. Zinkkonzentration und der Bleikonzentration in den atmosphärischen Depositionen mit einer Häufigkeitsverteilung derselben ermitteln zu können, werden für jede Messstation die Verhältnisse aus Cu- bzw. Zn-Deposition und Blei-Deposition gebildet. In GAMS (2011) werden daraufhin der Mittelwert und die Standardabweichung der errechneten Verhältnisse ermittelt.

Jeder der bereits erzeugten Monte-Carlo-Werte der Blei-Depositionen wird anschließend mit dem entsprechenden Cu- bzw. Zn-Verhältnis in Relation zu den Pb-Depositionen multipliziert.

11.18 Ergebnisse der Berechnungen des Schwermetalleintrags durch Deposition

In der folgenden Abbildung sind die Cadmium-Depositionsmengen mit der Einheit mg/ha angegeben. Diese gehen aus den ESPREME (2008)-Daten hervor und sind mit der relativen Größe der Ackerflächen und Grünlandflächen gewichtet worden.

Abbildung 14: Cd-Deposition [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung, basierend auf ESPREME (2008)

11.19 Ergebnisse der Berechnung der Summe von Schwermetalleinträgen

Die Einträge von Schwermetallen durch Wirtschaftsdünger, Komposte, Gärrückstände und Klärschlamme, Mineraldünger, Pestiziden und atmosphärischer Depositionen ergeben die Gesamteinträge in landwirtschaftliche Flächen. Die daraus die relativen Eintragsmengen der Schwermetalle durch Düngemittel, Pestizide und die atmosphärische Deposition sowie die Gesamteinträge und sind in der folgenden Tabelle angegeben.

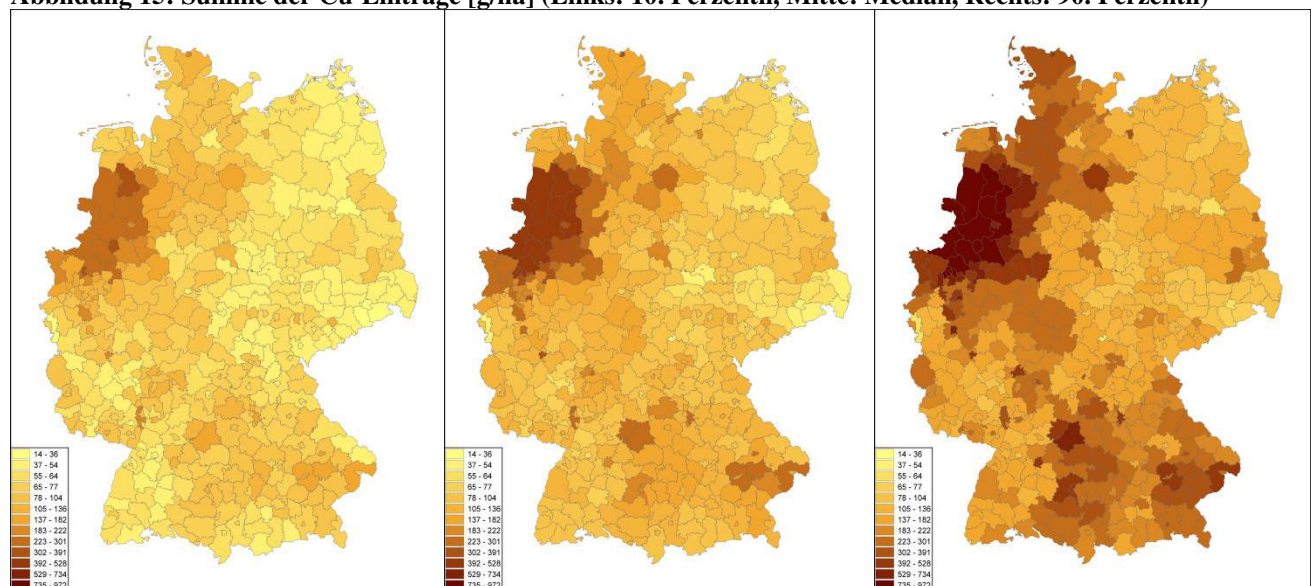
Tabelle 34: Mittelwerte der Summen der Schwermetalleinträge in Deutschland

Schwermetall	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Ackerland und Grünland						
Wirtschaftsdünger [%]	21,73	43,32	75,59	44,91	18,49	61,17
Kompost und Gärrückstände [%]	02,77	06,22	03,57	06,32	09,35	03,03
Klärschlamm [%]	03,56	09,57	05,44	04,99	11,91	05,83
Mineraldünger [%]	30,70	32,07	02,87	15,37	19,42	04,06
Pestizide [%]	05,83		01,89		00,38	00,51
Atmosphärische Deposition [%]	35,41	08,82	10,64	28,41	40,44	25,41
Gesamt [g/ha]	2,287	35,14	146,83	26,04	43,05	684,65
Ackerland						
Wirtschaftsdünger [%]	21,06	44,93	72,43	43,97	17,43	58,96
Kompost und Gärrückstände [%]	03,77	07,75	04,70	08,25	11,72	04,05
Klärschlamm [%]	05,19	12,85	07,67	07,03	16,11	08,36
Mineraldünger [%]	27,15	26,71	02,64	14,36	18,11	03,83
Pestizide [%]	08,51		02,66		00,52	00,73
Atmosphärische Deposition [%]	34,34	07,76	09,90	26,40	36,12	24,06
Gesamt [g/ha]	2,362	37,28	155,82	27,61	45,72	709,11

Quelle: Eigene Berechnung

Die folgenden Abbildungen zeigen die durchschnittlichen Summen der Kupfereinträge auf den landwirtschaftlich genutzten Böden (vgl. Abbildung 15). Es wird deutlich, dass in Regionen mit einem hohen Eintrag von Kupfer durch Wirtschaftsdünger die höchsten Gesamteinträge ermittelt wurden.

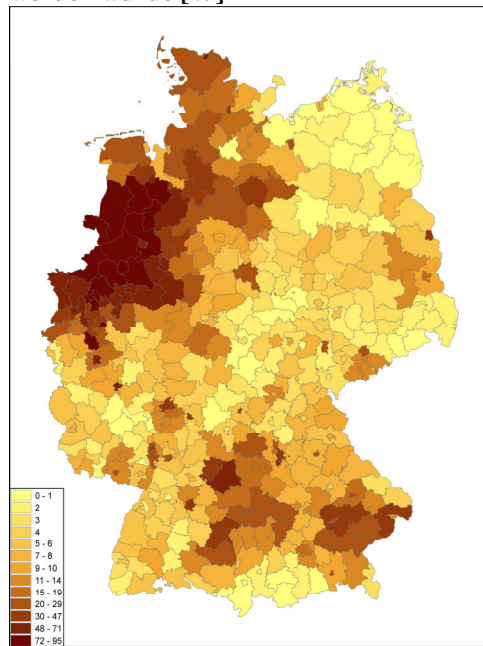
Abbildung 15: Summe der Cu-Einträge [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

In den Kapiteln 11.5, 11.8 und 11.11 werden die Anteile der Ackerflächen angegeben, auf denen die Summe der Einträge bei einer ausschließlichen Zufuhr von Wirtschaftsdüngern, Komposten bzw. Klärschlämmen zur Aufrechterhaltung der organischen Substanz einer der zulässigen zusätzlichen jährlichen Schwermetallfrachten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung (vgl. Kapitel 11) überschritten wird. In der folgenden Abbildung sind die Anteile aller Ackerflächen angegeben, auf denen die Summe der Einträge die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten gemäß der BBODSCHV (2009) überschreiten.

Abbildung 16: Relative Fläche, auf der die zulässige zusätzliche Schwermetallfracht der BBodSchV überschritten werden würde [%]



Quelle: Eigene Berechnung

12 Schwermetallausträge aus landwirtschaftlichen Böden

12.1 Berechnung der Schwermetallaufnahme in landwirtschaftliche Nutzpflanzen

Schwermetalle, die aufgrund der atmosphärischen Deposition auf den Blättern von Pflanzen abgelagert werden, können über diese aufgenommen werden oder über die Wurzeln in das Pflanzeninnere gelangen (WEIGEL UND HELAL, 2001).

Als Faktoren, welche die Aufnahme der Schwermetalle beeinflussen, werden unter anderem folgende genannt:

Tabelle 35: Einflussfaktoren der Schwermetallaufnahme in Pflanzen

Einflussbereiche	Einflussfaktoren
Boden	Schwermetallkonzentration
	Bodentyp
	Tongehalt
	Gehalt an organischer Substanz
	pH-Wert
	Kationenaustauschkapazität
	Wechselwirkungen mit anderen Substanzen
Atmosphäre	Atmosphärische Depositionsmenge
	Temperatur
	Luftfeuchte
	Lichtmenge
	Regenmenge
Pflanze	Pflanzenart und -sorte
	Pflanzenalter
	Pflanzenhöhe

Quellen: OLIVA UND VALDÉS (2004), MOUSTAKAS ET AL. (2001), CONTI ET AL. (2000), JANSSON UND ÖBORN (2000), ZURAYK ET AL. (2001), LEHOCZKY UND KISS (2002), ABREU ET AL. (2002), ADILOGLU (2002, 2003)

Die Schwermetalle im Boden sind nur zum Teil pflanzenverfügbar. Daher ist nicht nur die Schwermetallmenge im Boden, sondern auch der gelöste bzw. pflanzenverfügbare Anteil bedeutend für die Aufnahme in die Pflanzen (CALACE ET AL., 2002). Gemäß der Ausführung in Kapitel 12.3 hängt der gelöste Schwermetallanteil im Boden unter anderem von dem Tongehalt, dem Gehalt an organischer Substanz und der Bodenreaktion ab. Dies hat auch Auswirkungen auf die Aufnahme der Schwermetalle in die Pflanzen.

Eine hohe Cadmium- bzw. Nickelkonzentration im Boden kann das Pflanzenwachstum reduzieren³¹. Zudem wurden Wechselwirkungen zwischen den Schwermetallen festgestellt. So beeinflusst beispielsweise die Zinkkonzentration im Boden die Cadmiumaufnahme von Pflanzen und die Verlagerung von der Wurzel in den Spross³².

Eine kombinierte Gabe von Kupfer und Zink verursacht eine Reduktion der Cadmiumkonzentration im Korn von Weizen und in den oberirdischen Pflanzenteilen von Spinat (PUSCHENREITER UND HORAK, 2003).

RAHMAN ET AL. (2005) beobachteten durch eine erhöhte Nickelgabe bei Gerste einen Anstieg des Gehaltes von Kupfer und Eisen in der Wurzelmasse, während dieser in den Sprossen verringert wurde.

³¹ RAMACHANDRAN UND D'SOUZA (2002); BACCOUCH ET AL. (2001)

³² vgl. JANSSON UND ÖBORN (2000), LEHOCZKY UND KISS (2002), ADILOGLU (2002), SHARMA (2006), WU UND ZHANG (2002), WU ET AL. (2003), ZHANG UND SONG (2006), ZHAO ET AL. (2005)

Interaktionen zwischen dem Phosphor- und dem Zinkgehalt im Boden auf die Zinkkonzentration in Weizen wurden von IMTIAZ ET AL. (2006) festgestellt. Der Zinkgehalt im Boden hat außerdem einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum und den Gehalt weiterer Elemente in den Pflanzen³³.

12.1.1 Pflanzenspezifische Einflussfaktoren auf die Schwermetallaufnahmemenge

Ergebnisse von BINGHAM ET AL. (1975), BRADFORD ET AL. (1975), PAGE ET AL. (1972) und KUBOI ET AL. (1986)³⁴ zeigen, dass die Aufnahmerate von Cadmium zwischen Pflanzenarten deutlich unterschiedlich sind. Verschiedene Aufnahmeraten wurden auch innerhalb einer Art gefunden, beispielsweise bei Mais, Weizen und Sonnenblumen (ZHANG ET AL., 2002). Pflanzen, welche die Schwermetalle bereits bei geringen Bodenkonzentrationen aktiv akkumulieren und in die oberirdischen Pflanzenteile befördern, werden als Akkumulatorpflanzen bzw. Hyperakkumulatoren bezeichnet, während Exkluderpflanzen relativ wenig Schwermetalle aufnehmen und in die oberen Regionen befördern (BAKER 1981)³⁵. Doch auch zwischen den Schwermetallen bestehen Unterschiede in der Verlagerung der Elemente von der Wurzel in die oberirdischen Organe (vgl. RIESEN UND FELLER, 2005). Hyperakkumulatoren können zur Remediation von schwermetallbelasteten Böden eingesetzt werden (vgl. BADER ET AL., 1999; ITANNA UND COULMAN, 2003).

Zink ist essentiell für Pflanzen, jedoch können durch eine zu hohe Konzentration Überschusssymptome wie Chlorosen auftreten, die von einem geringeren Pflanzenwachstum begleitet sein können (COOLONG UND RANDLE, 2003). Cadmium kann bei hohen Aufnahmeraten zu Ertragseinbußen führen (SATYAKALA, 1997)³⁶, während Kupfer die Absorptionsrate ultravioletten Lichtes beeinflusst und dadurch zu oxidativen Schäden führen kann³⁷. Bei Raps führt sowohl ein Mangel an Kupfer als auch ein Überschuss zu Schäden (KHURANA ET AL., 2006).

Blei wird nur zu einem geringen Teil über die Wurzeln in Pflanzen aufgenommen und auch der Transport von der Wurzel über den Stängel in die oberirdischen Organe ist beschränkt³⁸. Die geringe Aufnahmerate des Schwermetalls ist unter anderem damit zu begründen, dass es sehr stabile Bindungen im Boden und der extrazellulären Oberfläche der Wurzeln eingeht (MOOLENAAR, 1998). Bei Blattgemüse wird Cd in den Blättern eingelagert, während Getreide die höchste Konzentration des Schwermetalls in den Wurzeln aufweist (CUTLER UND RAINS, 1974)³⁹.

³³ Vgl. ADILOGLU (2002, 2003), ASTOLFI ET AL. (2003), CUI UND WANG (2005), KENBAEV UND SADE (2002)

³⁴ Zitiert von ZHANG ET AL. 2002

³⁵ zitiert von WEIGEL UND HELAL (2001)

³⁶ Zitiert von ZHANG ET AL. (2002)

³⁷ Vgl. CALDWELL (2001), GARCÍA ET AL. (1999)

³⁸ Vgl. ANGELOVA ET AL. (2004), SZABÓ UND FODOR (2006)

³⁹ Zitiert von JANSSON UND ÖBORN (2000)

12.1.2 Methodik zur Berechnung der Schwermetallentzüge mit der Erntemasse

Um die Schwermetallkonzentrationen der unterschiedlichen Pflanzenarten anhand der bedeutenden Bodenparameter, atmosphärischen und pflanzenspezifischen Faktoren bestimmen zu können, wären aufwendige multiple Regressionen nötig. Es gibt multiple Regressionen, welche mehrere Bodenparameter berücksichtigen wie beispielsweise eine von PODLESÁKOVÁ ET AL. (2001) erstellte, die für Triticale sowohl den Gesamtgehalt als auch den extrahierbaren Gehalt der Schwermetalle im Boden beachtet. Doch mangelt es an einheitlich erstellten, sowohl die Boden- als auch die Pflanzen- und die atmosphärischen Einflussfaktoren integrierenden Regressionen für die bedeutenden Kulturpflanzenarten.

Daher wurde hier die Berechnung der Schwermetallentzüge durch die Pflanzen vorgenommen, indem die Schwermetallgehalte der Pflanzenarten mit der Erntemasse multipliziert werden.

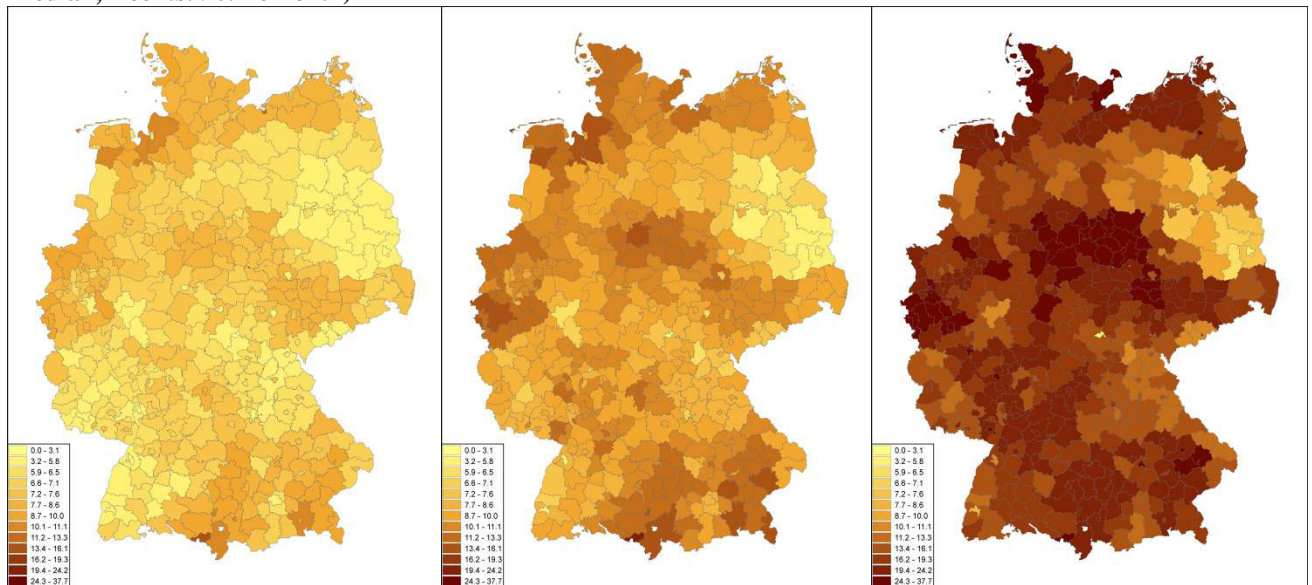
Für die Berechnung der Entzüge der Schwermetalle wird auf die Erträge (vgl. Kapitel 8.1) sowie die relativen Anteile der Nebenernteprodukte nach WENDLAND ET AL. (2011) und auf die 50. und 90. Perzentile der Schwermetallkonzentration in den Pflanzen nach KNAPPE ET AL. (2008) zurückgegriffen.

Die Summe der Austräge je Kreis wird überwiegend durch die Anbauflächen der unterschiedlichen Pflanzenarten beeinflusst. Diejenigen Pflanzen, die einen größeren Schwermetallgehalt in der Erntemasse enthalten und einen hohen Ertrag aufweisen, verursachen einen höheren Austrag als die Pflanzen, die weniger Schwermetalle anreichern oder bei denen der Ertrag geringer ist.

12.2 Ergebnisse der Berechnungen der Schwermetallentzüge mit der Erntemasse

Die folgenden Abbildungen zeigen die 10., 50. und 90. Perzentile der flächenbezogenen Chromentzüge durch die Erntemasse der Ackerkulturen. Die Entzüge sind hier nicht spezifisch für die angebauten Pflanzen angegeben, sondern als Durchschnittswerte der Ackerflächen. Daher resultieren die Unterschiede der Entzüge zwischen den Kreisen aus den verschiedenen relativen Anteilen der angebauten Pflanzenarten.

Abbildung 17: Entzüge von Chrom mit der Erntemasse auf Ackerflächen [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

12.3 Methodik zur Berechnung der mit dem Sickerwasser verlagerten Schwermetallmenge

Ein Teil der Schwermetalle im Boden kann mit dem Sickerwasser verlagert werden. Um die Menge der verlagerten Elemente bestimmen zu können, muss das Verhältnis zwischen den Konzentrationen der sorbierten und in Lösung befindlichen Schwermetalle bekannt sein. Denn nur die gelösten Anteile können mit dem Sickerwasser entzogen werden, während die im Boden sorbierten Schwermetalle nicht entzogen werden.

UTERMANN ET AL. (2005) haben Sorptionsparameter ermittelt, mit denen sich der Anteil der in Lösung befindlichen Elementkonzentration berechnen lässt.

Die Sorptionsparameter werden mittels der Freundlich-Gleichung angegeben:

Formel 23: Die Freundlich-Gleichung

$$\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{sorb} = K * (\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{solu})^n \quad \text{bzw.} \quad \log(\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{sorb}) = \log(K) + n * \log(\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{solu})$$

Quelle: verändert nach UTERMANN ET AL. (2005)

In der folgenden Tabelle sind Mediane, 5% und 95% Perzentile der substratübergreifenden Freundlich-Koeffizienten sowie Freundlich-Exponenten aufgeführt, die UTERMANN ET AL. (2005) ermittelt haben.

Tabelle 36: Perzentile der substratübergreifenden Freundlich-Koeffizienten und Freundlich-Exponenten

Schwermetall	N	Log k [$\mu\text{g}^{1-n} \text{L}^n \text{kg}^{-1}$]			n [-]		
		5% Perzentil	50% Perzentil	95% Perzentil	5% Perzentil	50% Perzentil	95% Perzentil
Cd	341	0.95	2.43	3.54	0.69	0.85	1.01
Cr	290	1.81	2.9	3.88	0.64	0.97	1.46
Cu	322	1.86	2.67	3.78	0.56	1.06	1.51
Ni	339	1.15	2.37	3.27	0.59	0.81	0.98
Pb	271	2.81	4.06	5.01	0.46	0.66	1.01
Zn	315	1.65	3.03	4.39	0.39	0.59	0.85

Quelle: UTERMANN ET AL. (2005)

Diese einfache Freundlich-Gleichung berücksichtigt nicht die Bodenparameter, welche die Versickerungsrate beeinflussen. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören die Bodenreaktion, der Gehalt an organischem Kohlenstoff und der Tongehalt des Bodens.

UTERMANN ET AL. (2005) haben neben der einfachen Freundlich-Gleichung noch eine erweiterte Freundlich-Gleichung aufgestellt, die aus substratübergreifenden Berechnungen hervorgeht und die sorbierte Elementkonzentration folgendermaßen angibt:

Formel 24: Erweiterte Freundlich-Gleichung

$$\log(\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{sorb}) = \log(K^*) + a * \omega_{KR,H,C,T,"pH"}^{soil} + b * \log(\omega_{KR,H,C,T,"Ton"}^{soil}) + c * (\log \omega_{KR,H,C,T,"C_{Org}"}^{soil}) + n * \log(\omega_{KR,H,C,T,P,HM}^{solu})$$

Quelle: verändert nach UTERMANN ET AL. (2005)

Die Koeffizienten der erweiterten Freundlich-Gleichung wurden mittels einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt. Die Isothermenparameter der Schwermetalle und das adjustierte Bestimmtheitsmaß (adj. R²) sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Tabelle 37: Isothermenparameter der Sorptionsisotherme von Oberböden

Element	$\log 10(K^*)$	$a(H^+)$	$c(C_{Org})$	$b(Ton)$	n	adj. R ²
Cd	-0,314	0,505	0,667	0	0,807	0,92
Cr	3,014	0	0,441	0	0,841	0,79
Cu	1,775	0,174	0	0	1,045	0,89
Ni	0,278	0,367	0,583	0	0,796	0,93
Pb	1,778	0,372	0	0,337	0,715	0,87
Zn	0,178	0,531	0,651	0	0,566	0,92

Quelle: UTERMANN ET AL. (2005)

Durch Anwendung der erweiterten Freundlich-Gleichung wird die sorbierte Schwermetallkonzentration und die in Lösung befindliche Konzentration berechnet. Die Umrechnung von im Königswasser lösliche Schwermetallkonzentrationen in EDTA-extrahierbare Gehalte wurde auf Grundlage von Faktoren aus der Umrechnungsfunktionen von LIEBE ET AL. (1997)⁴⁰, welche für Nordrhein-Westfalen entwickelt wurden, vorgenommen. Die Umrechnung von Totalgehalten auf königswasserextrahierbare Gehalte erfolgt nach Umrechnungs-

⁴⁰ Vgl. UTERMANN ET AL. (2005)

faktoren von BACHMANN ET AL. (1997). Diese betragen für Chrom 0,6 und für die Schwermetalle Cadmium, Kupfer, Nickel, Blei und Zink 0,8.⁴¹

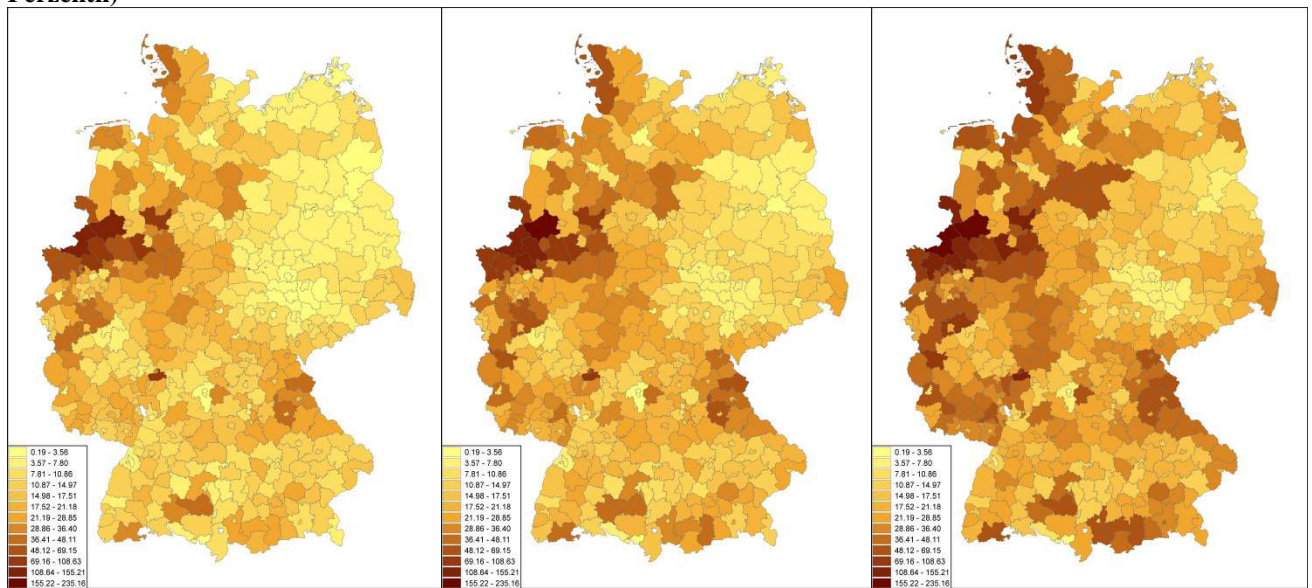
Die in Lösung befindliche Schwermetallmenge kann mit dem versickernden Wasser aus dem Oberboden verlagert werden. Das Produkt der Sickerwasserraten, die dem EPIC-Modell entnommen werden (vgl. Kapitel 6.2) und der entsprechenden Konzentrationen im Bodenwasser ergibt unter der Annahme, dass innerhalb des betrachteten Bodenhorizonts eine gleichmäßige Verteilung der gelösten Schwermetallgehalte vorliegt, die durch Versickerung verlagerte Schwermetallmenge. Da für jede Zufallsnummer der Monte-Carlo-Simulation ein zufälliger Wert der Versickerungsmenge je Bodenart, Pflanzenart und Landkreis in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und dem Bewässerungssystem ermittelt wird und jeweils eine Konzentration im Sickerwasser auf Grundlage der Sorptionsisothermen ermittelt wird, ergeben sich in jedem Landkreis eine Vielzahl von mit dem Sickerwasser verlagerten Schwermetallmengen. Gewichtet mit der jeweiligen Anbaufläche der landwirtschaftlichen Nutzflächen unter Nutzung der jeweiligen Technologie ergibt sich für jeden Kreis und jede Zufallsnummer ein durchschnittlicher Schwermetallentzug.

⁴¹ Zitiert von LABO (1998)

12.4 Ergebnisse der Berechnungen der mit dem Sickerwasser verlagerten Schwermetallmenge

Die berechnete Verlagerungsmenge von Kupfer mit dem Sickerwasser ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei sind für jede Zufallsnummer der Monte-Carlo-Simulation die durchschnittlichen Werte der Versickerungsmenge je Kreis ermittelt worden und mit den relativen Anteil gewichtet worden, für die eine Schwermetallkonzentration im Sickerwasser ermittelt werden konnte.

Abbildung 18: Verlagerung von Cu mit dem Sickerwasser [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

12.5 Methodik zur Berechnung der infolge der Erosion abgetragenen Schwermetallmenge

Schwermetalle können durch Erosion von landwirtschaftlichen Flächen abgetragen werden. Die Erosionsmenge ist von verschiedenen Faktoren abhängig, unter anderem von der Hanglänge und der Hangneigung, von der Bodenbedeckung und der Intensität der Niederschläge (WISCHMEIER UND SMITH, 1978). In der Landwirtschaft gibt es unterschiedliche On- und Offsiteschäden, die durch die Bodenerosion hervorgerufen werden (vgl. RICHTER, 1998). Wenn erodierte Bodenpartikel als Schwebstoffe in Gewässer gelangen, wird die Menge des einfallenden Lichtes reduziert und Wasserpflanzen werden in ihrer Photosyntheseleistung eingeschränkt (SYMADER, 1998).

Die Bodenabtragsgleichung (Universal Soil Loss Equation, USLE) nach WISCHMEIER UND SMITH (1978) stellt eine Möglichkeit dar, die Menge des erodierten Bodenmaterials zu berechnen:

Formel 25: Bodenabtragsgleichung

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Dabei ist:

- A Der Bodenabtrag
- R Der Regenmengen- und Oberflächenabfluss- Erosivitätsfaktor
- K Der Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L Der Hanglängenfaktor
- S Der Hangneigungsfaktor
- C Der Bedeckungs- und Managementfaktor
- P Der Erosionsschutzfaktor

Quelle: RENARD ET AL. (1994)

Die für die Universal Soil Loss Equation verwendeten Faktoren wurden empirisch ermittelt (RENARD ET AL., 1994). Neben den Modellen, die auf empirischen Ergebnissen beruhen, können physikalische bzw. prozessorientierte Modelle besser auf Bedingungen übertragen werden, die sich von den in empirischen Messungen verwendeten unterscheiden⁴².

Für diese Arbeit werden die Erosionsmengen, welche im EPIC-Modell (vgl. Kapitel 6.2) auf Grundlage der RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) ermittelt wurden, verwendet, welche sich unter anderem von der USLE unterscheidet, dass neben den empirisch ermittelten Funktionen beim P-Faktor auch prozessorientierte Berechnungen einbezogen werden (RENARD ET AL., 1994).

Die Menge der infolge der Bodenerosion ausgetragenen Schwermetalle ergibt sich, da das EPIC-Modell die Erosionsmenge angibt, die die landwirtschaftlichen Flächen verlässt, als Produkt der Erosionsmenge und der in der Bodenmasse enthaltenen Schwermetallkonzentration (Totalgehalte, vgl. Kapitel 12.3).

Da im EPIC-Modell die Netto-Erosionsmenge angegeben wird (SCHMID, 2011), also die erodierte Bodenmasse nicht auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche verlagert wird, sondern diese verlässt, gelangt die berechnete Schwermetallmenge, die durch Erosion abgetragen wird, in Oberflächengewässer oder wird außerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen akkumuliert.

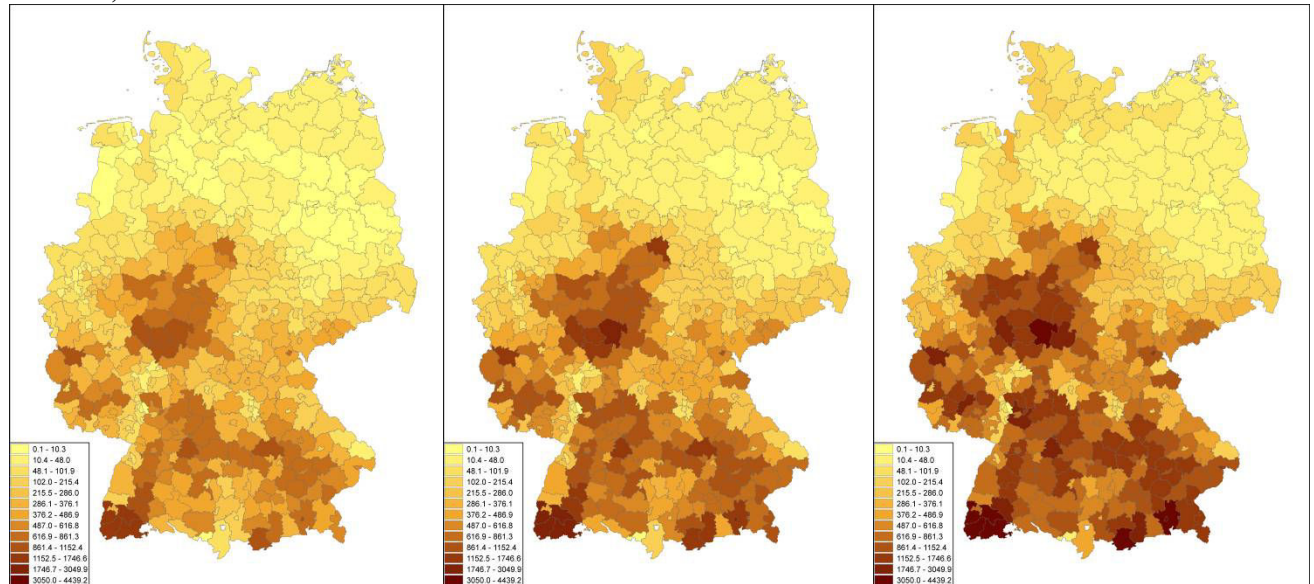
12.6 Ergebnisse der Berechnungen der infolge der Erosion verlagerten Schwermetallmenge

In der folgenden Abbildung sind die 10., 50. und 90. Perzentile der Chrommengen dargestellt, die mit dem erodierten Bodenmaterial die landwirtschaftlichen Flächen verlassen. Die Werte beziehen sich jeweils auf den Durchschnitt der Ackerflächen je Landkreis. Im Modell sind differenziertere, mit dem Bodenmaterial abgetragene Schwermetallmengen berechnet worden, die je nach Pflanzenart, HRU sowie der Bodenbearbeitung und der Bewässerung gemäß des EPIC-Modells (vgl. Kapitel 6.2) auf unterschiedlichen Erosionsmengen beruhen.

⁴² Vgl. SCHMIDT (1998), KLISCH (2003)

In der folgenden Abbildung sind die Perzentile der mit der jeweiligen Flächengröße gewichteten Mittelwerte der Schwermetallausträge angegeben.

Abbildung 19: Abtrag von Cr infolge der Erosion [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

12.7 Ergebnisse der Berechnung der Summe von Schwermetallausträgen

Die Summe der Schwermetallausträge sowie die relativen Anteile der mit der Pflanzenmasse entzogenen, durch Versickerung verlagerten und durch Erosion abgetragenen Schwermetallmengen sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die relative Menge der Schwermetallentzüge mit der Pflanzenmasse ist, wie aus der Tabelle hervorgeht, bei allen Elementen höher als die durch die Versickerung verlagerte Schwermetallmenge. Doch die Erosion ist insbesondere für die Elemente Chrom, Nickel und Blei der bedeutendste Faktor der Schwermetallausträge.

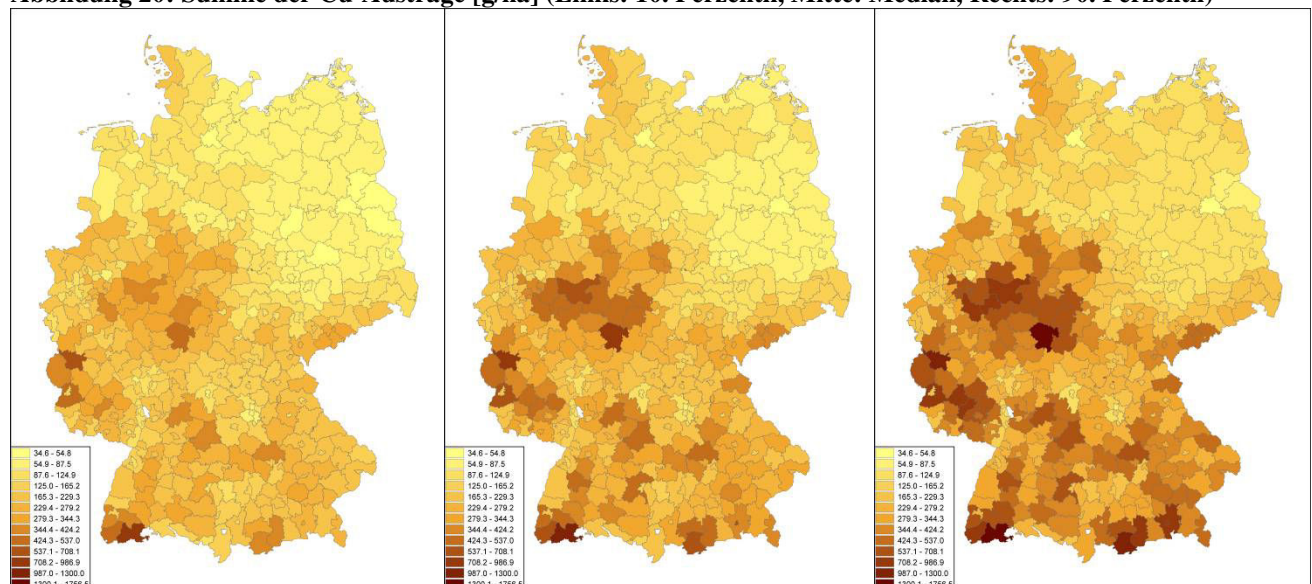
Tabelle 38: Prozentuale Anteile und Summen der durchschnittlichen Schwermetallausträge bei Anwendung der USLE und der RUSL

Austragsursachen	Einheit	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
USLE							
Entzüge mit der Ernte	[%]	47,18	04,01	37,30	08,11	04,35	57,33
Versickerung	[%]	07,35	00,54	12,57	04,80	00,33	02,71
Erosion:USLE	[%]	45,47	95,45	50,13	87,09	95,32	39,97
Summe unter Anwendung der USLE	[g/ha]	2,25	273,56	158,66	150,93	176,36	587,25
RUSL							
Entzüge mit der Ernte	[%]	42,63	03,21	33,18	06,63	03,53	52,20
Versickerung	[%]	06,64	00,43	11,19	03,92	00,27	02,46
Erosion:RUSL	[%]	50,73	96,36	55,63	89,45	96,20	45,34
Summe unter Anwendung der RUSL	[g/ha]	2,66	355,94	185,29	193,38	230,60	688,17

Quelle: Eigene Berechnung

In der folgenden Abbildung sind die 10., 50. und 90. Perzentile der mit der jeweiligen landwirtschaftlichen Nutzfläche gemäß den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells gewichteten Kupferausträgen dargestellt.

Abbildung 20: Summe der Cu-Austräge [g/ha] (Links: 10. Perzentil, Mitte: Median, Rechts: 90. Perzentil)



Quelle: Eigene Berechnung

12.8 Ergebnisse der Berechnungen des Nettoeinträge der Schwermetalle

Die Nettoeinträge der Schwermetalle ergeben sich aus der Differenz der berechneten Ein- und Austräge. Auf Grundlage dieser Berechnung wurde im Modell die Zeitspanne, die bis zum Erreichen eines Vorsorgewertes nach der Bundes-Boden-Schutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV (2009), Anhang 2 Nummer 4.1; vgl. Kapitel 11.1) bei konstanten Nettoeinträgen verbleibt, abgeleitet (vgl. Kapitel 11.5 für überwiegend mit Wirtschaftsdüngern gedüngte Flächen, Kapitel 11.8 für überwiegend mit Komposten gedüngte Flächen, Kapitel

11.11 für überwiegend mit Klärschlamm gedüngte Flächen und Kapitel 12.8 für die unabhängig von der Düngung ermittelte Zeitspannen)⁴³.

12.8.1 Ergebnisse der Berechnungen des Netto-Schwermetall-Eintrags

In der folgenden Tabelle sind die berechneten durchschnittlichen Netto-Schwermetalleinträge unter Anwendung der USLE und der RUSL angegeben. Die Nettoeinträge der Schwermetalle Cadmium, Chrom, Nickel und Blei sind negativ. Das bedeutet, dass im Durchschnitt aller landwirtschaftlich genutzten Flächen mehr Schwermetalle die landwirtschaftlichen Flächen verlassen als eingetragen werden. Positive Nettoeinträge wurden für die Elemente Kupfer unter Anwendung der USLE und Zink unter Anwendung der USLE sowie der RUSL (vgl. Kapitel 12.5) berechnet. Die Schwermetalleinträge durch Düngemittel, atmosphärische Deposition und Pestizide haben auf den Flächen, auf denen der Netto-Schwermetalleintrag negativ ist, zur Folge, dass sie insbesondere durch die Erosion von diesen abgetragen werden und dadurch in Oberflächengewässer gelangen und in angrenzenden, nicht-landwirtschaftlich genutzten Böden akkumuliert werden.

Abbildung 21: Durchschnittliche Netto-Schwermetalleinträge unter Anwendung der USLE und der RUSL [g/ha]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
USLE						
Einträge	2,08	35,86	161,55	25,08	49,53	767,16
Austräge	2,25	273,56	158,66	150,93	176,36	587,25
Netto-Einträge	-0,16	-237,70	2,90	-125,85	-126,84	179,91
RUSL						
Einträge	2,08	35,86	161,55	25,08	49,53	767,16
Austräge	2,66	355,94	185,29	193,38	230,60	688,17
Netto-Einträge	-0,57	-320,08	-23,74	-168,30	-181,08	79,00

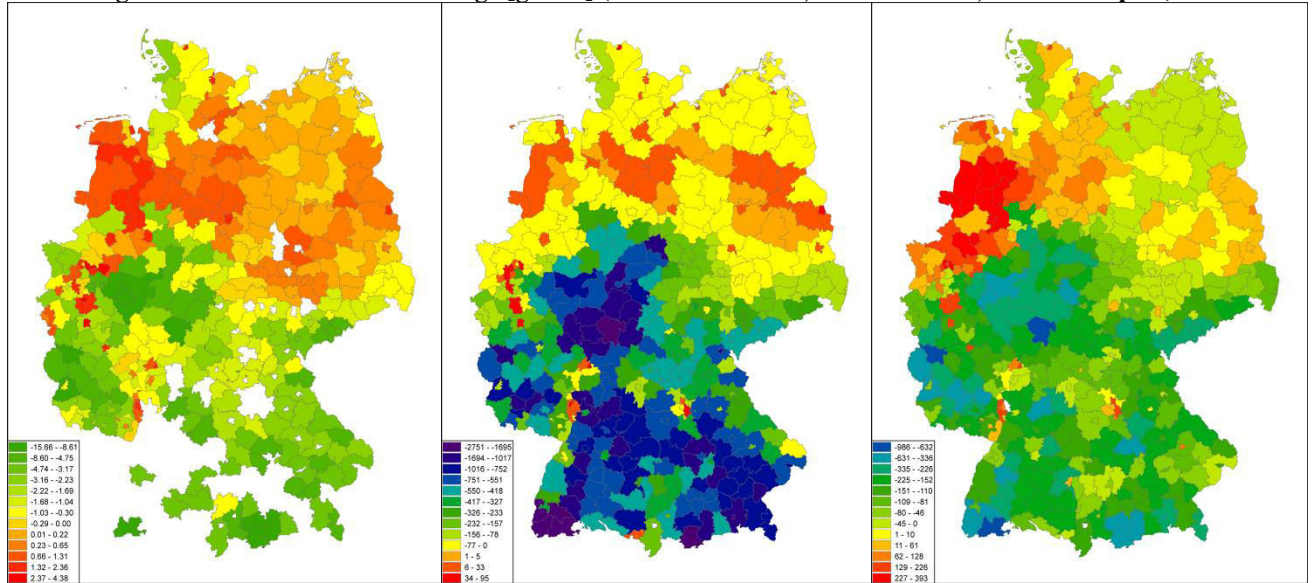
Quelle: Eigene Berechnung

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 22 und Abbildung 23) sind die berechneten Netto-Einträge unter Anwendung der RUSL auf Kreisebene angegeben. Im Kapitel 11.5 werden Nettoeinträge auf überwiegend⁴⁴ mit Wirtschaftsdüngern gedüngte Flächen, in Kapitel 11.8 auf überwiegend mit Komposten und in Kapitel 11.11 auf überwiegend mit Klärschlamm gedüngten Flächen angegeben.

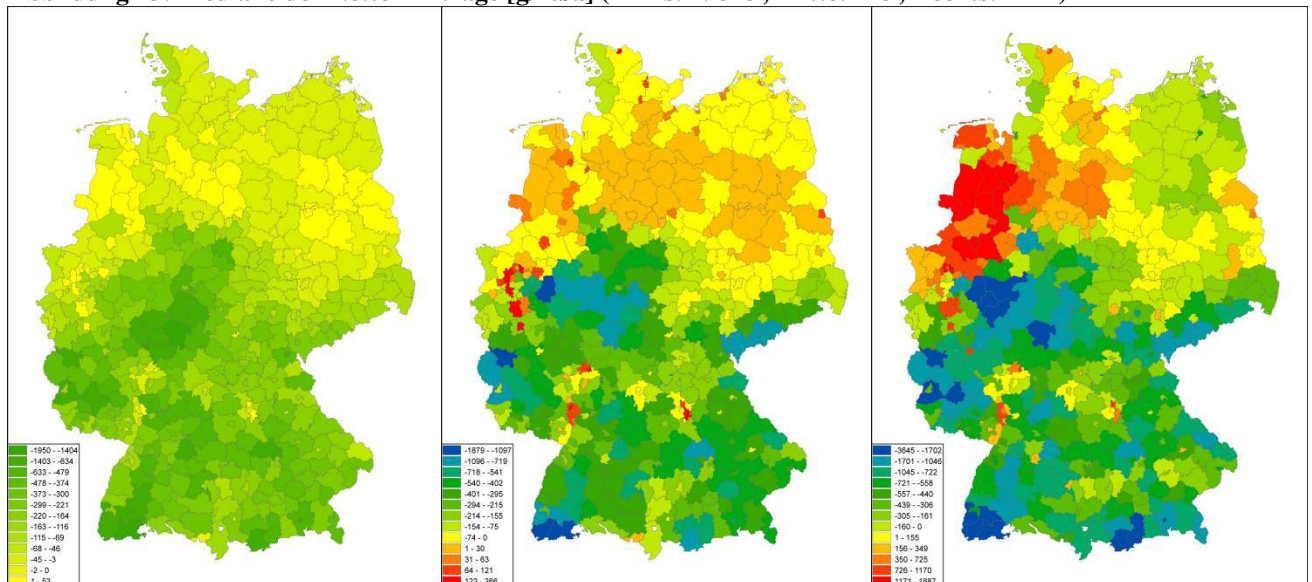
Die Netto-Cadmiumeintragsmenge konnte teilweise aufgrund mangelnder Eingangsdaten nicht angegeben werden (vgl. Abbildung 22 links).

⁴³ Der konstante Nettoeintrag stellt nur eine vereinfachte Annahme dar, da durch höhere Schwermetallgehalte im Boden auch die mit dem Sickerwasser verlagerte und infolge der Erosion verlagerte Schwermetallmenge steigt und somit eine Verringerung der Nettoeinträge bei konstanten Bruttoeinträgen berechnet werden würde.

⁴⁴ Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Wirtschaftsdünger, Kompost oder Klärschlamm an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt

Abbildung 22: Mediane der Netto-Einträge [g/ha/a] (Links: Cadmium, Mitte: Chrom, Rechts: Kupfer)

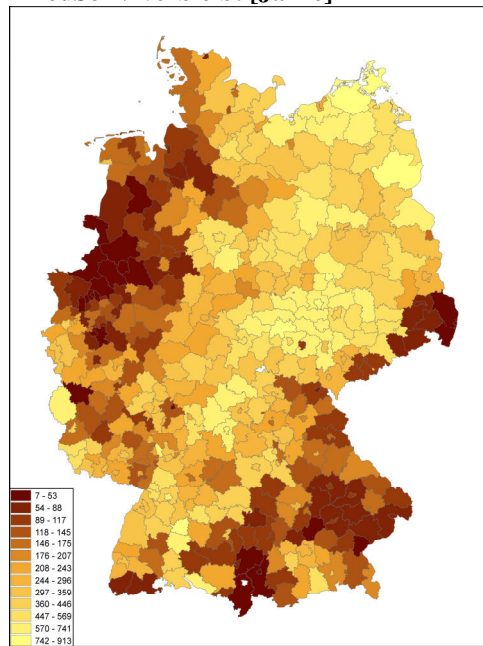
Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 23: Mediane der Netto-Einträge [g/ha/a] (Links: Nickel, Mitte: Blei, Rechts: Zink)

Quelle: Eigene Berechnung

In den Kapiteln 11.5, 11.8 und 11.11 wird jeweils der durchschnittliche Zeitraum berechnet, der zum Erreichen eines der Vorsorgewerte gemäß der Bundesbodenschutzverordnung (vgl. Kapitel 11) verbleibt, wenn bei einem überwiegenden Einsatz von Wirtschaftsdüngern, Komposten bzw. Klärschlämmen zur Erhaltung der organischen Bodensubstanz ein positiver Nettoeintrag vorliegt und der Vorsorgewert noch nicht erreicht ist. In der folgenden Abbildung sind die unabhängig von der organischen Düngung berechneten Zeiträume angegeben, die bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte verbleiben (vgl. Abbildung 24).

Abbildung 24: Durchschnittlicher Zeitraum, der auf Ackerböden bis zum Erreichen eines der Vorsorgewerte der BBodSchV verbleibt [Jahre]



Quelle: Eigene Berechnung

13 Abschließende Diskussion der Ergebnisse

13.1 Diskussion der Methodik und der Erfassung der Unsicherheiten

In dem verwendeten Optimierungsmodell werden die Transportkosten der organischen und mineralischen Düngemittel minimiert, so dass die vorhandenen Düngemittel gemäß der Bedarfe an Stickstoff, Phosphor, Kalium, der organischen Substanz und des Kalkungsbedarfs auf die Landkreise Deutschlands aufgeteilt werden. Dabei fließen, wie in Kapitel 6 beschrieben, zahlreiche Modellergebnisse des EPIC-Modells ein. Durch diesen Ansatz ist es möglich, endogen Einsatzmengen der Düngemittel zu ermitteln, anstatt, wie es für regionale Modelle zur Berechnung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzte Flächen häufig erfolgt, lediglich Annahmen einer Düngemittelverteilung zu treffen und darauf basierend die Schwermetalleinträge zu berechnen.

Abweichungen der berechneten Modellergebnisse des Transportkostenminimierungsmodells von der Realität sind neben den berücksichtigten Unsicherheiten möglich, da regionale wirtschaftliche Rahmenbedingungen einen Einfluss auf die Einsatzmengen der Düngemittel haben, die in dem Modell nicht erfasst werden. Beispielsweise hat eine regionale Förderung, die für Flächen gezahlt wird, auf denen keine Klärschlammausbringung erfolgt, wie der „Marktentlastungs- und Kulturlandschaftsausgleich“ (MEKA III)⁴⁵ in Baden-Württemberg, einen möglichen Einfluss auf die Klärschlammtransportmengen, wird jedoch im Modell nicht berücksichtigt. Der Effekt der Nichtbeachtung dieser Förderung wird im Modell reduziert, da der Klärschlamm durch eine entsprechende Restriktion im Modell jeweils nur innerhalb des produzierenden Bundeslandes auf die Kreise verteilt wird. Die Kompostabgabemengen sowie die Klärschlammabgabemengen aus nichtöffentlichen Anlagen, die auf Bundeslandebene verfügbar sind, werden teilweise auf Grundlage der Einwohnerzahl (Bioabfallkomposte, vgl. Kapitel 9.2; Klärschlämme aus nichtöffentlichen Anlagen und Klärschlammkomposte, vgl. Kapitel 9.3), teilweise auf Grundlage der relativen Flächengrößen (Grüngutkomposte und ein Teil der Gärrückstände, vgl. Kapitel 9.2) auf die Kreise verteilt, um die jeweilige Abgabemenge der Düngemittel zu erhalten. Abweichungen von der Realität sind dabei ebenfalls möglich. Beispielsweise werden die Komposte auch an private Haushalte sowie in der Landschaftsgestaltung und -Pflege (vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT, 2010B) verwendet. Der Standort der Anlagen hat einen Einfluss auf die Transportkosten und auch der Anteil der an die Landwirtschaft abgegebenen Mengen in dem jeweiligen Landkreis ist unbekannt. Dennoch wird von einer Gleichverteilung der relativen Abgabemengen an die Landwirtschaft ausgegangen, da keine genaueren Informationen verfügbar sind.

Für die Transportkosten werden in dem Modell keine Unsicherheiten verwendet, da diese nicht bekannt sind. Die Berechnung der Schwermetalleinträge durch Pestizide ist mit einer nicht genau zu quantifizierenden Unsicherheit verknüpft, da wenig Informationen verfügbar sind, die Applikationsmengen von Kupfer nicht für Deutschland, sondern nur für Europa verfügbar sind und nur stark vereinfacht auf Deutschland und speziell auf die Landkreise übertragen werden können. Die Schwermetallverunreinigungen in den Pestiziden sind wie-

⁴⁵ Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (2011)

derum nur für die Gesamtheit aller Pestizide verfügbar und sind im Jahr 1985 (KLOKE, 1985) erhoben worden. Daher können im Modell nur im Rahmen dieser Angaben die Einträge und die Unsicherheiten der Schwermetalleinträge durch Pestizide ermittelt werden.

Die Schwermetallkonzentrationen in den Ackerböden sind teilweise nur auf Bundesebene verfügbar. Es konnten nicht alle Flächen in der Berechnung der Konzentrationsmengen berücksichtigt werden, so dass Abweichungen von der Realität möglich sind.

13.2 Validierung der Basisdaten

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Schwermetallgehalte der Düngemittel weiteren Literaturangaben gegenübergestellt.

13.2.1 Wirtschaftsdünger

Zunächst werden die verwendeten Schwermetallkonzentrationen von Wirtschaftsdüngern mit Literaturdaten verglichen. Die Mittelwerte von KRATZ ET AL. (2005) liegen, wie aus Tabelle 39 hervorgeht, im Allgemeinen im Rahmen der Werte der Vergleichsliteratur.

Es gibt jedoch teilweise größere Differenzen der verwendeten Mittelwerte und der in der Literatur angegebenen Werte. Das trifft beispielsweise auf den Chromgehalt des Rindermistes und auf den Kupfer- und Zinkgehalt der Schweinegülle zu. Die Differenzen beruhen jedoch auch darauf, dass bei KRATZ ET AL. (2005) unspezifische Werte vorliegen, während diese in der Literatur teilweise nach Nutzungsrichtung spezifiziert werden und sehr unterschiedlich sein können. Die spezifischen Werte sind nicht für eine Ermittlung eines unspezifischen Durchschnittswertes auf Bundesebene geeignet, sondern spiegeln das Spektrum der Schwermetallkonzentrationen in den Wirtschaftsdüngern wieder.

Tabelle 39: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern mit Literaturangaben [mg/kg]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Rindergülle⁴⁶	0,28	4,8	53,7	5,4	4,7	225
Nordrhein-Westfalen, LUFA Bonn 1992-1996/7 ⁴⁷	0,43					235
Mastbullen ⁴⁸	0,41	3,32	66,5	3,79	5,74	495,8
Junge Milchkühe ⁴⁸	0,43	4,83	38,6	5,03	5,06	241,4
Rindergülle ⁴⁹	0,4	6,1	48	7,7	8,9	305
Rindergülle ⁵⁰	0,3	5,3	37	6,2	4,1	190
Rindergülle ⁵¹	0,34		45	5,2	6,9	217
Rindergülle ⁵²	0,41		38	6	7	230
Rindergülle ⁵³	0,23		64,32	7,07	3,09	250,37
Rindergülle ⁵⁴	0,50		50	6	9,1	230
Rindergülle ⁵⁵	0,46		45	3,8	10,9	222
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,39	4,89	48,05	5,64	6,75	261,66

⁴⁶ KRATZ ET AL. (2005)

⁴⁷ WITTE ET AL. (1997), zitiert von KTBL (2005)

⁴⁸ BIEN UND KÜHNEN (2001), zitiert von KTBL (2005)

⁴⁹ UBA (2004), zitiert von KTBL (2005)

⁵⁰ KTBL (2000), zitiert von KTBL (2005)

⁵¹ BOYSEN (1992), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁵² MÜLLER ET AL. (1993), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁵³ LUFA AUGUSTENBERG (2001), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Rindermist⁴⁶	0,24	9,7	34,2	7,4	5,8	144
Jungrinder ⁴⁸	0,26	2,03	21,1	2,65	2,48	132
Milchkühe mit Kälbern ⁴⁸	0,31	3,59	16,5	2,07	3,2	69,2
Milchkühe; mit Futterresten ⁴⁸	0,5	7,83	21,1	7,5	12,06	231,4
Rindermist ⁴⁹	0,3	6,1	25	4,1	0,2	122
Rindermist ⁵⁰	0,3	3,7	35	6,1	3,2	161
Rindermist ⁵²	0,44		39	10	7	213
Rindermist ⁵³	0,23		31,49	9,36	11,24	246,59
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,33	4,65	27,03	5,97	5,63	167,88
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Schweinegülle⁵⁶	0,29	6,7	225	9,8	4,5	864
Nordrhein-Westfalen, LUFA Bonn 1992-1996/7 ⁵⁷	0,69					873
Mastschweine	0,55	9,35	177	6,89	2,3	875,8
Tragende Sauen	0,39	1,96	161,8	4,26	2,5	883,4
Sauen mit Ferkeln	0,53	6,56	680,5	13,67	5,47	1566
Ferkel	0,47	5,44	1164	9,79	5,33	1762
Ferkel ⁴⁹	0,4	7,1	1165	16	3,4	1884
Mix von Ferkeln, Sauen und Mastschweinen ⁴⁹	0,4	10,3	531	11,5	5,7	1508
Schweinegülle ⁵⁰	0,5	6,9	184	8,1	4,8	647
Ferkel ⁵⁸	0,25	12,225	407	9,05		2372,5
Mastschweine	0,425	15,925	479,25	8,05		2626,25
Absetzer ⁵⁹	0,47	5,44	1164	9,79	5,33	1762
Säugende Sauen	0,28	2,28	192	6,76	3,93	1248
Tragende Sauen	0,39	1,96	162	4,26	2,5	883
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,44	7,12	538,96	9,01	4,13	1453,15
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Schweinemist⁶⁴	0,36	12,3	213	5,2	1,9	491
Schweinemist ⁶⁰	0,48	9,67	175,4	5,22	2,86	497,6
Schweinemist ⁶⁰	0,28	2,28	192	6,76	3,92	1248
Schweinemist ⁶¹	0,4	13,7	206	4,9	1,9	465
Absetzer	0,42	6,2	264,07	3,64	1,24	295,28
Säugende Sauen	0,19	3,98	52,31	1,46	1,46	231,6
Tragende Sauen	0,42	5,32	61,04	2,8	2,8	288,33
Schweinemist ⁶²	0,4	6,5	396	7,2	6	569
Schweinemist ⁶⁶	0,4	10,7	137	4,1	2,4	398
Vormast ⁶⁶	0,4	24,8	153	2,6	1,7	604
Endmast ⁶⁶	0,3	67,3	93	8,4	4,3	411
Schweinemist ⁶³	0,33	10,3	450	9,5	5,1	1068
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,37	14,61	198,17	5,14	3,06	552,35
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Hühnermist⁶⁴	0,86	6,1	67,8	7,7	7,2	419
Hühnermist ⁶⁵	0,21	11,3	45	7,9	1,65	465
Hühnermist ⁶⁵	0,2	28,3	112	8,4	4,1	402
Hühnermist ⁶⁶	0,3	10,8	69	5,9	13,6	453
Legehennen Mist ⁶⁰	0,31	11,65	77,20	7,90	21,70	826,00
Legehennen Mist ⁶¹	0,2	9,8	45	8,2	2,4	430
Legehennen Mist ⁶⁷	0,2	3,3	45	4,7	2,9	371
Legehennen Gülle ⁶⁷	0,3	6,4	68	6,2	5,1	466
Hühnergülle ⁶⁸	0,3		78	7,1	8,4	456
Hühnergülle ⁶⁹	0,2		48	9	6	403
Hühnermist/-kot ⁷⁰	0,18		55,5	8,85	3,92	486,48
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,24	11,65	64,27	7,42	6,98	475,85

⁵⁴ RIEB (1992), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁵⁵ SEVERIN ET AL. (1991), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁵⁶ KRATZ ET AL. (2005)

⁵⁷ WITTE ET AL. (1997), zitiert von KTBL (2005)

⁵⁸ KAYGORODOV (2004)

⁵⁹ KÜHNEN ET AL. (2002)

⁶⁰ BIEN UND KÜHNEN (o.A.), zitiert von KTBL (2005)

⁶¹ UBA (2004), zitiert von KTBL (2005)

⁶² KTBL (2000), zitiert von ROTH ET AL. (2002)

⁶³ BANNICK (2001)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Masthähnchen⁶⁴	0,86	6,1	67,8	7,7	7,2	419
Masthähnchen ⁷¹	0,2	7,5	159	5,1	5,1	460
Masthähnchen ⁶⁵	0,18	5,2	159	5,1	1,2	448
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,19	6,35	159,00	5,10	3,15	454,00
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Sonstiges Geflügel⁶⁴	0,5	14,7	122	5,1	2,8	362
Putenmist ⁷¹	0,2	25	130	12,2	2,3	558
Putenmist ⁶⁶	0,3	3,1	173	4,2	1,8	179
Putenmist ⁶⁵	0,17	13,2	135	8	1,7	430
Putenmist ⁶⁵	0,24	28		13,2	2,4	590
Truthahn ⁴⁸	0,20	3,32	38,1	6,36	1,37	162,1
Truthahnmist ⁴⁹	0,50	22,1	150	6,5	2,6	395
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,27	15,79	125,22	8,41	2,03	385,68

Quellen: Siehe Fußnoten

13.2.2 Komposte und Gärrückstände

Die verwendeten Mittelwerte der Komposte und Gärrückstände nach DITTRICH UND KLOSE (2008) bzw. KRATZ ET AL. (2005) werden in der folgenden Tabelle mit weiteren Literaturangaben verglichen. Die verwendeten Werte liegen im Allgemeinen innerhalb der Angaben aus der Vergleichsliteratur. Die Mittelwerte der Vergleichsliteratur für Bioabfallkompost sind zum Teil deutlich höher als die in DITTRICH UND KLOSE (2008) angegebenen. Diese beruhen auf einer Analyse von 88 Bioabfallkomposten, welche unterschiedliche Inputmaterialien verwenden und daher als repräsentativ für Deutschland angesehen werden können. Der Vergleich mit der Quellenangabe des LVL (2000) bestätigt dies.

⁶⁴ KRATZ ET AL. (2005)

⁶⁵ FRÜCHTENICHT (2002)

⁶⁶ IPE BONN (2001), zitiert von ROTH ET AL. (2002)

⁶⁷ KTBL (2000), zitiert von KTBL (2005)

⁶⁸ SEVERIN ET AL. (1991), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁶⁹ RIEß (1992), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁷⁰ LUFA AUGUSTENBERG UND LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE CHEMIE. UNIVERSITÄT HOHENHEIM (2001), zitiert von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

⁷¹ LUFA OLDENBURG (2001), zitiert von ROTH ET AL. (2002)

Tabelle 40: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Komposten und Gärückständen mit Literaturangaben [mg/kg]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Bioabfallkompost⁷²	0,78	27,4	69,3	19,9	55,5	275
Bioabfallkompost ⁷³	0,65	22	60	13	74	275
Biokompost Österreich 1994-2001 ⁷⁴	0,42	36,88	53,2	41,59	49,7	186,9
Nordrhein-Westfalen, LUFA Bonn 1992-1996/7 ⁴⁷	0,66					200
Mittelwert des Haushaltskompostes Dänemark ⁷⁵	0,32	16	64	9,2	35	140
Stabilized Biowaste Italy ⁷⁶	3,2	304	447	132	650	1206
Proben aus verschiedenen Anlagen Italien ⁷⁷	1,14	65,3	104,9	42,4	78,6	333,3
Bioabfallkompost mit Holzspänen (5:1) Italien ⁷⁸	0,29	27,5	52	7,5	7	231,5
Stabilized Biowaste Italy ⁷⁹	2,52	62,5	353	66	624	613,5
Schweden ⁸⁰	0,22	20	36,5	8,9	13,5	167
Mature compost of organic household waste ⁸¹	1,3	26,6	88,5	20,6	232	509
Mittelwert der Vergleichsliteratur	1,07	64,53	139,90	37,91	195,98	386,22
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Gärückstände flüssig⁷²	0,41	11	98,9	5,7	4,92	314
Verwendeter Mittelwert: Gärückstände fest⁶⁴	0,488	22,1	53,4	14,8	32,1	198,8
Gärückstände flüssig ⁶⁴	0,381	17,4	158,1	11,6	11,2	560,0
Gärückstände flüssig ⁷³	0,77	9	196	13	18	512
Gärückstände flüssig von Biogasanlagen; Österreich ⁸²	1,13	7,9	74,8	6,2	8,7	563,4
Gärückstände flüssig; Dänemark ⁷⁵	0,66	5,6	280	19	6,3	330
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,74	9,98	177,23	12,45	11,05	491,35
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Grünkompost⁷²	0,53	21,5	41,6	18,4	59,9	225
Grünkompost ⁷³	0,51	14	33	9	59	214
Nordrhein-Westfalen, LUFA Bonn 1992-1996/7 ⁴⁷	1,13					287
Organischer Abfalls von Gärten und Parks; Dänemark ⁷⁵	0,36	9,1	50	7,2	27	140
Proben aus verschiedenen Anlagen; Italien ⁷⁷	0,99	37,34	60,7	35,9	79,9	172,8
Proben aus drei verschiedenen Anlagen; Italien ⁷⁹	0,53	41,67	71,33	24,67	116,33	198,33
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,75	29,37	60,68	22,59	74,41	199,53

Quellen: Siehe Fußnoten

13.2.3 Klärschlamm und Klärschlammkompost

In den folgenden Tabellen werden die verwendeten Schwermetallkonzentrationen von Klärschlamm und Klärschlammkompost aus den Angaben von DITTRICH UND KLOSE (2008) mit weiteren Literaturangaben verglichen. Hier zeigt sich, dass die verwendeten Konzentrationen des Schwermetalls Kupfer in Klärschlamm geringer sind als die in der Vergleichsliteratur angegebenen Werte. Die Mittelwerte nach DITTRICH UND KLOSE (2008) wurden dennoch verwendet, da zusätzlich zu den Mittelwerten Maxima angegeben wurden, welche für die Erstellung von Häufigkeitsverteilungsfunktionen in der Monte-Carlo-Simulation benötigt wurden.

⁷² DITTRICH UND KLOSE (2008)

⁷³ LVLF (2000)

⁷⁴ BUCHGRABER (2002), zitiert von KTBL (2005)

⁷⁵ KJØLHOLT ET AL. (1998), zitiert von KTBL (2005)

⁷⁶ PINAMONTI ET AL. (1997), zitiert von KTBL (2005)

⁷⁷ CENTEMERO (1999), zitiert von KTBL (2005)

⁷⁸ PICCININI ET AL. (1996), zitiert von KTBL (2005)

⁷⁹ BECCALONI UND CENTEMERO (2001), zitiert von KTBL (2005)

⁸⁰ KIRCHMANN UND WIDÉN (1994), zitiert von KTBL (2005)

⁸¹ RENHÅLLNINGSVERKS-FÖRENINGEN und C11 (1993), zitiert von KTBL (2005)

⁸² KTBL (2005)

Tabelle 41: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Klärschlamm und Klärschlammkompost mit Literaturangaben [mg/kg]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Klärschlamm⁸³	1,57	41,9	161	21,5	97	842
Zusammengefasste Daten ⁸⁴	3,33	77,14	317,38	35,31	152,13	1273,5
Nordrhein-Westfalen, LUFA Bonn 1992-1996/7 ⁴⁷	2,31					1252
Median; LUFA Augustenberg 1994-1998 ⁸⁵	1,3	40	305,5	28	65	830
Niedersachsen ⁸⁶	0,93	28,4	234,6	22,0	24,5	589,2
Klärschlamm (LUFA Nord-West, 2003) ⁸⁷	1,6	44	495	32	51	948
Klärschlamm Niedersachsen ⁸⁷	0,83	29	238	23	26	609
Klärschlamm, trocken ⁷³	1,66	68	273	31	69	930
Mittelwert der Vergleichsliteratur	1,71	47,76	310,58	28,55	64,61	918,81
Verwendeter Mittelwert: Klärschlammkompost⁸³	1,66	72	192	26,8	121	963
Klärschlammkompost ⁷³	1,83	54	236	31	232	755
Kompost aus Klärschlamm und Stroh 9:1; Italien ⁸⁸	1,89	50,1	175,6	52,4	96,1	645,4
Proben aus verschiedenen Anlagen; Italien ⁷⁷	2,22	173	725	240	92	1158
Mittelwert der Vergleichsliteratur	2,06	111,55	450,30	146,20	94,05	901,70

Quellen: Siehe Fußnoten

13.2.4 Mineraldünger

In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Schwermetallkonzentrationen in den Mineraldüngern und weitere Literaturangaben aufgelistet.

Die Schwermetallgehalte unterscheiden sich zum Teil erheblich von der Vergleichsliteratur, insbesondere bei dem Mineraldünger Kaliumchlorid, das in der verwendeten Quelle DITTRICH UND KLOSE (2008) mit 0,58 mg/kg Chrom und einem Kupfergehalt von 0,74 mg/kg angegeben ist, während der Mittelwert der übrigen Literaturangaben 2,25 mg/kg bzw. 2,62 mg/kg betragen.

⁸³ DITTRICH UND KLOSE (2008)

⁸⁴ WILCKE UND DÖHLER (1995), zitiert von KTBL (2005)

⁸⁵ WALTHER UND ÜBELHÖR (1999), zitiert von KTBL (2005)

⁸⁶ NLWKN (2005)

⁸⁷ SEVERIN (2006)

⁸⁸ BALDONI ET AL. (2000), zitiert von KTBL (2005)

Tabelle 42: Vergleich der verwendeten Mittelwerte der Schwermetallkonzentration in Mineraldüngern mit Literaturangaben [mg/kg]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Kalkammonsalpeter⁸⁹	0,19	2,99	4,77	2,16	17,6	31,0
Kalkammonsalpeter ⁹⁰	0,05	0,88	1,47	0,03	21,2	40,9
Kalkammonsalpeter ⁹¹	0,2	10,5	5,0	4,8	24,6	55,0
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,38	2,29	1,4	1,72	23,54	48,7
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,21	4,65	3,2	2,49	35,25	45,8
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,27	4,11	3,2	2,45	35,78	43,8
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,28	4,32	4,1	2,24	38,23	58,3
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,34	3,75	4,1	2,32	37,57	50
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,28	2,79	1,3	2,25	2,97	57,3
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,31	1,43	1,6	0,71	0,45	1,1
Kalkammonsalpeter ⁹²		3,58	1,6	1,95	23,44	36,2
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,23	3,67	2,3	2,18	25,46	38
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,25	0,98	0,5	0,57	0,49	0,5
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,01	3,2	1,6	2,86	33,14	49,8
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,25	0,95	1,1	0,56	0,38	1
Kalkammonsalpeter ⁹²		2,88	12,4	3,58	0,07	9,1
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,04	5,06	17,5	6,67	0,19	0,9
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,06	2,27	1,8	1,45	9,49	43,9
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,39	1,84	18,4	0,58	14,05	12,3
Kalkammonsalpeter ⁹²	0,09	2,29	1,4	1,72	23,54	48,7
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,21	3,23	4,42	2,16	18,41	33,75
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Harnstoff⁹⁰	0,01	0,61	0,83	0,27	0,36	3,67
Harnstoff, geperlt ⁹¹	0,01	0,8	0,5	0,7	0,6	1,9
Harnstoff, geperlt ⁸⁹	> 0,01	0,21	0,14	0,21	0,04	0,95
Harnstoff ⁹²	0,01	0,21		0,23	0,13	3,3
Harnstoff ⁹²	0,01	0,2	0,2	0,15	0,03	
Harnstoff ⁹²	0,01	0,2	0,2	0,23	0,03	0,8
Harnstoff ⁹²		0,2	0,2	0,16	0,02	
Harnstoff ⁹²		0,26	0,2	0,33	0,02	0,8
Harnstoff ⁹²		0,2		0,17	0,02	0,8
Harnstoff ⁹³	0,15	0,68	0,38	0,48	0,36	2,4
Harnstoff ⁹⁴	0,03	0,33	0,4	0,26	0,09	1,7
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,03	0,33	0,28	0,29	0,13	1,58
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: andere Stickstoffdünger⁹⁸	0,1	6,55	5,15	10,4	1	4
Kalkstickstoff ⁸⁹	0,25	8,7	4	3,8	21,4	38,3
Kalkstickstoff ⁹²	7,07	10,6	9,4	23,4	27	12,5
Kalkstickstoff ⁹²		22	5	25,14	0,63	
AHL ⁹²		0,46	0,4	8,02	0,41	0
AHL ⁹²		1,5	3	3	2,6	0
Ammonsulfatsalpeter ⁹²		0,29	0,3	0,5	1,13	0,6
Ammonsulfatsalpeter ⁹²		4	2,5			2,1
Ammonium Nitrat + (NH ₄) ₂ SO ₄ ⁹²		0,59	0,29	0,5	1,13	0,58
Mittelwert der Vergleichsliteratur	3,66	6,02	3,11	9,19	7,76	7,73
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Superphosphat⁹⁰	28,3	229	15,3	20,9	14,7	354
Superphosphat ⁹¹	8,7	128	28,5	25,7	10,2	232
Superphosphat ⁹¹ Min-Max	1,4–21,0	48–181	3,4–22,5	12,2–43	<1,0–36	24,9–470
Superphosphat ⁹⁵	12,8	54,93	21,2	21,27	2,89	263,7
Tripel super phosphate ⁹⁶	25,4	200	17	26,6	1,6	348
Tripel super phosphate ⁹⁶	26,8	288	27,3	36,3	12	489
Triplsuperphosphat (45) ⁹⁷	14	131	5,2	17	10	159
Mittelwert der Vergleichsliteratur	19,20	171,24	19,71	25,03	8,29	311,27

⁸⁹ KÜHNEN UND GOLDBACH (2004)⁹⁰ DITTRICH UND KLOSE (2008)⁹¹ KERSCHBERGER ET AL. (2001), zitiert von KÜHNEN UND GOLDBACH (2004)⁹² Literatur nicht spezifiziert, zitiert von KÜHNEN (2002)⁹³ WILCKE UND DÖHLER (1997), zitiert von HACKENBERG UND WEGENER (1999)⁹⁴ SEVERIN (2006)⁹⁵ KÜHNEN (o.A.), zitiert von KTBL (2005)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Andere P-Dünger⁹⁸	7,51	146,67	15,37	15,37	1,83	225,33
Rohphosphat, teilaufgeschlossen ⁹⁶	7,2	170	15,6	15,6	1,2	195
Rohphosphat, weicherdig ⁹⁶	11,4	160	15,9	15,5	1,6	214
Teilaufgeschlossenes Rohphosphat ⁹²	6,55	21,1	40,3	20,6	6,05	269
Novaphos ⁹²	4,69	48,15	22,6	45,8	20,1	315,3
Novaphos ⁹²	4,64	14,31	46	14,52	2,35	270,8
Novaphos ⁹²	5,21	14,25	41,6	14,23	2,06	245,8
Novaphos ⁹²	2,22	14,26	47,8	14,05	3,05	250
Novaphos ⁹²		14,26	43,4	14,27	2,7	262,5
Thomasphosphat ⁹³	0,58	1742,67	30,33	22	8,33	56,5
Thomas-Phosphat ⁹⁶	0,5	1545	23,5	6,6	7,3	48
Thomasphosphate; 7/21 + 3 MgO ⁹⁹	3,1	990,25	26,48	8,79	12,92	228,8
Mittelwert der Vergleichsliteratur	4,61	430,39	32,14	17,45	6,15	214,15
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Kaliumchlorid⁹⁰	0,01	0,58	0,74	0,62	0,29	2,26
Kaliumchlorid(55) ¹⁰⁰	0,01	0,01	1,6	0,01	3,1	0,01
Kaliumchlorid ¹⁰¹	0,08	3,5	2,9	1,5	0,5	3,7
Kaliumchlorid ⁹³	0,1	3,25	3,35	1,25	0,65	4,1
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,06	2,25	2,62	0,92	1,42	2,60
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Kaliumsulfat⁹⁰	0,02	2,06	1,88	0,37	0,12	10
Kaliumsulfat ⁹³	0,09	5,3	3,4	1,9	0,85	2,3
Kaliumsulfat; 32/10/17, Patentkali ⁹⁹	0,08	14,44	2,74	0,09	0,37	0,69
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,09	9,87	3,07	1,00	0,61	1,50
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: Kalirohsalz⁹⁰	0,01	0,74	0,01	0,22	0,01	0,01
Kalirohsalz ⁹³	0,06	10,7	2,35	5,4	0,77	1,57
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: NP-Dünger⁹⁰	9,24	144	23,8	19,5	3,69	191
NP-fertilisers ¹⁰²	9,15	91,4	21,5	18	2,55	115,75
NP-Dünger ⁹³	10,23	84,75	24,8	17,1	5,5	151
Mittelwert der Vergleichsliteratur	9,69	88,08	23,15	17,55	4,03	133,38
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: PK-Dünger⁹⁰	55,6	77,6	20,1	17,9	0,38	202
PK-Dünger ¹⁰²	7,98	191	19,3	19,9	14,4	152
PK-Dünger ⁹³	4,8	388,5	22,9	21,4	2,65	153,5
Mittelwert der Vergleichsliteratur	6,39	289,75	21,10	20,65	8,53	152,75
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Verwendeter Mittelwert: NPK-Dünger⁹⁰	15,8	43,4	26,7	23,1	2,18	82,8
NPK-Dünger ¹⁰³	7,5 – 24		14 – 50		0,9 – 7,5	74 – 186
NPK-Dünger ¹⁰⁴	4,5	18	172	5,5	6,1	283
NPK-Dünger ¹⁰²	3,78	45,8	11,3	10,9	14,8	116
NPK-Dünger ¹⁰⁵	2,37	32	11,8	8,93	11,97	125,33
Mittelwert der Vergleichsliteratur	4,73	31,93	44,28	8,44	9,04	145,08
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Kohlensaurer Kalk⁹⁰	0,52	9,84	5,42	3,62	38	91,9
Kohlensaurer Kalk ¹⁰¹	0,3	7,5	8,2	6,1	5,9	41,2
Kohlensaurer Kalk ⁹³	0,5	6,9	8,2	4,6	7,3	58
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,40	7,20	8,20	5,35	6,60	49,60
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn

⁹⁶ KÜHNEN (2004)⁹⁷ SEVERIN (2006)⁹⁸ WILCKE UND DÖHLER (1997), zitiert von HACKENBERG UND WEGENER (1999)⁹⁹ KÜHNEN (o.A.), zitiert von KTBL (2005)¹⁰⁰ SEVERIN (2007), zitiert von KOCH ET AL. (2008)¹⁰¹ SEVERIN ET AL. (2001)¹⁰² BANNICK (2001)¹⁰³ VRIES ET AL. (2001), zitiert von KTBL (2005)¹⁰⁴ SEVERIN (2006)¹⁰⁵ BOYSEN (1992), zitiert von HACKENBERG UND WEGENER (1999)

Hüttenkalk⁹⁰	0,01	51,8	0,09	0,01	0,01	60,7
Hüttenkalk ¹⁰¹	0,01	50,6	4,2	2,8	7	8,8
Hüttenkalk ¹⁰⁶	0,02	79,25	8,8	0,4	1,76	2,3
Hüttenkalk ¹⁰⁶	0,08	74,3	7,1	1,48	0,26	4,8
Hüttenkalk ¹⁰⁶	0,08	76,9	8,4	34,7	0,23	8,4
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,06	76,82	8,10	12,19	0,75	5,17
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Andere Ca-Dünger⁹⁰	0,33	17	19,5	12,5	23,75	35
Branttkalk ¹⁰⁶	0,07	6,95	10,7	1,16	17,62	10,7
Branttkalk ¹⁰⁶	2,12	3,81	15,3	6,56	42,9	183,3
Branttkalk ¹⁰⁶	0,26	2,23	10,7	1,07	15,53	13,9
Karbonkalk ¹⁰⁶	0,64	5,9	25	2,86	4,05	53,3
Kohlensaurer Mg-Kalk ¹⁰⁶		5,59	5,7	1,51	1,96	2,9
Kohlensaurer Mg-Kalk ¹⁰⁶	0,16	4,64	5,3	4,39	3,36	15,3
Konvertkalk ¹⁰⁶	0,05	1697	14,4	2,12	19,7	19,4
Konvertkalk ¹⁰⁶	0,03	1135,5	14,8	4,47	16,82	21,7
Konvertkalk ¹⁰⁶	0,02	1221,5	15,2	4,93	13,24	21,1
Konvertkalk ¹⁰⁶		12,44	1,7	9,79	11,68	1,6
Konvertkalk ¹⁰⁶	0,02	1244,5	13,9	31,3	4,23	7,9
Rückstandskalk aus der Sodagewinnung ¹⁰⁶	0,06	18,93	15,6	12,95	25,19	22,4
Rückstandskalk aus der Sodagewinnung ¹⁰⁶	0,32	14,7	24,5	33,8	148,38	62,5
Rückstandskalk aus der Sodagewinnung ¹⁰⁶	0,38	14,64	26,1	34,15	77,51	58,9
Rückstandskalk aus der Sodagewinnung ¹⁰⁶	0,52	13,77	24,6	19,9	65,75	8,8
Mittelwert der Vergleichsliteratur	0,36	360,14	14,90	11,40	31,19	33,58

Quellen: Siehe Fußnoten

13.3 Diskussion der Ergebnisse

13.3.1 Wirtschaftsdünger

In MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002) werden die Applikationsmengen von Wirtschaftsdüngern tierhalten-der Betriebe auf sechs Acker- und fünf Grünlandstandorten des Landkreises Göppingen und auf sechs Ackerstandorten des Landkreises Ludwigsburg angegeben.

Der folgenden Tabelle sind die jeweiligen Wirtschaftsdüngermengen und die resultierenden Schwermetalleinträge zu entnehmen, die auf den Standorten im Jahr der Ausbringung angegeben wurden. Die Mittelwerte der auf den Standorten angegebenen Schwermetalleinträge werden von dem Modell erfasst, da diese innerhalb der berechneten 10. und 90. Perzentile liegen. MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002) haben zudem basierend auf zwei unterschiedlichen Modellvarianten bezüglich einer Verteilung der Wirtschaftsdünger eine Berechnung der in die Fläche eingetragenen Schwermetallmenge vorgenommen, welche mit den Modellergebnissen, die in dieser Arbeit basierend auf dem Transportkostenminimierungsmodell ermittelt wurden, sehr gut übereinstimmen. Die Modellvariante 1 von MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002), bei welcher die Wirtschaftsdünger gleichmäßig auf die Flächen der Betriebe, die überwiegend Rinder- bzw. Schweinehaltung betreiben verteilt werden, zeigt sehr gute Übereinstimmung mit den Medianen bzw. den Mittelwerten der in dem Transportmodell ermittelten Einträge auf die Felder, auf denen die Zufuhr organischer Trockensubstanz überwiegend durch Rinderdung bzw. Schweinedung erfolgt.

Die Untersuchungsergebnisse von KAYGORODOV (2004) lassen keine Rückschlüsse auf den Landkreis zu, da in der Quelle nur einzelne Ackerflächen untersucht wurden und werden hier nur neben den berechneten Perzentilen und Mittelwerten, die auf Grundlage des Transportkostenminimierungsmodell berechnet wurden,

¹⁰⁶ KÜHNEN (2002)

angegeben. Die angegebenen Schwermetalleinträge verdeutlichen jedoch, dass das Modell die im Untersuchungsgebiet ermittelten Schwermetalleinträge umfasst.

Tabelle 43: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Wirtschaftsdüngerausbringungsmengen und der resultierenden Schwermetalleinträge auf Ackerflächen in Göppingen, Ludwigsburg und Osterholz mit Literaturangaben

Dünger	Quelle	TM	Cd	Cu	Zn
		[t/ha]	[g/ha]		
Göppingen					
Rinderdung	Modellvariante 1*		0,8		492
	Modellvariante 2*		1,4		770
	Ackerflächen der Beispielbetriebe**	1,30 - 6,25	0,6 - 2,6	57 - 270	295 - 1404
	Transportkostenminimierungsmodell***				
	Mittelwert	3,10	0,76	114	514
	Median		0,68	75	465
	10. bis 90. Perzentil		0,34 - 1,19	18 - 263	206 - 877
Schweinedung	Modellvariante 1*		0,4		888
	Modellvariante 2*		1,1		2434
	Ackerflächen der Beispielbetriebe**	4,5 - 7,5	2,3 - 3,5	324 - 3783	1685 - 7911
	Transportkostenminimierungsmodell***				
	Mittelwert	1,59	0,54	340	1081
	Median		0,45	266	885
	10. bis 90. Perzentil		0,18 - 0,95	65 - 686	199 - 2139
Ludwigsburg					
Rinderdung	Modellvariante 1*		0,6		367
	Modellvariante 2*		1,4		765
	Ackerflächen der Beispielbetriebe**	1,5 - 9,8	0,6 - 4,1	65 - 425	337 - 2210
	Transportkostenminimierungsmodell***				
	Mittelwert	2,26	0,57	95	410
	Median		0,51	59	341
	10. bis 90. Perzentil		0,22 - 1,02	17 - 203	156 - 744
Schweinedung	Modellvariante 1*		0,6		1353
	Modellvariante 2*		1,1		2452
	Ackerflächen der Beispielbetriebe**	2,4 - 4,8	1,2 - 2,4	1283 - 2566	2683 - 5366
	Transportkostenminimierungsmodell***				
	Mittelwert	2,04	0,66	398	1433
	Median		0,5	295	1139
	10. bis 90. Perzentil		0,17 - 1,36	91 - 751	322 - 2835
Osterholz					
Wirtschaftsdünger	Ackerflächen im Untersuchungsgebiet****	0,806	-	350	2010
	Transportkostenminimierungsmodell*****				
	Mittelwert	1,68		404	1476
	Median			288	1373
	10. bis 90. Perzentil			65 - 816	332 - 2777

Quellen:

* Berechnungen nach MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002). **Modellvariante 1:** Der Wirtschaftsdünger wird gleichmäßig auf die Flächen der Betriebe, die überwiegend Rinder- bzw. Schweinehaltung betreiben, verteilt. **Modellvariante 2:** Der Wirtschaftsdünger wird nach den Obergrenzen der Düngeverordnung auf die Flächen der Betriebe, die überwiegend Rinder- bzw. Schweinehaltung betreiben, verteilt.

** Exemplarische Flächen. Nach MALBURG-GRAF UND BLÜMEL (2002)

*** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch die Wirtschaftsdünger aus der Rinder- bzw. Schweinehaltung an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt.

**** Gemischte Gülle, ausgebracht auf drei Feldern im Untersuchungsgebiet (KAYGORODOV, 2004)

***** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch die Wirtschaftsdünger an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt.

KNAPPE ET AL. (2008) geben unter anderem für die Ackerflächen Niederbayerns, auf denen die organische Substanz durch die Düngestrategie Wirtschaftsdünger zugeführt wird, die durchschnittliche Summe der Schwermetalleinträge an. In der folgenden Tabelle werden die berechneten Einträge in den Kreisen Niederbayerns den Ergebnissen von KNAPPE ET AL. (2008) gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Transportkosten-

minimierungsmodells umfassen in diesem Landkreis, abgesehen vom Element Blei, die von KNAPPE ET AL. (2008) angegebenen Schwermetalleinträge. Das im Modell errechnete Minimum der Bleieinträge liegt jedoch mit 0,2 mg/ha deutlich unter den Literaturwerten.

Tabelle 44: Vergleich der Summe der Schwermetalleinträge durch organische und mineralische Dünger auf mit Wirtschaftsdüngern gedüngten Ackerflächen Niederbayerns mit Literaturangaben

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	[g/ha]					
Düngestrategie: Wirtschaftsdünger*	0,93	50,98	112,02	12,95	7,62	444,24
Transportkostenminimierungsmodell**						
Wirtschaftsdünger + Mineraldünger	1,2	30,5	220,8	20,0	23,3	808,7
Mittelwerte auf Kreisebene	0,83 - 1,53	17 - 60	84 - 327	10 - 40	17 - 42	323 - 1174

Quellen:

* Modellierung von KNAPPE ET AL. (2008)

** Eigene Berechnungen; Mittelwerte, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch die Wirtschaftsdünger an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt.

13.3.2 Komposte und Gärrückstände

HACKENBERG UND WEGENER (1999) geben für den Landkreis Gießen in unterschiedlichen Szenarien die Schwermetallfrachten für Bioabfallkomposte an. Diese basieren auf Annahmen bezüglich der zur Verfügung stehenden Flächen für eine Kompostausbringung oder auf einer gemäß der BioAbfV (vgl. Kapitel 9.2) berechneten maximalen Ausbringungsmenge. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle angegeben und werden mit den Modellergebnissen verglichen. Bei den in HACKENBERG UND WEGENER (1999) angegebenen minimalen Einträgen liegen die Trockenmasseeinträge bei 0,19 t/ha, während die Durchschnittswerte über alle Ackerflächen im Transportkostenminimierungsmodell bei 5,1 t/ha liegen. Die maximalen Ausbringungsmengen von 6,67 t/ha, die HACKENBERG UND WEGENER (1999) angeben, werden im Transportkostenminimierungsmodell nicht überschritten, da dies durch Formel 14 (vgl. Kapitel 11) verhindert wird. Der Mittelwert der hauptsächlich mit Bioabfällen gedüngten Flächen liegt im Transportkostenminimierungsmodell bei 5,11 t/ha, und liegt demnach relativ dicht am oberen von HACKENBERG UND WEGENER (1999) angegebenen Szenarienwert. Die Modellergebnisse unterscheiden sich aufgrund der verwendeten Düngemengen und der Konzentrationskurven, wobei die Modellergebnisse bei den Elementen Chrom, Kupfer, Blei und Zink unter Beachtung der Ausbringungsmengen relativ gut übereinstimmen. Unterschiede treten bei den Elementen Cadmium auf, das im Transportkostenminimierungsmodell mit 3,62 g/ha über dem oberen Szenarienwert nach HACKENBERG UND WEGENER (1999) liegt und bei Nickel, das im Transportkostenminimierungsmodell mit 74 g/ha deutlich unter dem oberen Szenarienwert nach HACKENBERG UND WEGENER (1999) liegt. Die Abweichungen erklären sich also durch unterschiedliche verwendete Schwermetallgehalte insbesondere dieser Elemente.

Tabelle 45: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Kompostausbringung und der Schwermetalleinträge durch Bioabfallkomposte in Recklinghausen mit Literaturangaben

	TM	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	[t/ha]	g/ha					
Ergebnisse der Szenarien*	0,19 - 6,67	0,06 - 2,0	5,8 - 207	6,3 - 227	5,6 - 200	8,3 - 300	37 - 1334
Eigene Berechnungen: Komposte***							
Mittelwert	5,11	3,62	141	303	74	266	1390
Median		3,07	135	161	43	260	1122

Quellen:

* HACKENBERG UND WEGENER (1999). Ausgewählt sind zwei Szenarien, welche Optionen der Verteilung des Bioabfallkomposten aufzeigen.

** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Hier ist der Durchschnittswert über alle Ackerflächen angegeben.

*** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Bioabfallkomposte an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt und sind als Durchschnitt der Einträge innerhalb eines 3-Jahres-Zyklus zu verstehen.

In der folgenden Tabelle werden die in KNAPPE ET AL. (2008) ermittelten Modellergebnisse auf mit Bioabfallkomposten gedüngten Flächen mit den auf Grundlage des Transportkostenminimierungsmodells ermittelten Schwermetalleinträgen verglichen. KNAPPE ET AL. (2008) gehen von einer durchschnittlichen Frischmasseaufbringung von Bioabfallkompost in Höhe von 10,1 t/ha aus. Der Trockenmassegehalt, den sie zugrunde legen, beträgt 66 %. Die aufgetragene Kompostmenge liegt demnach bei 6,67 t TM/ha, dem gemäß der BioAbfV (vgl. Kapitel 9.2) zugelassenen maximalen jährlichen durchschnittlichen Aufbringungsmenge. Die Eintragsmengen der Schwermetalle durch Bioabfallkomposte, die auf Grundlage des Transportkostenminimierungsmodells berechnet wurden, liegen unter den von KNAPPE ET AL. (2008) angegebenen Werten, was daraus hervorgeht, dass in dem Transportkostenminimierungsmodell die Trockenmasseausbringung bei 1,8 bis 3,9 t/ha liegt. Diese Ausbringungsmenge beruht unter anderem auf der im Modell verwendeten Netto-Austragsmenge organischen Kohlenstoffs, welche dem EPIC-Modell (vgl. Kapitel 12.5) entnommen ist.

Tabelle 46: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Kompostausbringungsmengen und der Summe der Schwermetalleinträge durch Düngemittel auf mit Bioabfallkomposten gedüngten Ackerflächen Niederbayerns mit Literaturangaben

Literaturangaben							
	TM/FM	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	[t/ha]	[g/ha]					
Niederbayern							
Düngestrategie: Komposte*	(FM) 10,1	3,81	159,88	391,30	108,65	313,46	1401,57
Transportkostenminimierungsmodell**							
Mittelwert Niederbayern		2,46	80,8	186,9	54,5	149,2	736,2
Mittelwerte auf Kreisebene	(TM)						
Durchschnitt 3-Jahresperiode	1,8 - 3,9	1,78 - 3,5	58 - 113	124 - 284	38 - 73	97 - 221	557 - 1016

Quellen:

* Eine der Düngestrategien in KNAPPE ET AL. (2008), die von einer Zufuhr der organischen Substanz durch Bioabfallkomposte ausgeht.

** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die mit Wirtschaftsdüngern Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Bioabfallkomposte an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt.

13.3.3 Klärschlamm und Klärschlammkompost

Als Grundlage für eine Berechnung der Schwermetalleinträge wird für das Transportkostenminimierungsmodell zunächst die Flächengröße der Kreise ermittelt, auf denen eine Klärschlammausbringung verboten ist. In Hessen ergibt sich in dem Modell eine durchschnittliche relative Ackerfläche von 18,4 %. In HLRL (1998, zitiert von HACKENBERG UND WEGENER, 1999) wird ein Anteil der Verbotsflächen auf Ackerland mit insge-

samt 16,15 % angegeben. Seit 1999 ist der Anteil ökologisch bewirtschafteter Flächen um 29 % gestiegen (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER, 2011c). Die ökologisch bewirtschafteten Flächen bewirken in HLRL (1998, zitiert von HACKENBERG UND WEGENER, 1999) einen Anteil der Ackerflächen, auf denen eine Klärschlammasbringung verboten ist, von 2,53 %. Ein Anstieg um 29 % würde also insgesamt einen Anteil der Verbotsflächen von 19,4 % bedeuten. Der Unterschied zu den im Modell berechneten Flächenanteilen beträgt 1,0 %.

In der folgenden Tabelle werden die Summen der Schwermetalleinträge auf mit Klärschlamm gedüngten Flächen in Niederbayern den Modellergebnissen von KNAPPE ET AL. (2008) gegenübergestellt. Die Modellergebnisse der Elemente Cadmium und Chrom stimmen sehr gut überein, während auf Grundlage des Transportkostenminimierungsmodells insbesondere für die Elemente Kupfer und Nickel geringere Werte und für das Element Blei höhere Werte ermittelt wurden. Dies ist unter anderem durch die unterschiedlichen angenommenen Trockenmasseausbringungsmengen zu begründen. Während KNAPPE ET AL. (2008) von 4,9 t/ha FM und einem Trockenmassegehalt von 30 % ausgehen, also von 1,47 t/ha, liegt die Trockenmasseausbringungsmenge im Transportkostenminimierungsmodell bei 0,75 bis 1,37 t/ha. Hinzu kommt, dass im Transportkostenminimierungsmodell nur eine geringe Anzahl von Datensätzen erzeugt wurde, welche eine primäre Ausbringung von Klärschlamm zur Erhaltung des organischen Kohlenstoffs in Niederbayern ergeben haben. Nur drei Kreise Niederbayerns wiesen genug Datensätze auf, die für die Erstellung der vorliegenden Tabelle genutzt wurden.

Tabelle 47: Vergleich der Modellergebnisse bezüglich der Klärschlammasbringungsmengen und der Summe der Schwermetalleinträge durch Düngemittel auf mit Klärschlamm gedüngten Flächen Niederbayerns mit Literaturangaben

	TM / FM	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	[t/ha]	[g/ha]					
Düngestrategie: Klärschlamm*	(FM) 4,9	1,91	64,82	532,23	40,46	77,05	1114,03
Transportkostenminimierungsmodell**		1,60	66,3	169,9	28,08	114,3	905,0
Median		2,2	77,8	189,0	29,9	134,9	962,1
Mittelwert	(TM)						
Mittelwerte auf Kreisebene	0,75 - 1,37	1,95 - 2,9	66 - 103	153 - 253	25 - 38	116 - 161	748 - 1265

Quellen:

* KNAPPE ET AL. (2008)

** Eigene Berechnungen, die auf den Ergebnissen des Transportkostenminimierungsmodells basieren. Diese Berechnungen beziehen sich auf die Flächen, auf denen der Anteil der Trockenmasseeinträge durch Klärschlämme an der Gesamtzufuhr von Trockenmasse organischer Düngemittel über 80% beträgt.

13.3.4 Summe der Schwermetalleinträge

Die Summe der Schwermetallausträge auf den Flächen Niederbayerns wurde bereits im Kapitel 13.2.1 für die Düngestrategie Wirtschaftsdünger, im Kapitel 13.2.2 für die Düngestrategie Komposte und in 13.2.3 für die Düngestrategie Klärschlamm mit den Berechnungen von KNAPPE ET AL. (2008) verglichen.

ZÖRNER (2010) hat im südlichen Wettereinzugsgebiet die Summe der Schwermetalleinträge in zwei unterschiedlichen Szenarien berechnet. Dabei wurde nach Ackerböden und Grünlandböden unterschieden und ökologisch genutzte Flächen separat ausgewiesen. Die im Transportkostenminimierungsmodell berechneten Mittelwerte der Schwermetalleinträge der Elemente Cadmium, Kupfer und Zink auf Ackerböden und des Elements Cadmium auf Grünlandböden liegen innerhalb der Minima und Maxima der von ZÖRNER (2010) ermit-

telten Werte (vgl. Tabelle 48). Die übrigen Werte, die auf Grundlage des Transportkostenminimierungsmodells berechnet wurden, sind höher als die von ZÖRNER (2010) angegebenen Schwermetalleinträge, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass die Düngemittel in dem Modell von ZÖRNER (2010) auf Grundlage der Phosphorbedarfe verteilt werden und dass sich diese Modellergebnisse nicht auf die Gesamtheit aller Flächen im Landkreis bezieht, sondern nur auf das südliche Wettereinzugsgebiet.

Tabelle 48: Vergleich der Summe der Schwermetalleinträge mit Literaturangaben im Wetteraukreis [g/ha]

	Cd	Cu	Ni	Zn
Ackerböden				
Basis-Szenario/ Multifunktionalitätsszenario*				
Konventionell	3,2 / 2,87	127,7 / 152,5	21,9	652,0
Multifunktionalitätsszenario Ökologisch	1,61	91,0	14,8	453,5
Eigene Berechnungen**				
Mittelwert	2,21	112	27	636
Median	2	107	26	626
10. - 90. Perzentil	1,64 - 2,77	80 - 157	22 - 33	506 - 769
Grünlandböden				
Basis-Szenario/ Multifunktionalitätsszenario*				
Multifunktionalitätsszenario Extensiv	0,69	32,9	10,2	182,5
Basis-Szenario Intensiv	3,81	87,9	16,9	558,7
Multifunktionalitätsszenario Intensiv	3,55	92,0	16,9	560,7
Ökologisch	1,75	91,3	14,9	462,6
Eigene Berechnungen**				
Mittelwert	1,75	150	22	715
Median	1,66	135	22	700
10. - 90. Perzentil	1,15 - 2,44	66 - 251	16 - 27	456 - 986

Quellen:

* ZÖRNER (2010). Anwendungsbeispiel des Modells im südlichen Wettereinzugsgebiet. Konventionell bewirtschaftete Ackerflächen bzw. intensiv bewirtschaftete Grünlandflächen.

** Eigene Berechnungen, Modellergebnisse im Wetteraukreis.

13.3.5 Entzüge mit der Erntemasse

Die mit der Pflanzenmasse erfolgenden Schwermetallentzüge von den Ackerflächen Niederbayerns werden in der folgenden Tabelle mit den Angaben von Knappe et al. (2008) verglichen. Diese liegen bis auf das Element Nickel innerhalb der im Transportkostenminimierungsmodell berechneten Minima und Maxima der Mittelwerte auf Kreisebene.

Tabelle 49: Vergleich der Ernteentzüge mit Literaturangaben [g/ha]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Niederbayern						
Modellergebnisse Knappe et al. (2008)*	0,6	10	51	8	2,2	290
Eigene Berechnung						
Mittelwerte auf Kreisebene	0,5 - 1,4	9,7 - 17	43 - 71	9 - 13	2 - 4	226 - 304

Quellen:

* Verändert nach Knappe et al. (2008), Abbildungen D 32 bis D 39

13.3.6 Schwermetallkonzentration im Boden

In Osterholz wurden von Kaygorodov (2004) vier Standorte bezüglich der Schwermetallkonzentration in den Böden untersucht. In Kaygorodov (2004) wurde ein Gesamtgehalt des Schwermetalls von durchschnittlich etwa 20 mg/kg ermittelt. Die häufigste in diesem Modell ermittelte Zuordnung des "Ausgangsgesteins" (Labo, 2003) ist Sand mit einem Median des königswasserextrahierbaren Zinkgehalts in Höhe von 19 mg/kg. Der in diesem Modell ermittelte pH-Wert liegt überwiegend bei 5,3 bis 5,6. Bei Kaygorodov (2004) liegt der Wert auf den Feldern bei 4,8; 5,24; 5,34 und 5,8. Der Gehalt an organischer Substanz im Boden wird

in KAYGORODOV (2004) nicht angegeben. Die Zinkkonzentration in der Bodenlösung hängt von der organischen Bodensubstanz ab (vgl. Kapitel 12.3). Die Kupferkonzentration in der Bodenlösung beträgt in KAYGORODOV (2004) auf den Versuchsflächen 22 - 39 µg/l. Im hier verwendeten Modell beträgt die Kupferkonzentration in Osterholz durchschnittlich 4,6 µg/l. Im 90. Perzentil werden Werte von 13 µg/l berechnet. Die durchschnittliche Konzentrationsmenge in der Bodenlösung liegt deutlich unter den von KAYGORODOV (2004) berichteten Werten, welche sich allerdings nur auf Versuchsflächen beziehen. Da in KAYGORODOV (2004) der Gehalt der organischen Bodensubstanz nicht angegeben wird, kann leider nicht geprüft werden, ob dieser Faktor für die abweichenden Ergebnisse verantwortlich ist.

13.3.7 Verlagerung mit dem Sickerwasser

In der folgenden Tabelle sind die Schwermetallmengen angegeben, die nach KNAPPE ET AL. (2008) in Niederbayern durchschnittlich mit dem Sickerwasser verlagert werden und werden den Modellergebnissen gegenübergestellt. Die mit dem Sickerwasser verlagerte Schwermetallmenge der Elemente Cadmium, Kupfer und Blei nach KNAPPE ET AL. (2008) liegt im Bereich der berechneten Mediane, während die verlagerte Schwermetallmenge der Elemente Chrom, Nickel und Zink zum Teil deutlich unter den von KNAPPE ET AL. (2008) berichteten Werten liegen. Die Ursachen hierfür können jedoch nicht angegeben werden, da weder die Hintergrundkonzentrationen, die im Modell von KNAPPE ET AL. (2008) für Niederbayern angenommen wurden, vorliegen, noch die jeweils vorliegenden Bodenreaktionen, Tongehalte und Gehalte organischer Substanz.

Tabelle 50: Vergleich der berechneten Schwermetallausträge mit dem Sickerwasser mit Literaturangaben [g/ha]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Niederbayern						
Modellergebnisse KNAPPE ET AL. (2008)*	0,3	18	15	59	0,8	70
Eigene Berechnung: Mediane auf Kreisebene	0,11 - 0,66	0,65 - 6,1	12,2 - 43,4	6,0 - 14,6	0,2 - 6,8	3,0 - 44,5

Quellen:

* Verändert nach KNAPPE ET AL. (2008), Abbildungen D 32 bis D 39

13.3.8 Summe der Schwermetallausträge

Die in diesem Modell berechneten Summen der Schwermetallausträge umfassen die Aufnahme der Schwermetalle in die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, die Verlagerung mit dem Sickerwasser und die Erosion. Die Erosion ist in KNAPPE ET AL. (2008) nicht berücksichtigt worden. Daher sind die Ergebnisse nur ohne eine Berücksichtigung der Erosion vergleichbar. In der folgenden Tabelle sind die in diesem Modell erstellten Ergebnisse inklusive und exklusive der Erosion (vgl. Kapitel 12.5 und die Modellergebnisse von KNAPPE ET AL. (2008) für Niederbayern angegeben. Diese liegen bei den Elementen Cadmium, Kupfer und Blei innerhalb der in diesem Modell ohne eine Berücksichtigung der Erosion ermittelten Minima und Maxima. Bei den Elementen Chrom, Nickel und Zink haben KNAPPE ET AL. (2008) höhere Werte als die in diesem Modell ermittelten Mittelwerte auf Kreisebene berechnet. Die Ursachen dafür sind in den Kapiteln 13.3.5 und 13.3.7 diskutiert worden.

Es ergeben sich deutliche Abweichungen, wenn die Erosion berücksichtigt wird, sie steigen teilweise über das zehnfache des Wertes ohne eine Berücksichtigung der Erosion. Ein Unterschied der ermittelten Erosionsmen-

gen unter Verwendung des EPIC-Modells (vgl. Kapitel 12.5) für die USLE und die RUSL wird in Tabelle 51 ebenfalls angegeben.

Tabelle 51: Vergleich der Summe der Schwermetallausträge mit Literaturangaben [g/ha]

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Niederbayern						
Modellergebnisse KNAPPE ET AL. (2008)*	0,9	28	66	67	3,0	360
Eigene Berechnung**						
Austrag: Mittelwerte inklusive RUSL	3,04 - 8,08	108 - 1105	149 - 406	95 - 447	134 - 1077	504 - 1702
Abtrag durch Erosion: Mittelwerte RUSL	0,44 - 7,42	98 - 1084	63 - 322	73 - 422	131 - 1073	237 - 1408
Abtrag durch Erosion: Mittelwerte USLE	0,42 - 4,73	77 - 865	52 - 205	58 - 364	114 - 681	206 - 893
Gesamtausträge ohne Erosion	0,66 - 1,28	10 - 22	57 - 96	16 - 26	2 - 10	231 - 324

Quellen:

* Verändert nach KNAPPE ET AL. (2008), Abbildungen D 32 bis D 39. Die Erosion wurde dabei nicht berücksichtigt.

** Eigene Berechnung. Dabei wurden neben den Ernteentzügen auch die Auswaschung und die Erosion für alle Elemente berücksichtigt. Zum Vergleich sind auch die Mediane der durch Erosion abgetragenen Schwermetallmengen angegeben. Es wurden die Ergebnisse des EPIC-Modells (vgl. Kapitel 12.5) auf Grundlage der RUSL verwendet und zum Vergleich der Ergebnisse die ebenfalls von EPIC erstellten Erosionsmengen nach der USLE verwendet, um die entsprechenden Schwermetallausträge anzugeben.

13.3.9 Differenz der Schwermetalleinträge und der Schwermetallausträge

Die Netto-Schwermetalleinträge ergeben sich aus der Differenz der bereits angegebenen Einträge und Austräge, die in den jeweiligen Modellen berücksichtigt wurden. Sie werden nicht in jeder zitierten Literaturangabe explizit ausgewiesen und werden hier daher nicht für einen Vergleich herangezogen. In dem vorliegenden Modell ergeben sich auf Kreisebene jeweils positive oder negative Netto-Schwermetalleinträge (vgl. Kapitel 12.8). Beim Vorliegen eines positiven Netto-Schwermetalleintrags werden Schwermetalle in den landwirtschaftlich genutzten Böden akkumuliert. Ist der Nettoeintrag negativ, kann nicht automatisch davon ausgegangen werden, dass der Schwermetallgehalt des Bodens sinkt, denn auch in den tieferen Bodenschichten liegt eine Hintergrundkonzentration der Schwermetalle vor. Es findet jedoch in Gebieten, in denen Bodenmaterial infolge der Erosion abgetragen wird, ein Austrag der Schwermetallmenge in andere Flächen statt. Das kann beispielsweise für angrenzende Naturschutzgebiete von Bedeutung sein, so dass eine Verlagerung der resultierenden Problematik der Schwermetalleinträge in diese Gebiete möglich ist. Die mit dem Sickerwasser verlagerte Schwermetallmenge kann auf drainierten Flächen in die Drainagen gelangen und neben der infolge der Erosion abgetragenen Schwermetallmenge in Oberflächengewässer gelangen, so dass auch ein Einfluss eines Schwermetallaustrages durch das Sickerwasser auf andere Gebiete besteht (vgl. FUCHS ET AL., 2010).

13.4 Strategien zur Reduzierung der Ein- und Austräge der Schwermetalle

Im Folgenden werden Reduktionsstrategien der Ein- und Austräge von Schwermetallen auf landwirtschaftlichen Böden vorgestellt. Die berechneten Schwermetalleinträge und -austräge auf Kreisebene werden zur Berechnung der Effizienz von Minderungsmaßnahmen in den Kreisen angewandt.

13.4.1 Minderungen der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger

Folgende Minderungsoptionen zur Reduzierung der Einträge durch Wirtschaftsdünger werden in der Literatur diskutiert:

- Eine geringere Zufütterung der Schwermetalle (vgl. PECHER UND MELOSCH, 2002; DÖHLER ET AL., 2004; SCHENKEL, 2002a; UBA, 2004)
- Eine bedarfsgerechte Supplementierung der essentiellen Schwermetalle (vgl. SCHENKEL, 2002a; DURST, 2002)
- Die Verwendung organischer statt anorganischer Spurenelementverbindungen (vgl. SCHENKEL, 2002a; GRAFE UND WESTENDARP, 2002)¹⁰⁷
- Eine separate Supplementation von Spurenelementen statt einer Kopplung an das Mineralfutter (LÜPPING, 2002)
- Betriebsspezifische Anpassung des Mineralfutters bei Betrieben mit mehr als 100 Tieren (LÜPPING, 2002)
- Minimaler Kupfer- und Zinkeinsatz bei Arzneimitteln und der Klauendesinfektion (vgl. DÖHLER ET AL., 2004; WINDISCH UND ROTH, 2002)
- Korrosionsschutzmaßnahmen (vgl. KOROTKEWITSCH, 1981; DÖHLER ET AL., 2004)

Der Schwermetalleintrag kann auch durch eine Festsetzung der Grenzwerte in Wirtschaftsdüngern durchgesetzt werden, wie sie im Jahr 2002 vom BMVEL und dem BMU vorgeschlagen wurde. Dieses Konzept wurde nach KÜHNEN UND GOLDBACH (2004) unter anderem kritisiert, da darin nicht berücksichtigt wurde, dass im Verlauf der Lagerung der Wirtschaftsdünger die Schwermetallkonzentration steigen kann, ohne dass dadurch die dem Boden zugeführte Schwermetallmenge erhöht wird. VDLUFA (2002) hat ein alternatives Bewertungskonzept vorgeschlagen, in welchem die Bestandteile von Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel, Kalk und der organischen Substanz berücksichtigt werden (VDLUFA, 2002). Die Grenzwerte der beiden Vorschläge sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 52: Vorgeschlagene Grenzwerte der Schwermetallkonzentration in Schweinegülle und Rindergülle [mg/kg]

	Schweinegülle				Rindergülle			
	Sand-böden*	Lehm-/ Schluffböden*	Ton-böden*	VDLUFA**	Sand-böden*	Lehm-/ Schluffböden*	Ton-böden*	VDLUFA**
Cd	0,6	1	1,3	2,5	0,4	0,8	1,2	2,5
Cr	25	50	75	200	25	45	75	200
Cu	60	75	90	550	35	50	60	550
Ni	20	50	60	80	15	40	55	80
Pb	40	60	80	200	35	55	75	200
Zn	400	450	500	1400	200	250	300	1400

Quellen:

* BMVEL UND BMU (2002)

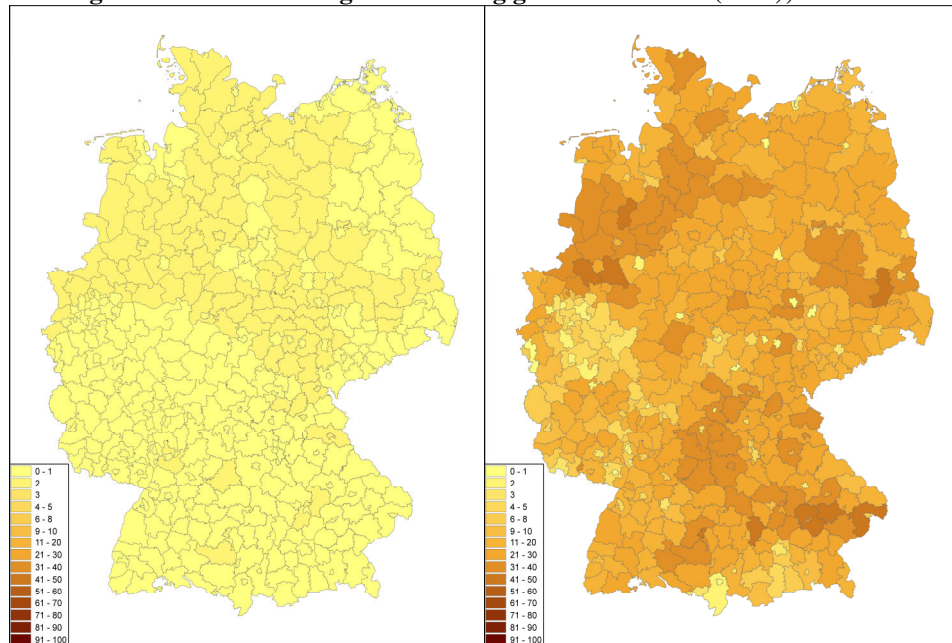
** VDLUFA (2002)

Eine Reduktion der Einträge lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht direkt ermitteln, da nicht bekannt ist, wie sich die Schwermetallkonzentrationskurven der Gülle verändern würden. Daher wurde vereinfacht berechnet, um welche Menge sich der Eintrag verringern würde, wenn die Werte, die das Maximum übersteigen, um die Differenz zum Maximum verringert werden würden. In den folgenden Abbildungen sind die resultie-

¹⁰⁷ Vgl. zu den Interaktionen mit Phytat und der höheren Verfügbarkeit insbesondere bei hohen Phytatgehalten im Grundfutter WINDISCH (2002)

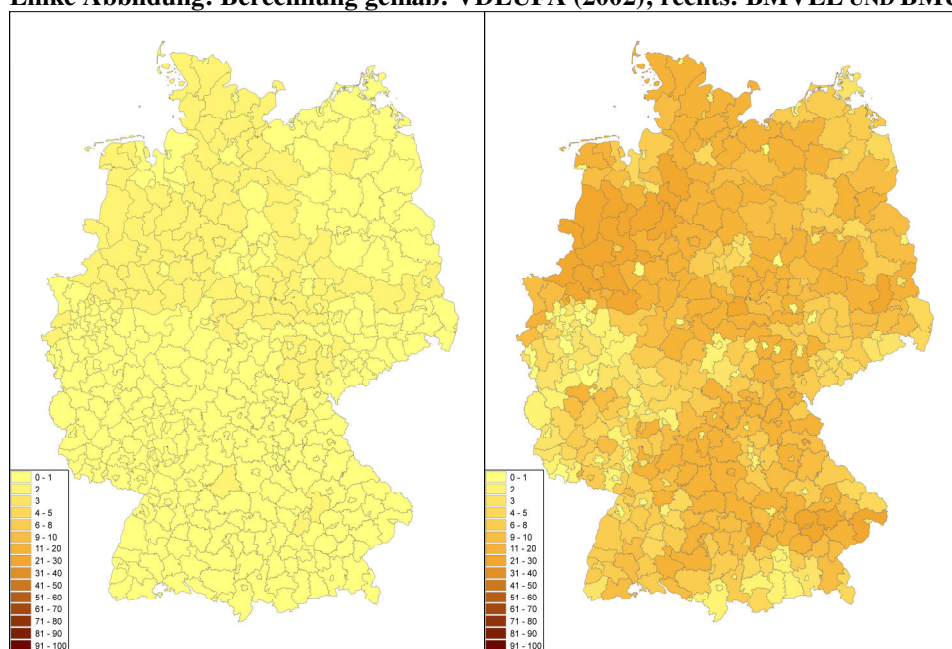
renden relativen Minderungsmengen der Schwermetalleinträge durch die vorgeschlagenen Grenzwerte bzw. einer Reduktion der Konzentration gemäß Tabelle 52, bezogen auf die Gesamteinträge, dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass der Vorschlag von VDLUFA (2002) einen geringen Effekt auf die Einträge sowohl von Kupfer (maximal 1,2 %) als auch von Zink (maximal 1,5 %) hätte. Demgegenüber liegen die Minderungseffekte bei einer Anwendung des Vorschlages von BMVEL UND BMU (2002) auf Kreisebene bei bis zu 46,6 % für das Element Kupfer und bei bis zu 28,5 % für das Element Zink.

Abbildung 25: Reduktion der Kupfereinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Schweine- und Rindergülle. Linke Abbildung: Berechnung gemäß VDLUFA (2002); rechts: BMVEL UND BMU (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 26: Reduktion der Zinkeinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Schweine- und Rindergülle. Linke Abbildung: Berechnung gemäß: VDLUFA (2002); rechts: BMVEL UND BMU (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

13.4.2 Minderungen der Schwermetalleinträge durch Bioabfälle

Neben den Vorschlägen, die angegebenen Grenzwerte für Wirtschaftsdünger durchzusetzen, wurden vom BMVEL und BMU geringere Grenzwerte für Bioabfallkomposte gefordert.¹⁰⁸ Auch hierfür gibt es einen Alternativvorschlag von VDLUFA (2002). Die jeweils vorgeschlagenen, maximal tolerierten Schwermetallkonzentrationen sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 53: Vorschläge neuer Grenzwerte für Bioabfallkomposte nach BMVEL und BMU (2002) und VDLUFA (2002) [mg/kg]

	Sandböden*	Lehm-/ Schluffböden*	Tonböden*	VDLUFA*
Cadmium	0,4	1,0	1,6	1,0
Chrom	30	70	100	80
Kupfer	30	45	75	100
Nickel	15	50	75	30
Blei	45	75	105	100
Zink	120	210	270	400

Quellen:

* BMVEL UND BMU (2002)

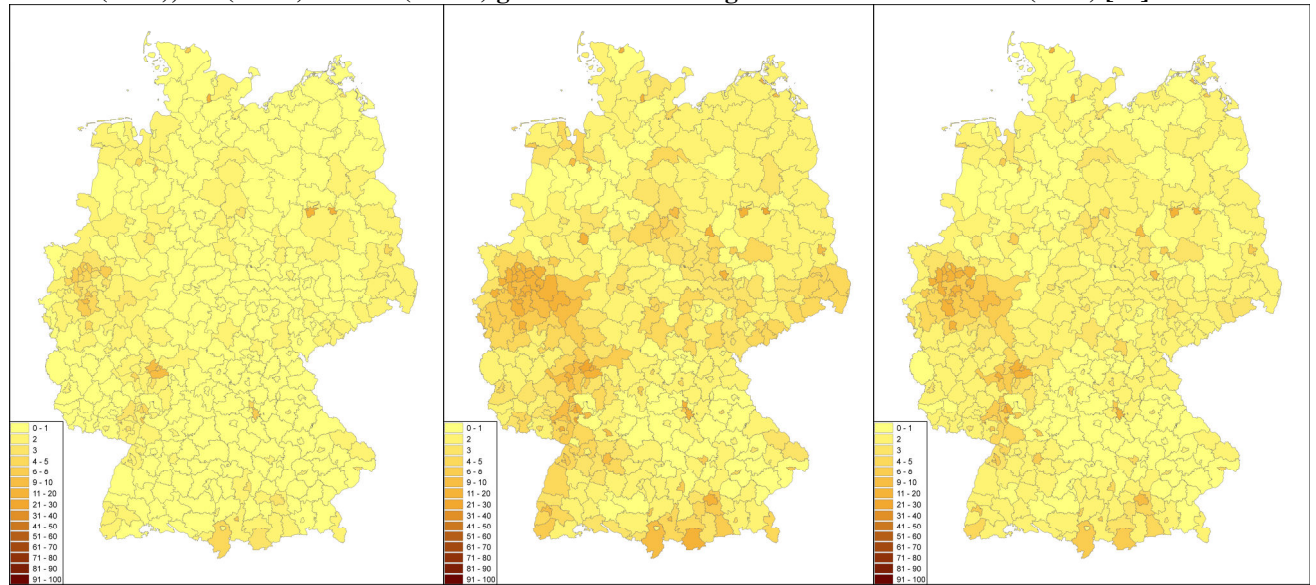
** VDLUFA (2002)

Für das Reduktionsszenario wird, wie es auch bei Wirtschaftsdüngern erfolgt ist, die jeweilige Differenz der Schwermetallkonzentration und dem jeweiligen Grenzwert ermittelt, sofern jene die Grenzwerte übersteigen und der Einfluss dieser Verringerung auf die Gesamteinträge berechnet.

Die Minderungen der Grenzwerte von Schwermetallkonzentrationen der Bioabfälle nach dem Vorschlag von BMVEL UND BMU (2002) führen im Modell insbesondere in Regionen mit hoher Bevölkerung und geringer landwirtschaftlicher Nutzfläche zu hohen relativen Minderungen der Einträge, da in diesen auch eine relativ hohe Ausbringungsmenge der Bioabfälle und ein daraus resultierender hoher Schwermetalleintrag berechnet wurde. (vgl. Abbildung 27 und Abbildung 28). Die höchste relative Reduktion der Einträge wurden bei einer Anwendung des reduzierten Grenzwertes gemäß BMVEL UND BMU (2002) für das Element Kupfer berechnet (21,7 %), während sie bei einer Anwendung des Vorschlages der VDLUFA (2002) bei 5,5 % liegt.

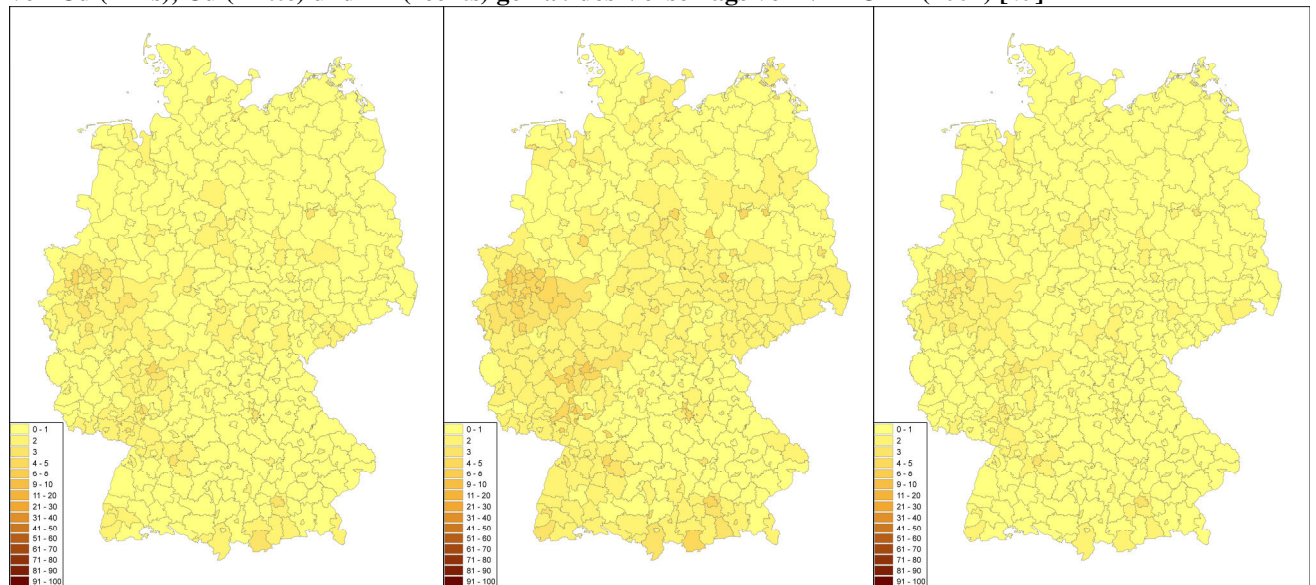
¹⁰⁸ BMVEL UND BMU (2002)

Abbildung 27: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Bioabfallkompost von Cd (links), Cu (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von BMVEL UND BMU (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 28: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Bioabfallkompost von Cd (links), Cu (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von VDLUFA (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

13.4.3 Minderungen der Schwermetalleinträge durch Klärschlamm und Klärschlammkompost

Von BMVEL UND BMU (2002) sowie VDLUFA (2002) wurden veränderte Grenzwerte der tolerierten Schwermetallkonzentration in Klärschlämmen vorgeschlagen. Wie auch bei Wirtschaftsdüngern und Bioabfällen werden beim BMVEL UND BMU (2002) differenzierte Grenzwerte für Sandböden, Lehm- bzw. Schluffböden und Tonböden ausgewiesen. Die jeweiligen Grenzwerte der beiden Vorschläge sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 54: Vorschläge neuer Grenzwerte für Klärschlämme nach BMVEL und BMU (2002) und VDLUFA (2002) [mg/kg]

	Sandböden*	Lehm-/ Schluffböden*	Tonböden*	VDLUFA*
Cadmium	0,5	0,9	1,4	2,5
Chrom	25	45	74	200
Kupfer	50	70	80	550
Nickel	25	45	60	80
Blei	40	60	80	200
Zink	330	390	450	1400

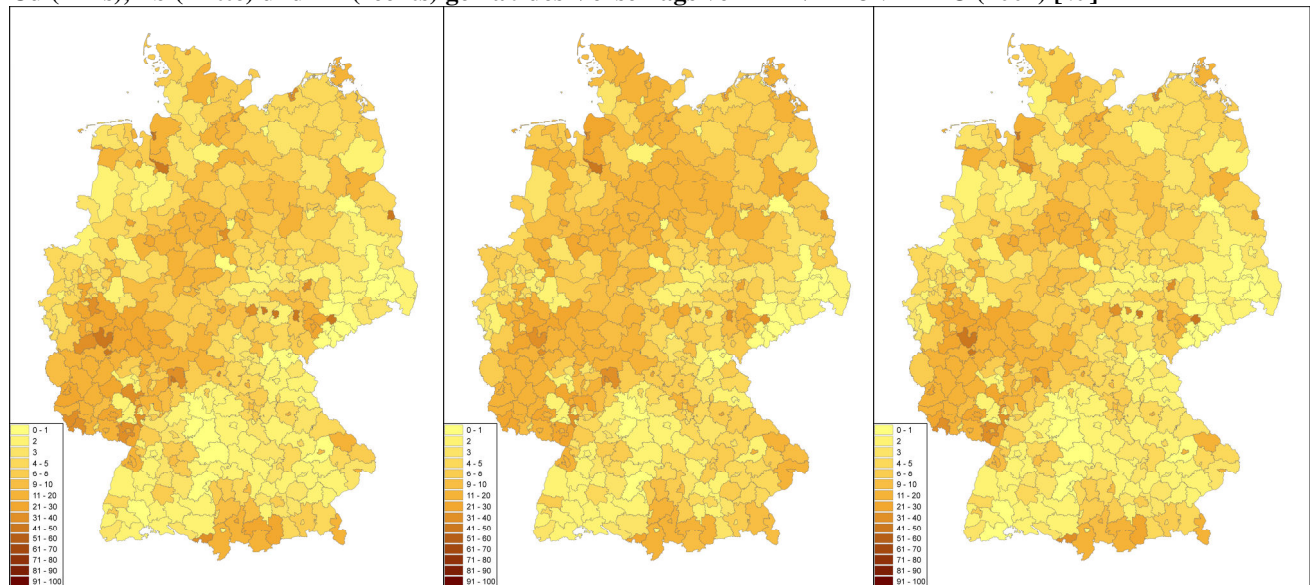
Quellen:

* BMVEL UND BMU (2002)

** VDLUFA (2002)

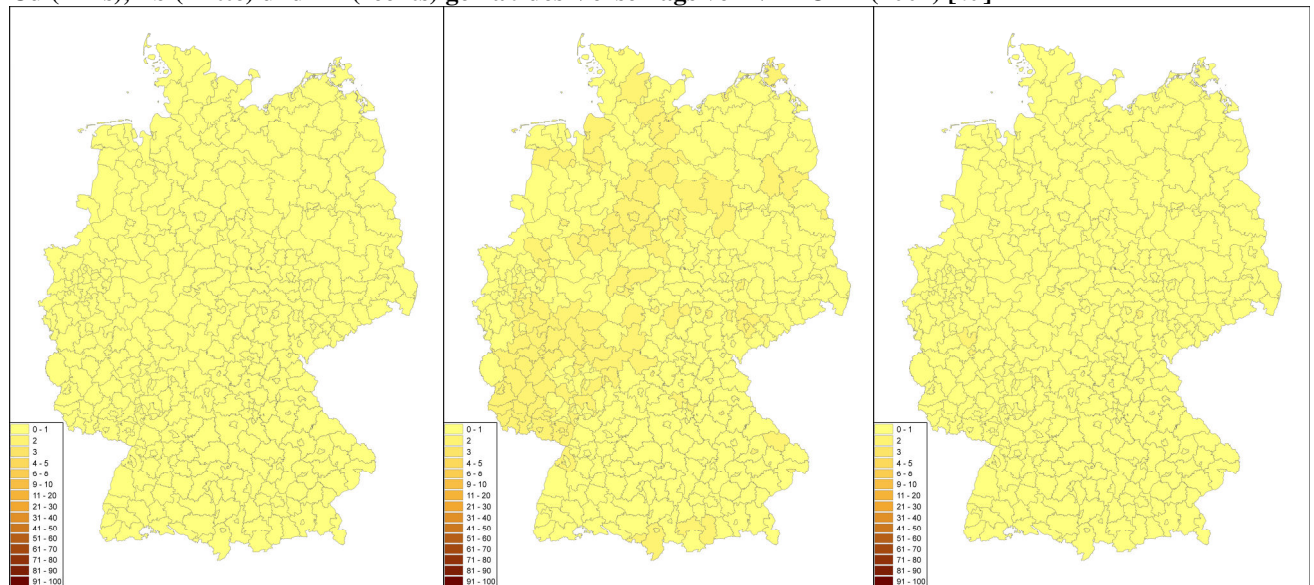
In den folgenden Abbildungen sind die relativen Reduktionsmengen der Schwermetalleinträge bei einer Einhaltung der Grenzwerte nach BMVEL UND BMU (2002) sowie VDLUFA (2002) dargestellt. Die maximale berechnete Reduktion beträgt bei einer Anwendung des vorgeschlagenen Grenzwertes von BMVEL UND BMU (2002) 47,5 % für das Element Kupfer, 44,7 % für das Element Zink und 41,0 % für das Element Blei. Die von VDLUFA (2002) vorgeschlagenen Grenzwerte bewirken eine Reduktion von bis zu 1,3 % für das Element Blei und von maximal 0,57 % für das Element Zink. Die Kupfereinträge wurden in der Modellrechnung bei einer Anwendung der vorgeschlagenen Grenzwerte gemäß VDLUFA (2002) in keinem Landkreis reduziert.

Abbildung 29: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Klärschlamm von Cu (links), Pb (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von BMVEL UND BMU (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 30: Reduktion der Schwermetalleinträge durch Anwendung neuer Grenzwerte für Klärschlamm von Cu (links), Pb (Mitte) und Zn (rechts) gemäß des Vorschlags von VDLUFA (2002) [%]



Quelle: Eigene Berechnung

13.4.4 Minderungen der Schwermetalleinträge durch Pflanzenschutzmittel

Die eingesetzten kupfer- und zinkhaltigen Fungizide verursachen in einigen Kreisen einen hohen Anteil der berechneten Schwermetalleinträge. Eine Reduktion des Einsatzes dieser Wirkstoffe kann durch eine Supplementierung der Pflanzenschutzmittel erfolgen, wie dies beispielsweise im integrierten Weinanbau durchgeführt wird (BERKELMANN-LÖHNERTZ ET AL., 2008). Dies ist im ökologischen Anbau jedoch nicht möglich und eine Reduktion des ausgebrachten Kupfers ist beispielsweise bei falschem Mehltau (Erreger: *Plasmopara viticola*) lediglich bei einem mittleren Befallsdruck möglich (BERKELMANN-LÖHNERTZ ET AL., 2008). Im Obstanbau des ökologischen Anbaus kann ebenfalls nicht auf Kupfer verzichtet werden, um einen ausreichenden Ertrag und eine gute Qualität der Früchte zu erhalten, da bei vielen Obstarten Kupfer im ökologischen

Anbau das einzige zugelassene Fungizid ist, welches gegen den Befall wirksam eingesetzt werden kann (KIENZLE ET AL., 2008).

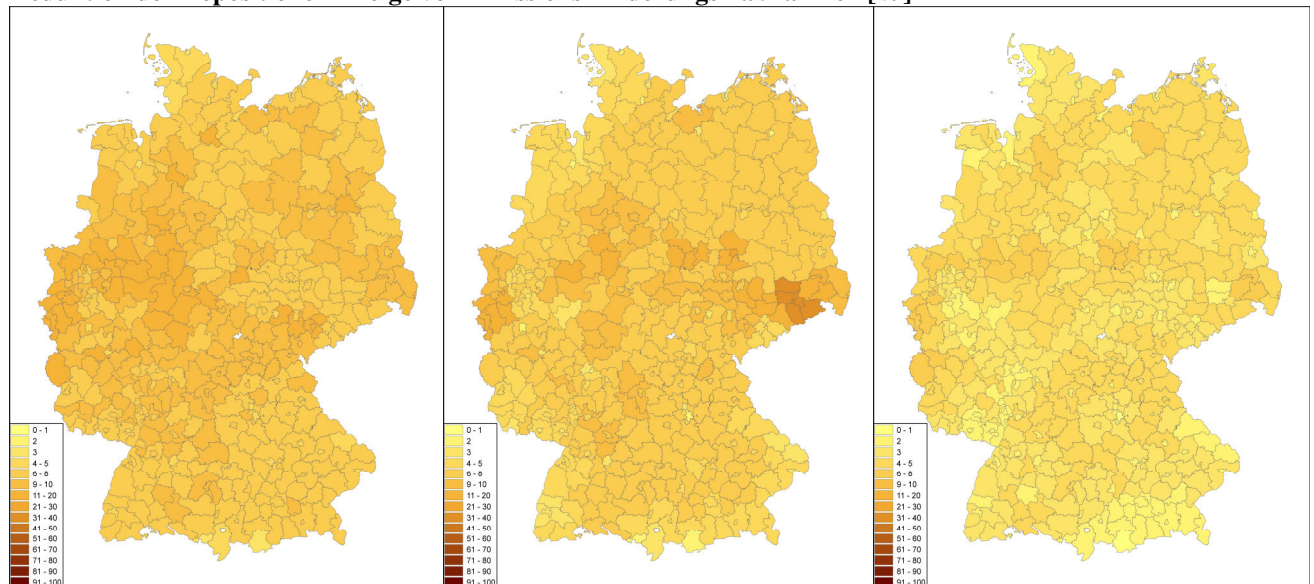
Im konventionellen Anbau kann eine Wahl von schwermetallfreien Pestiziden zu einer Reduktion der Kupfer- und Zinkeinträge führen. Für eine Berechnung des Minderungspotentials der Schwermetalle durch einen Verzicht der Wirkstoffe Kupfer und Zink muss jedoch das Gefährdungspotential der alternativ einsetzbaren Fungizide auf die Umwelt bewertet werden und soll hier daher nicht als Maßnahme Verwendung finden.

13.4.5 Minderungen der Schwermetalleinträge durch atmosphärische Depositionen

Eine Minderungsoption der Schwermetalleinträge außerhalb der Landwirtschaft betrifft die atmosphärischen Depositionen, welche unter anderem auf Emissionen aus der Industrie und dem Verkehr zurückzuführen sind. Die Emissionen und die resultierenden Depositionen wurden bei ESPREME (2008) in einem „Maximum Feasible Technical Reduction Scenario“ berechnet. Die Depositionen des Minderungsszenarios wurden für diese Arbeit zur Berechnung des relativen Minderungspotentials, bezogen auf die gesamten Einträge durch Düngemittel, Pestizide und Depositionen verwendet (vgl. Abbildung 31).

Das relative Minderungspotential ist insbesondere in Kreisen mit geringen Einträgen durch Düngemittel und Pestizide hoch und erreicht bei dem Element Cadmium bis zu 14 % auf Ackerflächen, beim Element Nickel bis zu 36 % und beim Element Blei bis zu 2,8 %.

Abbildung 31: Relative Minderung der Einträge der Elemente Cd (links), Ni (Mitte) und Pb (rechts) durch Reduktion der Depositionen infolge von Emissionsminderungsmaßnahmen [%]



Quelle: Eigene Berechnung

13.4.6 Zusammenfassende Bewertung der Minderungspotentiale der Schwermetalleinträge

Zusammenfassend sollen die Minderungsstrategien durch die Einhaltung der vorgeschlagenen Grenzwerte für Wirtschaftsdünger, Bioabfall und Klärschlamm sowie die Reduktionen der atmosphärischen Depositionen verglichen werden. In der folgenden Tabelle sind die berechneten Minima und Maxima der Reduktionspotentiale auf Kreisebene angegeben sowie die bundesweiten Mittelwerte.

Tabelle 55: Vergleichende Darstellung der Reduktionspotentiale der Schwermetalleinträge [%]

Minderungsstrategie	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Wirtschaftsdünger						
VDLUFÄ (2002) Min - Max Mittelwert	0,0	0,0	0,0 - 1,2 0,5	0,0	0,0	0 - 1,5 0,5
BMVEL UND BMU (2002) Min - Max Mittelwert	0,0	0,0	0,0 - 46,6 25,1	0,0	0,0	0,0 - 28,5 11,2
Bioabfallkompost						
VDLUFÄ (2002) Min - Max Mittelwert	0,0 - 3,5 0,2	0,0 - 0,1 0,0	0,0 - 5,5 0,6	0,0 - 5,9 0,9	0,0 - 0,4 0,1	0,0 - 2,9 0,2
BMVEL UND BMU (2002) Min - Max Mittelwert	0,0 - 12,1 0,4	0,0 - 4,5 0,1	0,0 - 21,7 1,6	0,0 - 10,9 0,6	0,0 - 10,7 0,5	0,0 - 19,2 0,9
Klärschlamm						
VDLUFÄ (2002) Min - Max Mittelwert	0,0 - 1,6 0,2	0,0 - 0,1 0,0	0,0 - 0,0 0,0	0,0 - 0,0 0,0	0,0 - 1,3 0,3	0,0 - 0,6 0,1
BMVEL UND BMU (2002) Min - Max Mittelwert	0,0 - 28,1 2,4	0,0 - 37,4 4,6	0,0 - 47,5 5,7	0,0 - 5,3 0,1	0,0 - 41 7,4	0,0 - 44,7 5,1
Summe der reduzierten Einträge durch Düngemittel						
VDLUFÄ (2002) Mittelwert	0,4	0,1	1,1	0,9	0,4	0,8
BMVEL UND BMU (2002) Mittelwert	2,8	4,7	32,3	0,7	7,9	17,3
Atmosphärische Deposition						
MTFR, ESPREME (2008) Min - Max Mittelwert	2,3 - 13,8 7,9	0,2 - 9,5 1,6		1,2 - 35,6 7,1	0,4 - 7,9 3,4	

Quelle: Eigene Berechnung

Die höchsten relativen Minderungspotentiale werden durch eine verringerte atmosphärische Deposition infolge von Emissionsminderungsmaßnahmen bei den Elementen Cadmium und Nickel ermittelt, während die Verringerung der Grenzwerte gemäß der Vorschläge von BMVEL UND BMU (2002) die höchsten Minderungspotentiale bei Wirtschaftsdüngern und Klärschlämmen für die Elemente Kupfer und Zink ergeben sowie bei Klärschlämmen für die Elemente Chrom und Blei. Der Vorschlag der VDLUFÄ (2002) hat deutlich geringere Effekte auf die berechneten verminderten Schwermetalleinträge. Bei einem Vergleich der Anwendung der reduzierten Grenzwerte gemäß VDLUFÄ (2002) und der verringerten Einträge durch die atmosphärische Deposition gemäß des MTFR-Szenarios (ESPREME, 2008) hat auch bei den Elementen Chrom und Blei eine verringerte atmosphärische Deposition durch Emissionsminderungsmaßnahmen höhere Minderungspotentiale zur Folge als eine Reduktion der Grenzwerte von Wirtschaftsdüngern, Bioabfallkomposten und Klärschlämmen.

13.4.7 Minderungen der Schwermetallausträge durch die Erosion

Um die Erosionen und die damit verbundene Schwermetallverlagerung zu verhindern bzw. zu reduzieren, können folgende Maßnahmen angewandt werden (WISCHMEIER UND SMITH, 1978; SCHWERTMANN, 1977; STONE, 2008):

- Terrassierung der Hänge
- Konturnutzung
- Pfluglose Bodenbearbeitung
- Erhöhung des Anteils des Bodens, der mit Pflanzen bedeckt ist, indem Unterkulturen gepflanzt werden oder eine Begrünung stattfindet
- Mulchen des Bodens

Anhand des EPIC-Modells ist es möglich, die Wirkung einer pfluglosen Bodenbearbeitung auf die Erosionsminderung und die damit einhergehende Minderung der Schwermetallausträge zu berechnen. Die Ergebnisse liegen jedoch nur bei durchschnittlich 0,2 % für die Elemente Cadmium, Kupfer und Zink, bei 0,3 % für die Elemente Chrom und Nickel und bei 0,4 % für das Element Blei.

14 Zusammenfassung

Auf landwirtschaftliche Böden erfolgen Schwermetalleinträge durch Kontaminationen in den ausgebrachten Düngemitteln, durch Wirkstoffe und Verunreinigungen in Pestiziden und durch atmosphärische Depositionen. Schwermetallausträge werden durch die Abfuhr mit der Erntemasse, den Abtrag mit dem erodierten Bodenmaterial und die Verlagerung mit dem Sickerwasser verursacht. Die Saldierungsüberschüsse werden im Boden deponiert und können langfristig zu einer Gefährdung führen.

Das Ziel der Arbeit ist eine Beschreibung der Stoffströme der Schwermetalle Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink sowie eine Bilanzierung derselben. Das Neue an dieser Arbeit ist der Versuch, dies auf Kreisebene unter Anwendung eines Transportkostenminimierungsmodells zu realisieren und eine Unsicherheitsberechnung mittels einer Monte-Carlo-Simulation vorzunehmen sowie die Erosion als eine Ursache der Schwermetallausträge zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der Einträge werden die Nährstoffapplikationsmengen und Nettoausträge organischen Kohlenstoffs je Pflanzenart und Technologie von dem Modell EPIC übernommen und die Ausbringungsmengen organischer und mineralischer Düngemittel auf Grundlage eines Transportkostenminimierungsmodells ermittelt. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Düngeverordnung, der Bioabfallverordnung, der Klärschlammverordnung und der VERORDNUNG (EG) NR. 889/2008.

Um die Höhe des maximal einzubringenden Klärschlammes zu ermitteln, wird die relative Fläche des verfügbaren Ackerlandes berechnet, wobei Naturschutzgebiete, Nationalparks, Wasserschutzgebiete, Uferrandstreifen und Flächen des ökologischen Landbaus berücksichtigt werden.

Die anfallenden Mengen von Wirtschaftsdüngern, Komposten sowie Klärschlämmen werden auf Kreisebene und die an die Landwirtschaft abgegebenen mineralischen Düngemittel auf Bundeslandebene ermittelt. Die Verteilung der Düngemittel wird für eine Berechnung der Ausbringungsmengen der Düngemittel auf Kreisebene genutzt, welche unter Beachtung der Verordnungen, der Nährstoffbedarfe und der Erntemengen in den Kreisen durch eine Minimierung der Transportkosten der Düngemittel erfolgt.

Der Einsatz von Pestiziden und die resultierenden Schwermetalleinträge werden ebenfalls im Modell berücksichtigt und auf die jeweils in den Kreisen angebauten Pflanzenarten bezogen.

Auf Grundlage von Literaturdaten werden die Häufigkeitsverteilungen von Schwermetallkonzentrationen in den landwirtschaftlich genutzten Böden, den Düngemitteln, Pestiziden und den angebauten Pflanzenarten berechnet und fließen in die Unsicherheitsbetrachtung ein.

Die versickernde Schwermetallmenge wird auf Grundlage einer Sorptionsmengenberechnung unter Berücksichtigung der Elementkonzentration im Boden, der Bodenreaktion, des Tongehaltes und der organischen Kohlenstoffkonzentration im Boden sowie der Sickerwassermenge berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wirtschaftsdünger und atmosphärische Depositionen einen wesentlichen Anteil der Einträge ausmachen, während die Erosion insbesondere in Landkreisen mit hohen durchschnittlichen Erosionsmengen die höchsten Schwermetallausträge zur Folge hat. Sowohl die Einträge als auch die Austräge unterscheiden sich in den Anteilen und der Höhe zwischen den Kreisen einiger Bundesländer.

Die berechneten Mediane der Nettoeinträge der Schwermetalle sind in einigen Kreisen unter Berücksichtigung der Erosion als Austragsursache negativ.

Abschließend werden die Modellergebnisse mit Literaturdaten verglichen und Handlungsoptionen für eine Reduktion der Schwermetalleinträge aufgezeigt. Die berechneten Schwermetalleinträge und die Austragsmengen stimmen überwiegend mit Modellergebnissen anderer Studien überein. Abweichungen beruhen zum Teil auf unterschiedlichen verwendeten Methoden, Schwermetallkonzentrationen und darauf, dass in der vorliegenden Arbeit Ein- oder Austragsursachen berücksichtigt wurden, welche in der Vergleichsliteratur unberücksichtigt geblieben sind.

Die Schwermetalleinträge können durch niedrigere Grenzwerte der Schwermetallkonzentration in Düngemitteln oder durch eine Verringerung der atmosphärischen Depositionen infolge eines Einsatzes emissionsarmer Technologien in der Industrie und dem Transportsektor reduziert werden. Je nachdem, welche Reduktionsstrategie im Modell verwendet wurde, ergeben sich unterschiedliche Minderungspotentiale.

Die Einträge von Cadmium und Nickel konnten in dem Modell am deutlichsten reduziert werden, indem die atmosphärischen Depositionen infolge des Einsatzes emissionsarmer Technologien verringert wurden, während bei den Elementen Kupfer und Zink die höchsten durchschnittlichen Reduktionspotentiale durch eine Festsetzung der Grenzwerte der Schwermetalle von Rinder- und Schweinegülle ermittelt wurden.

15 Abstract

Due to contaminations in fertilizers and agents and contaminations in pesticides, heavy metals are brought into agricultural fields and they are deposited from the atmosphere. On the one hand they are absorbed by agricultural crops, so that they are withdrawn from the soil, and on the other hand they are relocated due to erosion and washed out with the seepage water. The balancing surplus is accumulated in the soil and may be harmful in the long term.

The aim of this work is to describe the heavy metal flow of cadmium, chromium, copper, nickel, lead and zinc and the balancing of the inputs and outputs. New about the work is the attempt to realize this on area level, minimizing the transport costs of the fertilizers, to include the soil erosion as a heavy metal output factor and to quantify the uncertainties with a Monte-Carlo-Simulation.

For the purpose of calculating the heavy metal inputs, the nutrient requirements and the netto outputs of organic carbon are taken from the EPIC-model, regarding the crops, HRUs, irrigation and soil management technics. The application amounts of organic and mineral fertilizers are assessed on the basis of a transport cost minimizing model. The German fertilizer regulation (DüV, 2009), the biological waste ordinance (BIOABFV, 2010), the sewage sludge ordinance (ABFKLÄRV, 2010) and the Council Regulation (EC) 889/2008 are considered, including the size of natural protection areas, national parks, water protection areas, buffer strips and organic farming fields.

The produced amounts of farm fertilizers, compost, sewage sludge and mineral fertilizers are allocated according to the regulations, nutrient requirements and the crop yield to the districts by the minimization of the sum of the transport costs in a linear optimization model on area level.

The amounts of the plant specific applied pesticides and the resulting heavy metal inputs are also calculated. Basing on bibliographical references, frequency distributions of the heavy metal concentrations in the agricultural soils, in fertilizers and pesticides are calculated and the uncertainties of the heavy metal inputs of these sources are derived using the Monte-Carlo-Simulation.

Atmospheric depositions of heavy metals and the respective uncertainties are also considered.

The amounts of leaching heavy metals are assessed on the basis of a multiple regression analysis. The element concentration in the soil, the pH-value, the soil type and the proportion of organic matter are relevant isotherm parameters and the amount of leakage water is used to calculate the quantity of leaching heavy metals.

The results indicate that an important share of the heavy metal inputs results from farm fertilizers and atmospheric depositions, while the output of the element removal mainly occurs due to the soil erosion.

The absolute values and shares of inputs and outputs of the heavy metals vary between the districts of some federal states. The calculated medians of the net heavy metal inputs are negative in some districts, if the erosion is considered as an output factor.

In the concluding discussion the underlying data and the results are compared with bibliographical references and courses of action are pointed out.

The results are prevalently consistent with the results of other studies. Some results are distinct from the reported values, depending on the underlying methods, the heavy metal concentrations as well as the considered in- and output factors.

The heavy metal inputs can be reduced if lower threshold values of the heavy metal content in the fertilisers are prescribed or the atmospheric depositions are reduced by the implementation of different technologies in the industry and the transport sector.

The implementation of maximum feasible reduction technologies of emissions in the industry and transport sector is most efficient to reduce the inputs of the elements cadmium and nickel into agricultural fields. The highest average reduction potential of the heavy metal inputs of copper and zinc was calculated by a restriction of the heavy metal concentrations in farm fertilizers.

16 Literatur

- 3N Kompetenzzentrum. 2008. "Biogasinventur 2008 des Niedersächsischen Ministeriums für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt- und Klimaschutz."
- Abdulrahim, S.M., M.S.Y Haddadin, N.H.M. Odetallah und R.K. Robinson. 1999. "Effect of *Lactobacillus acidophilus* and zinc bacitracin as dietary additives for broiler chickens." *British Poultry Science* 40:91–94.
- AbfKlärV. Klärschlammverordnung. 2010. "Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 9 der Verordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1504) geändert worden ist."
- Abreu, M.M., F. Calouro und M.L.V. Fernandes. 2002. "Application of chromium to soils at different rates and oxidation states. II. Influence on uptake of selected nutrients by radish." *Commun. soil sci. plant anal.* 13(13&14):2269–2277.
- Achilles, W. et al. 2001. "Betriebsplanung Landwirtschaft 2001/2002." Darmstadt 2001. Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Datensammlung, 17. Auflage.
- Adiloglu, A. 2002. "The effect of zinc (Zn) application on uptake of cadmium (Cd) in some cereal species." *Arch. Acker- Pfl. Boden.* 48:553–556.
- Adiloglu, A. 2003. "The effect of zinc application on the methods which can be used to determine available iron content of soils." *Archives of Agronomy and Soil Science* 49:275 – 281.
- Alcântara, M.A.K. de und O.A. de Camargo. 2004. "Chromium Movement in Columns of Two Highly Weathered Soils." *Communications in soil science and plant analysis* 35(5 & 6):599–613.
- Alonso, M. López, J.L. Benedito, M. Miranda, C. Castillo, J. Hernández und R. F. Shore. 2000. "Toxic and trace elements in liver, kidney and meat from cattle slaughtered in Galicia (NW Spain)." *Food Additives and Contaminants*, , Vol. , No. , 17(6):447–457.
- Alonso, M. López, J.L. Benedito, M. Miranda, C. Castillo, J. Hernández und R. F. Shore. 2002. "Contribution of cattle products to dietary intake of trace and toxic elements in Galicia, Spain." *Food Additives and Contaminants* 19(6):533–541.
- Andersson, R. 2002. "Der Einfluss von Zinkverbindungen auf die Eutergesundheit." Pp. 81–84 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Angelova, V., K. Ivanov und R. Ivanova. 2004. "Effect of Chemical Forms of Lead, Cadmium and Zinc in Polluted Soils on Their Uptake by Tobacco." *Journal of plant nutrition* 27(5):757–773.
- Antil, R.S., M.K. Mahata und R.P. Narwal. 2006. "Urea hydrolysis and nitrogen transformations in soils containing different lead contents." *Archives of Agronomy and Soil Science* 52(1):69 – 77.
- Antoniadis, V. und B.J. Alloway. 2003. "Evidence of Heavy Metal Movement Down the Profile of a Heavily-Sludged Soil." *Communications in soil science and plant analysis* 34(9&10):1225–1231.
- Antoniadis, V. und B.J. Alloway. 2002. "Leaching of cadmium, nickel and zinc down the profile of sewage sludge-treated soil." *Communications in soil science and plant analysis* 33(1&2):273–286.
- Apgar, G.A. und E.T. Kornegay. 1996. "Mineral balance of finishing pigs fed copper sulfate or a copper-lysine complex at growth-promoting levels." *J. Anim. Sci.* 74:1594–1600.

- Apgar, G.A., E.T. Kornegay, M.D. Lindemann und D.R. Notter. 1995. "Evaluation of copper sulfate and a copper lysine complex as growth promoters for weanling swine." *J. Anim. Sci.* 73:2640-2646.
- Astolfi, S., S. Zuchi und C. Passera. 2003. "Role of sulphur availability on cadmium-induced changes of nitrogen and sulphur metabolism in maize (*Zea mays* L.) leaves." *Journal of Plant Physiology* 161:795–802.
- Baccouch, S., A. Chaoui und E. El Ferjani. 2001. "Nickel toxicity induces oxidative damage in *zea mays* roots." *Journal of plant nutrition* 24(7):1085-1097.
- Bachmann, G., C.G. Bannick und E. Giese. 1997. "Fachliche Eckpunkte zur Ableitung von Bodenkriterien im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes." in: *Bodenschutz-Handbuch* Kennziffer 3500
- Bader, J.L., G. Gonzalez, P.C. Goodell, A.-M. S. Ali und S.D. Pillai. 1999. "Aerobic Reduction of Hexavalent Chromium in Soil by Indigenous Microorganisms." *Bioremediation Journal* 3(3):201–211.
- Baker, A.J.M. 1981. "Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals." *J Plant Nutr* 3:643-654.
- Baldoni, G., L. Cortellini, L. Das Re, P. Matovi und G. Toderi. 2000. "Utilizzazione di fanghi di depurazione in agricoltura." *L'Informatore Agrario - LVI* (19), 2000: 29-33
- Bannick, C. B. 2001. "Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzte Böden. Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes." *KTBL. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL):* 17-27.
- Barceloux, D.G. 1999a. "Copper." *Clinical Toxicology* 37(2):217–230.
- Barceloux, D.G. 1999b. "Zinc." *Clinical Toxicology* 37(2):279–292.
- BBodSchV. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. 2009. "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist."
- Beccaloni, E. und M. Centemero. 2001. "Presenza di microinquinanti metallici in campioni di compost prodotto con matric." *Atti dei seminari Ricicla 2001*, Maggioli editore: 796-803
- Berkelmann-Löhnertz, B., D. Heibertshausen, O. Baus-Reichel, U. Hoffman und R. Kauer. 2008. "Ohne Kupfer geht es nicht – Status quo im ökologischen Weinbau nach vier Jahren BÖL-Verbundprojekt." In Kühne, S., B. Friedrich: *Fachgespräch: Bedeutung von Kupfer für den Pflanzenschutz, insbesondere für den ökologischen Landbau – Reduktions- und Ersatzstrategien*.
- Bibelriether, H., U. Diepolder und B. Wimmer. 1997. "Studie über bestehende und potentielle Nationalparke in Deutschland." Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben 80801134 des Bundesamtes für Naturschutz, Bundesamt für Naturschutz.
- Bien, B. und V. Kühnen. 2001. Unpublished. ACI Bonn, 1999-2001
- Bingham, F.T., A.L. Page, R.J. Mahler und T.J. Ganje. 1975. "Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge." *J. Environ. Qual.* 4, 207–211.
- BioAbfV. Bioabfallverordnung. 2010. "Bioabfallverordnung vom 21. September 1998 (BGBl. I S. 2955), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1504) geändert worden ist " Pp. 2955.
- BMVEL und BMU. 2002. "Gute Qualität und sichere Erträge Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?" Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft sowie Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin

- Bolan, N.S., D.C. Adriano und S. Mahimairaja. 2004. "Distribution and Bioavailability of Trace Elements in Livestock and Poultry Manure By-Products." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 34:291–338.
- Boysen, P. 1992. "Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln – Literaturschau und Analysen." UBA-FB 92-104. Berlin.
- Bradford, G.R., A.L. Page, L.J. Lund und W. Ommstead. 1975. "Trace element concentrations of sewage treatment plant effluents and sludges, their interactions with soils and uptake by plants." *J. Environ. Qual.* 4, 123–127.
- Buchgraber. 2002. "Einsatz von Biokompost als Düngemittel in der Landwirtschaft." final report Bundes-Bodenschutzgesetz, BBodSchG. 1998. "Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten." Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. 2009. "Bioabfallverwertung auf hohem Niveau." Humuswirtschaft und Kompost. H & K aktuell. Ein Informationsdienst der BKG - Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Ausgabe 03/2009.
http://www.kompost.de/fileadmin/docs/HuK/Huk_03_09.pdf. Letzter Zugriff: 07.09.2011
- Burrell, A.L., W.A. Dozier, A.J. Davis, M.M. Compton, M.E. Freeman, P.F. Vendrell und T.L. Ward. 2004. "Responses of broilers to dietary zinc concentrations and sources in relation to environmental implications." *British Poultry Science* 45(2):255–263.
- Calace, N., B.M. Petronio, M. Picciolo und M. Pietroletti. 2002. "Heavy metal uptake by barley growing in polluted soils: relationship with heavy metal speciation in soils." *Commun. soil sci. plant anal.* 33(1&2):103–115.
- Caldwell, C.R. 2001. "Effect of elevated copper on the ultraviolet light-absorbing compounds of cucumber cotyledon and leaf tissues." *Journal of plant nutrition* 24(2):283–295.
- Centemero, M. 1999. "Impiego e commercializzazione del compost da matrici organiche selezionate." *Produzione ed impiego del compost di qualità - Atti del 4° Corso Nazionale di Base*: 221–245.
- Chen, K.L., J.J. Lu, T.F. Lien und P.W.S. Chiou. 2001. "Effects of chromium nicotinate on performance, carcass characteristics and blood chemistry of growing turkeys." *British Poultry Science* 42:399–404.
- Chunilall, V., A. Kindness und S.B. Jonnalagadda. 2004. "Heavy Metal Uptake by Spinach Leaves Grown on Contaminated Soils with Lead, Mercury, Cadmium and Nickel." *Journal of environmental science and health Part B—Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes* B39, No. 3:473–481.
- Coffey, R.D., G.L. Cromwell und H.J. Menegue. 1994. "Efficacy of a copper-lysine complex as a growth promotant for weanling pigs." *J. Anim. Sci.* 72:2880–2886.
- Conti, M. Enrique, F. Cubadda und M. Carcea. 2000. "Trace metals in soft and durum wheat from Italy." *Food Additives and Contaminants* 17(1):45–53.
- Coolong, T.W. und W.M. Randle. 2003. "Zinc Concentration in Hydroponic Solution Culture Influences Zinc and Sulfur Accumulation in Brassica rapa L." *Journal of plant nutrition* 26, No. 5:949–959.
- Cromwell, G.L., T.S. Stahly und H.J. Monegue. 1998. "Tribasic copper chloride and copper sulfate as copper sources for weanling pigs." *J. Anim. Sci.* 76:118–123.
- Cui, H., P. Xi, D. Junliang, L. Debing und Y. Guang. 2004. "Pathology of lymphoid organs in chickens fed a diet deficient in zinc." *Avian Pathology* 33(5):519–524.
- Cui, Y. und Q. Wang. 2005. "Interaction Effect of Zinc and Elemental Sulfur on Their Uptake by Spring Wheat." *Journal of Plant Nutrition* 28:639–649.
- Cutler, J. M. und D.W. Rains 1974. "Characterization of cadmium uptake by plant tissues." *Plant Physiol.* 54, 67–71.

- Dahlhoff, A. 2009. "Biogas in Nordrhein-Westfalen."
<http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/biogas-in-nrw.htm>
- Dardenne, M. und J.M. Bach. 1993. "Rationale for the mechanism of zinc interaction in the immune system." Pp. 501-509 in *Nutrient Modulation of the Immune Response*, edited by S. Cunningham-rundles. New York: Marcel Dekker.
- Dämmgen. 2007. Persönliche Mitteilung.
- Dittrich, B. und R. Klose. 2008. "Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten." Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 3/2008.
http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/3358_1.pdf
- Döhler, H., B. Eurich-Menden, U. Dämmgen, B. Osterburg, M. Lüttich, A. Bergschmidt, W. Berg und R. Brunsch. 2002. "BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010." Forschungsbericht 299 42 245/02.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2071.pdf>
- Döhler, H., H. Eckel, K. Früchtenicht, H.E. Goldbach, V. Kühnen, U. Roth, U. Schultheiß, G. Stefens A. Uihlein und W. Wilcke. 2004. "Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme."
- Dozier, W.A., A.J. Davis, M.E. Freeman und T.L. Ward. 2003. "Early growth and environmental implications of dietary zinc and copper concentrations and sources of broiler chicks." *British Poultry Science* 44(5):726–731.
- Durst, L. 2002. "Strategien zur Reduktion des Spurenelementeintrags in Wirtschaftsdüngern - Probleme bei der praktischen Umsetzung." Pp. 139-143 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- DüV. Düngeverordnung. 2009. "Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 18 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist."
http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/15551/linkurl_0_5_0_0.pdf
- Düwel, O., C.S. Siebner, J. Utermann und F. Krone. 2007. "Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands – Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR."
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Humusgehalte_Bericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Humusgehalte_Bericht.pdf
- EMEP. 2008. "The EMEP grid." <http://www.emep.int/grid/index.html>
- Engle, T.E., V. Fellner und J.W. Spears. 2001. "Copper status, serum cholesterol and milk fatty acid profile in hostein cow fed varying concentration of copper." *J. Dairy Sci.* 84:2308-2313.
- Enzian, S. und B. Golla. 2006. "Klassifizierung des Expositionspotentials von Landwirtschaftsflächen für den durch Abdrift zu erwartenden Eintrag von PSM in Oberflächengewässer." UBA-FB 000945. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3124.pdf>
- ESPREME. 2008. "Estimation of willingness-to-pay to reduce risks of exposure to heavy metals and cost-benefit analysis for reducing heavy metals occurrence in Europe." <http://espreme.ier.uni-stuttgart.de/>
- ESRI. 2009. <http://www.esri.com/software/arcgis/>
- European Communities. 2009. "European Soil Portal Homepage." Joint Research Centre.
<http://eussoils.jrc.it>

- Eurostat. 2007. "The use of plant protection products in the European Union. Data 1992-2003." Eurostat Statistical Books. 2007 Edition.
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-76-06-669/EN/KS-76-06-669-EN.PDF
- Eurostat. 2010. "Europäische Regional- und Städtestatistik. Regionale Agrarstatistiken."
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/region_cities/regional_statistics/data/database
- Flachowsky, G. 2002. "Zum Spurenelementbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere." Pp. 14-22 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Fraker, P.J., M.E. Gershwin, R.A. Good und A. Prasad. 1986. "Interrelationships between zinc and immune function." *Fed. Proc.* 45:1474-1479.
- Francisco, N. De, J.D. Ruiz Troya und E.I. Agüera. 2003. "Lead and lead toxicity in domestic and free living birds." *Avian Pathology* 32:3-13.
- Freimuth, R. 2006. "Modell zur Berechnung der Schwermetallflüsse in der landwirtschaftlichen Ökobilanz. Agroscope FAL Zürich-Reckenholz."
- Früchtenicht, K., J. Heyn, H. Kuhlmann, L. Laurenz und S. Müller, 1993. "Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau.", 12. erweiterte Aufl. Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 280.
- Früchtenicht, K. 2002. "Bilanzierung von Spurenelementen bzw. Schwermetallen in der Geflügelhaltung." in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Fuchs, S., U. Scherer, R. Wander, H. Behrendt, M. Venohr, D. Opitz, T. Hillenbrand, F. Marscheider-Weidemann, T. Götz. 2010. "Calculation of Emissions into Rivers in Germany using the MONERIS Model. Nutrients, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons." Umweltbundesamt. (UBA-FB) 001410/E. <http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4018.html>
- GAMS. General Algebraic Modeling System. 2011. <http://www.gams.com/>
- García, A., F.J. Baquedano, P. Navarro und F.J. Castillo. 1999. "Oxidative Stress Induced by Copper in Sunflower Plants." *Free Rad. Res.*, 31:S45-50.
- Garrett, R.G. 2000. "Natural Sources of Metals to the Environment." *Human and Ecological Risk Assessment* 6(6):945-963.
- Gfe. 1987. "Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 4, Schweine. Frankfurt: DLG-Verlag.
- Gfe. 1994. "Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 5, Pferde. Frankfurt: DLG-Verlag.
- Gfe. 1995. "Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 6, Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Mastriinder." Frankfurt: DLG-Verlag.
- Gfe. 1999. "Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Legehennen und Masthühner (Broiler)." Vol. 7. Frankfurt: DLG-Verlag.
- Gfe. 2001. "Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Milchkühen und Aufzuchttrindern." Vol. 8. Frankfurt: DLG-Verlag.
- GfK. 2007. "Germany Districts 2007." <http://www.gfk-geomarketing.de/landkarten.html>.
- Giller, K. E., E. Witter und S.P. McGrath. 1997. "Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review." *Soil Biology & Biochemistry* 30:1389-1414.
- Govasmark, E., A. Steen, A.K. Bakken, T. Strøm, S. Hansen und A. Bernhoft. 2005. "Copper, molybdenum and cobalt in herbage and ruminants from organic farms in Norway." *Acta Agriculturae Scand Section A* 55:21-30.
- Grafe, A. und H. Westendarp. 2002. "Organisch gebundene Spurenelemente in der Schweinefütterung." Pp. 105-111 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelemen-*

- ten/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Hackenberg, S. und H.R. Wegener 1999. "Schadstoffeinträge in Böden durch Wirtschafts- und Mineraldünger, Komposte und Klärschlamm sowie durch atmosphärische Deposition." Baeza Verlag, D-37213 Witzenhausen.
- Hapke, H.-J. 2002. "Veterinärmedizinische und pharmakologische Aspekte von Spurenelementen und unerwünschten Stoffen." in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Hartmann, H., T. Böhm, und L. Maier. 2000. "Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten." Technische Universität München
- Hettelingh, J.P., J. Sliggers, M. van het Bolcher, H. Denier van der Gon, B.J.Groenenberg, I. Ilyin, G.J. Reinds, J. Slootweg, O. Travníkov, A. Visschedijk und W. de Vries. 2006. "Heavy Metal Emissions, Depositions, Critical Loads and Exceedances in Europe."
- Hillenbrand, T., D. Toussaint, E. Böhm, S. Fuchs, U. Scherer, A. Rudolphi und M. Hoffmann 2005. "Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen" Umweltbundesamt. FB 202 242 20/02
- Hlawiczka, S. und J. Fudala. 2004. "Synthesis Report on Potential and Costs of Abatement Options for Heavy Metals in Europe." ESPREME. <http://espreme.uni-stuttgart.de>
- Hindell, R. und H. Fleige. 1991. "Schwermetalle in Böden der Bundesrepublik Deutschland – geogene und anthropogene Anteile." Berlin: Umweltbundesamt.
- Höher, G. 2008. "Stand und Perspektiven der Biogasnutzung in Niedersachsen." Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung. Plenarsitzung des Biogasforums Niedersachsen 2008 und Biogasfachtagung. http://www.nlt.de/pics/medien/1_1226670535/VTHoeherML.1.pdf
- Imtiaz, M., B.J. Alloway, M.Y. Memon, P. Khan, S.-ul-H. Siddiqui, M. Aslam und S.K.H. Shah. 2006. "Zinc Tolerance in Wheat Cultivars as Affected by Varying Levels of Phosphorus." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37:1689–1702.
- IPE Bonn, Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn. 2001. "Ergebnisse des UBA-Vorhabens "Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben." Veröffentlichung des Abschlussberichtes voraussichtlich Ende 2002."
- Itanna, F. und B. Coulman. 2003. "Phyto-extraction of Copper, Iron, Manganese and Zinc from Environmentally Contaminated Sites in Ethiopia, with Three Grass Species." *Communications in soil science and plant analysis* 34, Nos. 1 & 2:111–124.
- Izaurrealde, R.C., J.R. Williams, W.B. McGill, N.J. Rosenberg und M.C.Q. Jakas. 2006. "Simulating soil C dynamics with EPIC: model description and testing against long-term data.", *Ecol. Model.* 192: 362–384.
- Jansson, G. und I. Öborn. 2000. "Cadmium Content of Swedish Carrots and the Influence of Soil Factors." *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci.* 50:49 - 56.
- Jeroch, H., W. Drochner und O. Simon (Ed.). 1999. "Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere." Ulmer Verlag.
- Kaygorodov, R. 2004. "Bilanzierung von Zink und Kupfer in ausgewählten Agrarökosystemen in Nordniedersachsen." Dissertation. Universität Lüneburg. www.gbv.de/dms/lueneburg/LG/OPUS/2004/255/pdf/roman_promotion.pdf
- Kenbaev, B. und B. Sade. 2002. "Response of field-grown barley cultivars grown on zinc-deficient soil to zinc application." *Commun. soil sci. plant anal.* 33(3&4):533–544.
- Kerschberger, M., G. Franke und W. Schuricht. 2001. "Schwermetallgehalte in landwirtschaftlich relevanten Stoffen." *Arch. Acker- Pfl. Boden*, 46, 147-164.

- Kevresan, S., N. Petrovic, M. Popovic und J. Kandrac. 2001. "Nitrogen and protein metabolism in young pea plants as affected by different concentrations of nickel, cadmium, lead and molybdenum." *Journal of plant nutrition* 24(10):1633-1644.
- Khurana, N., M. V. Singh und C. Chatterjee. 2006. "Copper Stress Alters Physiology and Deteriorates Seed Quality of Rapeseed." *Journal of Plant Nutrition* 29:93–101.
- Kienzle, J., D. Augustin und P. Haug. 2008. "Einsatz und Notwendigkeit von Kupferpräparaten im ökologischen Obstbau." In: Kühne, S., B. Friedrich: *Fachgespräch: Bedeutung von Kupfer für den Pflanzenschutz, insbesondere für den ökologischen Landbau – Reduktions- und Ersatzstrategien*
- Kimbrough, D. Eugene, Y. Cohen, A.M. Winer, L. Creelman und C. Mabuni. 1999. "A Critical Assessment of Chromium in the Environment." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29(1):1–46.
- Kirchmann, H. und P. Widén. 1994. "Separately collected organic household wastes. Chemical composition and composting characteristics." *Swedish Journal of Agricultural Research* 24, 3-12
- Kjølholt, J., C.D. Thomsen und E. Hansen. 1998. "Kilder til tungmetaller og miljøfremmede stoffer i landbrugsjord." Miljø og Energiministeriet, Miljøstyrelsen (Ministry of Environment and Energy, the Danish environmental projection agency)
- Klisch, A. 2003. "Ableitung von Blattflächenindex und Bedeckungsgrad aus Fernerkundungsdaten für das Erosionsmodell Erosion 3D." Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Potsdam, Potsdam.
- Kloke, A. 1985. "Zufuhr von Schwermetallen zum Boden mit Pflanzenschutzmitteln." *Berichte über Landwirtschaft*, 198. Sonderheft Pflanzenschutzmittel und Boden, Verlag Paul Parey, Hamburg, S. 117-122
- Knappe, F., S. Möhler, A. Ostermayer, S. Lazer und C. Kaufmann. 2008. "Vergleichende Auswertung von Schadstoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade." Umweltbundesamt. Forschungsbericht 203 74 275. <http://www.umweltbundesamt.de>
- Koch, H.-J., H. Foth, M. Faulstich, C. von Haaren, M. Jänicke, P. Michaelis und K. Ott. 2008. "Umweltgutachten 2008. Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)"
- Koréneková, B., A. Jacková, J. Kottferová, P. Siklenka, M. Skalická und M. Korének. 2002. "Effect of Vitamin D3 on Cadmium Retention by Laying Hens." *Acta Agric. Scand., Sect. A, Animal Sci.* 52:81–84.
- Korotkewitsch, W.A. 1981. "Untersuchungen zur Korrosion von Metallen in Anlagen der Tierproduktion und Verfahren des Korrosionsschutzes." *Agrartechnik* 31. Jg., H. 6:266-267.
- Körschens, M., J. Rogasik, E. Schulz, H. Böning, D. Eich, R. Ellerbrock, U. Franko, K.-J. Hülsbergen, D. Köppen, H. Kolbe, G. Leithold, I. Merbach, H. Peschke, W. Prystav, J. Reinhold, J. Zimmer, Th. Ebertseder, R. Gutser, J. Heyn und D. Sauerbeck. 2004. "Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland." VDLUFA, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf>
- Kratz, S., W. Kördel, J. Fleckenstein, E. Schnug und Reinhold. 2005. "Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft und Abfallverwertung – Teil Stoffuntersuchungen", Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes
- Kühnen, V. o.A. Unpublished. ACI Bonn, 1999-2001.
- Kühnen, V., B. Bien und H.E. Goldbach. 2002. "Schwermetallbilanzen auf schweinehaltenden Veredlungsbetrieben." In: Schultheiß, U., U. Roth, H. Döhler, H. Schenkel (Eds.): *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*. KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt.
- Kühnen, V. und H.E. Goldbach, 2004. "Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential." Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn,

- Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 118, 213 Seiten.
http://www.usl.uni-bonn.de/docs/frame_pub.html
- KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 2000. "Organische/mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger (Datenbank, Version 1.0)."
- KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 2000b. "Taschenbuch Landwirtschaft 2000/2001." Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.
- KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 2005. "AROMIS. Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems." <http://daten.ktbl.de/aromis/>
- Kuboi, T.A., A. Noguchi und J. Yazaki. 1986. "Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants." *Plant Soil* 92, 405–415.
- LABO. 1998. "Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden." Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. 2. überarbeitete und ergänzte Auflage.
- LABO. 2003. "Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden." Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage.
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. 2009. "Biogasanlagen in Hessen." Stand: Mai 2009.
http://www.hero-hessen.de/cms/upload/fachinformationen/Karte_BGA_Hessen_-_Mai_2009.pdf
- Landwirtschaftskammer NRW. 2009. Biogas-Betreiberdatenbank. Stand 01.05.2009
- Lehoczky, É. und Z. Kiss. 2002. "Cadmium and zinc uptake by ryegrass (*Lolium Perenne* L.) in relation to soil metals." *Communications in soil science and plant analysis* 33(15–18):3177–3187.
- Leible, L, A. Arlt, B. Fürniß, S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, C. Rösch und D. Wintzer. 2003. "Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft - Möglichkeiten, Chancen und Ziele." Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 6882.
<http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2003/leua03a.pdf>.
- LfL. 2011. "Hopfen 2011." LfL Pflanzenbau. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Arbeitsbereich Hopfen Wolnzach-Hüll. Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in den bayerischen Hopfenanbaugebieten; Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Außenstelle Stuttgart und Tettnang; Landsratsamt Bodenseekreis - Landwirtschaftsamt, Friedrichshafen; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Dornburg.
http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/-s/10fw6i44i8yboxb23bsp2hv1f1fimu24/show/1116531_11/gruenes_heft_2011-neu.pdf
- Liebe, F., G. Welp und G.W. Brümmer. 1997. "Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens." Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
- Lien, T-F., Y-M. Horng und K-H. Yang. 1999. "Performance, serum characteristics, carcass traits and lipid metabolism of broilers as affected by supplement of chromium picolinate." *British Poultry Science* 40:357–363.
- Lindemann, M.D. 1999. "Chromium and swine nutrition." *J. Trace Elements Exp. Med.* 12:149–161.
- LUFA Augustenberg, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg und Landesanstalt für Landwirtschaftliche Chemie. Universität Hohenheim. 2001. "Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Baden-Württemberg." Nichtveröffentlichte Daten. Karlsruhe und Stuttgart.
- LUFA Oldenburg, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Oldenburg. 2001. "Ergebnisse des UBA-Vorhabens 'Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben.'"
- Lüpping, W. 2002. "Spurenelementversorgung in der Wiederkäuerfütterung aus Sicht der Beratung." Pp. 85-88 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in*

- Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Lüttich, M., U. Dämmgen, B. Eurich-Menden, H. Döhler und B. Osterburg. 2006. "Calculations of Emissions from German Agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2006 for 2004." In: *Nationaler Inventarbericht 2006 - Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft*. Landbauforschung Völkenrode, SH 291A
- LVLf. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung. Brandenburg. 2000. "Nährstoff- und Schadstoffgehalte in organischen Düngemitteln." <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/detail.php/180868#Schwermetallgehalte%20in%20verschiedenen%20organischen>
- Malburg-Graf, B. und W.-D. Blümel. 2002. "Überprüfung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Bodennutzung in der Region Stuttgart mit Hilfe einer Schwermetallbilanz." Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/PW98202SBer.pdf>
- Messner, J. 2008. "Biogasanlagen in Betrieb in Baden-Württemberg." Persönliche Mitteilung.
- Michalska, M. und H. Asp. 2001. "Influence of lead and cadmium on growth, heavy metal uptake and nutrient concentration of three lettuce cultivars grown in hydroponic culture." *Commun. soil sci. plant anal.* 32(3&4):571–583.
- Microsoft Access. 2003. <http://office.microsoft.com>
- Microsoft Excel. 2003. <http://office.microsoft.com>
- Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. 2011. "Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung und Verbraucherschutz zur Förderung der Erhaltung und Pflege der Kulturlandschaft und von Erzeugungspraktiken, die der Marktentlastung dienen (Marktentlastungs- und Kulturlandschaftsausgleich - MEKA III). 28.02.2011. <http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de>.
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern. 2009. "Biogas-Biomasse-Biokraftstoffanlagen (in Betrieb) von Mecklenburg-Vorpommern." Stand 01.01.2009. http://service.mvnet.de/php/download.php?datei_id=6700
- Mohanna, C. und Y. Nys. 1998. "Influence of age, sex and cross on body concentrations of trace elements (zinc, iron, copper and manganese) in chickens." *British Poultry Science* 39:536–543.
- Mohanna, C. und Y. Nys. 1999. "Effect of dietary zinc content and sources on the growth, body zinc deposition and retention, zinc excretion and immune response in chickens." *British Poultry Science* 40:108–114.
- Möller, A., J. Utermann, V. Hornburg und M. Außendorf. 2005. "Leitfaden zum Umrechnungsprogramm - Methodenvergleich Gesamtgehalte Haupt- und Spurenelemente." Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden. Personenkreis Labormethoden. Technische Realisierung: J. Feinhals.
- Moolenaar, S.W. 1998. "Sustainable Management of Heavy Metals in Agro-ecosystems." Dissertation Thesis, hoogleraar bodemhygiëne en bodemverontreiniging, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen.
- Moustakas, N.K., K.A. Akoumianakis und H.C. Passam. 2001. "Cadmium accumulation and its effect on yield of lettuce, radish and cucumber." *Commun. soil sci. plant anal.* 32(11&12):1793–1802.
- Müller, C., F. Peretzki und K. Rutzmoser. 1993. "Schwermetalle in Wirtschaftsdüngern." - SuB 03/93, III-9 - III-13.
- NLWKN, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. 2005. "Die Beseitigung kommunaler Abwässer in Niedersachsen – Lagebericht 2005."
- Nolting, H.-G. 2003. Persönliche Mitteilung. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Braunschweig
- Oliva, S.R. und B. Valdés. 2004. "Influence of Washing on Metal Concentrations in Leaf Tissue." *Communications in soil science and plant analysis* 35(11 & 12):1543–1552.

- Page, A.L., F.T. Bingham und C. Nelson. 1972. "Cadmium absorption and growth of various plants species as influenced by solution cadmium concentration." *J. Environ. Qual.* 1, 288–291.
- Panagos P., M. Van Liedekerke, A. Jones und L. Montanarella, European Soil Data Centre. 2011. "Response to European policy support and public data requirements." *Land Use Policy*, Article in Press, doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Pecher, H.-P. und V. Melosch. 2002. "Einfluss reduzierter Cu- und Zn-Versorgung auf die Aufzucht-leistung von Ferkeln." Pp. 98-101 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenele-menten/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Perkow, W. und H. Ploss. 1994. "Wirksubstanzen der Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämp-fungsmittel." Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag.
- Persia, M.E., D.H. Baker und C.M. Parsons. 2004. "Tolerance for excess basic zinc chloride and ba-sic copper chloride in chicks." *British Poultry Science* 45(5):672–676.
- Phillips, I.R. 1999. "Copper, Lead, Cadmium and Zinc Sorption By Waterlogged and Air-Dry Soil." *Journal of Soil Contamination* 8(3):343–364.
- Piccinini, S., Rossi, Valli und Cortellini. 1996. "Il compostaggio dei residui zootecnici, dei fanghi di depurazione e della frazio." *RS Rifiuti Solidi*, vol.X, n.1, gennaio-febbraio 1996: 14-20
- Pinamonti, F. et al. 1997. "Heavy Metal Levels in Apple Orchards After the Application of Two Composts." *Commun. Soil. Sci.Plant Anal.*, 28(15&16) (1997): 1403-1419
- Podlesáková, E., J. Nemecek und R. Vácha. 2001. "Mobility and Bioavailability of Trace Elements in Soils." in *Trace Elements in Soil. Bioavailability, Flux and Transfer*, edited by I. K. Iskandar und M. B. Kirkham.
- Potter, S.R., J.D. Atwood, R.L. Kellogg und J.R. Williams. 2004. "An Approach for Estimating Soil Carbon Using the National Nutrient Loss Database." *Environmental Management*. 33(4): 496-506.
- Puschenreiter, M. und O. Horak. 2003. "Slow-Release Zeolite-Bound Zinc and Copper Fertilizers Affect Cadmium Concentration in Wheat and Spinach." *Communications in soil science and plant analysis* 34(1 & 2):31–40.
- Rahman, H., S. Sabreen, S. Alam und S. Kawai. 2005. "Effects of Nickel on Growth and Composi-tion of Metal Micronutrients in Barley Plants Grown in Nutrient Solution." *Journal of Plant Nutrition* 28:393–404.
- Ramachandran, V. und T.J. D'Souza. 2002. "Plant uptake of cadmium, zinc and manganese from four contrasting soils amended with Cd-enriched sewage sludge." *Journal of environmental science and health. Part A—Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* A37(7):1337–1346.
- Rattan, R.K., S.P. Datta, P.K. Chhonkar, K. Suribabu und A.K. Singh. 2005. "Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater - a case study." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109:310-322.
- Renard, R.K., G.R. Foster, G.A. Weesies und J.P. Porter. 1991. "RUSLE. Revised Universal Soil Loss Equation." *Journal of Soil and Water Conservation* 46(1)
- Renard, R.K., G.R. Foster, D.C. Yoder und D.K. McCool. 1994. "RUSLE revised: status, questions, answers, and the future." *Journal of Soil and Water Conservation* 49(3).
- Reinhold, G. 2005. "Biogasanlagen in Thüringen." <http://www.tll.de/ainfo/pdf/bgas0505.pdf>
- Renhållningsverks-Föreningen, S., C11. 1993. "Composting of source-separated organic household waste." Swedish Environmental Protection Agency, Report 4193
- Richter, G. 1998. "Bodenerosion und Kulturlandschaft." Pp. 83-94 in *Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*, edited by G. Richter. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchge-sellschaft.
- Riesen, O. und U. Feller. 2005. "Redistribution of Nickel, Cobalt, Manganese, Zinc and Cadmium via the Phloem in Young and Maturing Wheat." *Journal of Plant Nutrition* 28:421–430.

- Röhling, I. und U. Keymer. 2007. "Biogasanlagen in Bayern 2006. Ergebnisse einer Umfrage." LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_26925.pdf
- Ros, M., J.A. Pascual, J.L. Moreno, M.T. Hernandez und C. Garcia. 2009. "Evaluation of Microbial Community Activity, Abundance and Structure in a Semiarid Soil Under Cadmium Pollution at Laboratory Level." *Water, Air, & Soil Pollution*
- Roth, U., U. Schultheiß, H. Döhler, H. Eckel, V. Kühnen, K. Früchtenicht und A. Uihlein. 2002. "Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern." Pp. 50-58 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Ruiz, J.A., A.M. Pérez-Vendrell und E. Esteve-Garcia. 2000. "Effect of dietary iron and copper on performance and oxidative stability in broiler leg meat." *British Poultry Science* 41:163–167.
- Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. 2008. "Biogasanlagen von landwirtschaftlichen Betrieben in Sachsen." Stand 01.03.2008.
http://www.smul.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/3242_3246.htm
- Satyakala, G., 1997. "Studies on the effect of heavy metal pollution on Pistia stratiotes (water lettuce)." *Indian J. Environ. Health* 39, 1–7.
- Schenkel, H. 2002a. "Minderungsmöglichkeiten und Konsequenzen für Produktqualität, Leistung, Gesundheit und Umwelt." Pp. 131-138 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Schenkel, H. 2002b. "Stoffwechseleffekte und Umweltwirkungen einer gezielten Spurenelement-supplementierung." Pp. 31-35 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Schlott, W. 2004. "Schutzgebiete, Waldwirkungen & Forstwirtschaft vor dem Hintergrund veränderter klimatischer Bedingungen. Rechtliche Regelungen – Expertenvoten – Statistische Daten – Simulationskonzept." Dissertation, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am, Technischen Universität München, München.
- Schmid, E., J. Balkovic und R. Skalsky. 2007. "Biophysical impact assessment of crop land management strategies in EU25 using EPIC." In: Stolbovoy V., L. Montanarella und P. Panagos (Eds.), *Carbon Sink Enhancement in Soils of Europe: Data Modelling, Verification*. JRC Scientific and Technical Reports, 160-183; European Communities, Luxembourg
- Schmid, E. 2011. Persönliche Mitteilung.
- Schmidt, J. 1998. "Modellbildung und Prognose zur Wassererosion." Pp. 137-151 in *Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*, edited by G. Richter. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Schönhart, M., T. Schauppenlehner, E. Schmid und A. Muhar 2010. "Integration of bio-physical and economic models to analyze management intensity and landscape structure effects at farm and landscape level." *Agricultural Systems*, 104: 122-134
- Schönhart, M., E. Schmid und U. Schneider. 2011. "CropRota - A crop rotation model to support integrated land use assessments" *European Journal of Agronomy*, 34(4), 2011: 263-277
- Schultheiß, U., H. Döhler, H. Eckel, A. Uihlein und W. Wilcke. 2002. "Bilanzierung von Spurenelementen bzw. Schwermetallen in der Milchviehhaltung." Pp. 59-65 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).

- Schweder, P., H.-E. Kape und B. Boelcke. 2004. "Düngung - Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis - Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung." Herausgeber: Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. <http://www.mv-regierung.de/lm/doku/duengebroschuere.pdf>
- Schwertmann, U. 1977. "Bodenerosion." International Journal of Earth Sciences, Vol. 66, No. 1:770-782.
- Severin, K., W. Köster und Y. Matter. 1991. "Zufuhr von Anorganischen Schadstoffen in Agrarökosysteme mit mineralischen Düngemitteln, Wirtschaftsdüngern, Klärschlämmen und Komposten. VDLUFA-Schriftenreihe 32 (Kongreßband 1990); S. 387 - 391
- Severin, K., H.-C. Scharpf und P. Rieß. 2001. "Vorschläge zur Harmonisierung von Schwermetallgrenzwerten von Düngemitteln." In: KTBL. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. *Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes*. S. 85-93.
- Severin, K. 1996. "Rückstände der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte als Sekundärrohstoffdünger." VDLUFA-Schriftenreihe 44:85-101.
- Severin, K. 2006. "Schwermetalle und Spurenelemente: Regionale Ergebnisse und Zeitverlauf im Vergleich mit anderen Düngemitteln." Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover. Expertentagung 2006 im BMU, Bonn. www.bmu.de
- Severin, K. 2007. "Schwermetalle und Spurenelemente: Regionale Ergebnisse und Zeitverlauf im Vergleich mit anderen Düngemitteln." In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): *Perspektiven der Klärschlammverwertung. Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung*. Darmstadt: KTBL. KTBL-Schrift 453, S. 14-22.
- Sharma, R.K. und M. Agrawal. 2006. "Single and Combined Effects of Cadmium and Zinc on Carrots: Uptake and Bioaccumulation." Journal of Plant Nutrition 29:1791–1804.
- Skalsky, R., Z. Tarasovicová, J. Balkovic, E. Schmid, M. Fuchs, E. Moltchanova, G. Kindermann und P. Scholtz. 2008. "GEO-BENE global database for biophysical modeling v. 1.0. Concepts, methodologies and data."
- Skrivan, M., V. Skrivanova, M. Marounek, E. Tumova und J. Wolf. 2000. "Influence of dietary fat source and copper supplementation on broiler performance, fatty acid profile of meat and depot fat and on cholesterol content in meat." British Poultry Science 41:608–614.
- Sovcikova, E., M. Ursinyova, L. Wsolova, V. Rao und M. Lustik. 1997. "Effects on the mental and motor abilities of children exposed to low levels of lead in bratislava." Toxic Substance Mechanisms 16(3):221-236.
- Spurgeon, D., P. Rowland, G. Ainsworth, P. Rothery, S. Long und H.I.J. Black. 2007. "Geographical and pedological drivers of distribution and risks to soil fauna of seven metals (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, V and Zn) in British soils." Environmental Pollution, 153 (2), p.273-283
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011. "Bevölkerungsstand: Bevölkerung nach Geschlecht - Stichtag 31.12. - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011a. "Landwirtschaftliche Betriebe mit Ackerland und deren Ackerfläche nach Fruchtarten - Erhebungsjahr - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011b. "Landwirtschaftliche Betriebe und landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF) n. Kulturarten - Erhebungsjahr - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011c. "Landwirtschaftliche Betriebe und landwirtschaftlich genutzte Fläche nach der Art der Bewirtschaftung - Erhebungsjahr - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011d. "Landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung - Stichtag: 03.05 - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>

- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011e. "Öffentl. Abwasserentsorgung - Klärschlamm, Entsorgungsarten des Klärschlammes - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011f. "Hektarerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Feldfrüchte - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." Wiesbaden. <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2011g. "Gebietsstand: Gebietsfläche in qkm - Stich-tag 31.12. - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte." <https://www.regionalstatistik.de>
- Statistisches Bundesamt. 2004. "Statistik der Wasserversorgung in der Landwirtschaft." Wiesbaden. <http://www.destatis.de>
- Statistisches Bundesamt. 2008. "Umwelt - Abfallentsorgung 2006." Fachserie 19 Reihe 1. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt. 2009. "Umwelt - Nichtöffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. 2007." Fachserie 19 (Reihe 2.2).
- Statistisches Bundesamt. 2010. " Düngemittelversorgung - Fachserie 4 Reihe 8.2 - Wirtschaftsjahr 2009/2010." Fachserie 4 / Reihe 8.2. Wiesbaden. <http://www.destatis.de>
- Statistisches Bundesamt. 2010b. "Umwelt - Abfallentsorgung 2008." Fachserie 19 Reihe 1. Wiesbaden
- Stone, R. 2008. "Universal Soil Loss Equation." Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/00-001.htm>
- Süßenbach, D., R. Behrend, E. Elöst, R. Donau, B. Wronski, J. Tessmann, H. Schulert, K. Kumm, W. Näser, R. Reeck, I. Klonek, J. Beetz, E. Lentz, P. Lantzs, E. Rohde, R. Wildgrube, Schnaak und Köhler. 2001. "Untersuchungen zur Kompostqualität im Land Brandenburg." Fachbeiträge des Landesumweltamtes. Heft-Nr. 65. http://www.brandenburg.de/cms/media.php/2320/lu_a_bd65.pdf
- Symader, W. 1998. "Bodenerosion und Gewässerbeschaffenheit." Pp. 51-60 in *Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*, edited by G. Richter. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Szabó, L. und L. Fodor. 2006. "Uptake of Microelements by Crops Grown on Heavy Metal-Amended Soil." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37:2679–2689.
- Thiel, U., E. Weigand, P.P. Hoppe und F.-J. Schöner. 1993. "Zinc retention of broiler chickens as affected by dietary supplementation of zinc and microbial phytase." in 8th International Symposium on Trace Elements in Man and Animals. Tema.
- TLL. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2006. "Merkblatt zur handschriftlichen Berechnung einer betriebsbezogenen Humusbilanz." Abteilung Agrarökologie, Ackerbau und Grünland, Abteilung Untersuchungswesen. Jena.
- Travnikov, O. und I. Ilyin. 2007. "ESPREME - Estimation of willingness-to-pay to reduce risks of exposure to heavy metals and cost-benefit analysis for reducing heavy metals occurrence in Europe. Workpackage 04: Atmospheric modelling of HM concentrations."
- UBA, Umweltbundesamt. 2001. "Schwermetalle im Niederschlag (Schwermetall-Screening, wet-only), Jahresdepositionssummen."
- UBA, Umweltbundesamt. 2004. "Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieb." UBA-Texte 06/04
- Utermann, J., G. Meyenburg, S. Altfelder, H.-E. Gäbler, W.H.M. Duijnsveld, A. Bahr und T. Streck. 2005. "Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser auf der Grundlage chemischer und physikalischer Pedotransferfunktionen." Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Universität Hohenheim.
- Vaisvalavicius, R., A. Motuzas, I. Prosycevas, L. Levinskaite, D. Zakarauskaite, K. Grigaliuene und V. Butkus. 2006. "Effect of heavy metals on microbial communities and enzymatic activity in soil column experiment." *Archives of Agronomy and Soil Science* 52(2):161 – 169.

- VDLUFA, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. 2002. "Stellungnahme des VDLUFA zur Konzeption von BMVEL und BMU vom Juni 2002 - Gute Qualität und sichere Erträge. Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?"
- Verordnung (EG) Nr. 889/2008. 2008. "Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/ biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle."
- Verougstraete, V., D. Lison und P. Hotz. 2003. "Cadmium, lung and prostate cancer: a systematic review of recent epidemiological data." *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B*(6):227–255.
- Vries, W. de, P.F.A.M. Römken, T. van Leeuwen und J.J.M. van Bronswijk. 2001. "Dynamics in the accumulation and leaching of heavy metals in agro-ecosystems."
- Walther, M. und W. Übelhör. 1999. "Die Entwicklung der Schwermetallgehalte in landwirtschaftlich genutzten Klärschlämmen von Baden-Württemberg seit 1984." Richtwerte, Vorsorgewerte und Grenzwerte - Bedeutung für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt; öffentliche Sitzungen des 111. VDLUFA-Kongr. Halle/Saale vom 13. - 17. Sept. 1999, VDLUFA-Schriftenreihe 1999, 52: 521-524, Darmstadt (VDLUFA-Verlag)
- Wang, X., X. He, J.R. Williams, R.C. Izaurralde und J.D. Atwood. 2005. "Sensitivity and uncertainty analyses of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC." In: *Transactions of the ASABE*, 48(3):1041-1054. 2005.
- Wedekind, K.J., A.E. Hortin und D.H. Baker. 1992. "Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate and zinc oxide." *J. Anim. Sci.* 70:178-187.
- Weigel, H.J. und H.M. Helal. 2001. "Schwermetalle." Pp. 101-148 in *Terrestrische Ökosysteme*, edited by R. Guderian. Bader, Damm, Kröner, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wendland, M., M. Diepolder und P. Capriel. 2011. "Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland." Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), Würzburg/Veitshöchheim, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft (ZIEL), Freising-Weihenstephan, Zentralinstitut für Ernährungs- und Lebensmittelforschung Abteilung Bioanalytik, Freising-Weihenstephan.
http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_24402.pdf
- Wilcke, W. und H. Döhler. 1995. "Schwermetalle in der Landwirtschaft." KTBL Arbeitspapier 217.
- Williams, J.R. 1995. "The EPIC model." in *Computer Models of Watershed Hydrology*, edited by V.P. Singh. Water Resources Publications, Colorado (1995), pp. 909–1000.
- Windisch, W. und F.X. Roth. 2002. "Leistungsfördernde Wirksamkeit überhöhter Kupfermengen im Ferkelfutter: Einfluss der Menge und chemischen Verbindung des Kupfers sowie der Gegenwart anderer leistungsfördernder Futterzusätze." Pp. 144-148 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Windisch, W. 2002. "Organische contra anorganische Zink- und Kupferverbindungen in der Schweinefütterung." Pp. 89-97 in *Fütterungsstrategien zur Vermeidung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*, edited by U. Schultheiß, U. Roth, H. Döhler und H. Schenkel. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Wischmeier, W.H. und D.D. Smith 1978. "Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning." USDA Handbook 537. U.S. Department of Agriculture.

- Witte, H., R. Mönicke und T. Langenohl. 1997. "Schadstoffbilanzierung auf Ackerböden." *Abwassertechnik*. 1997(6): 19-23
- Wood, L.J. 2005. "MPA Global: A database of the world's marine protected areas. Modified version for inclusion on WDPA CD. UNEP-WCMC & WWF."
- Wu, F. und G. Zhang. 2002. "Alleviation of cadmium-toxicity by application of zinc and ascorbic acid in barley." *Journal of plant nutrition* 25(12):2745–2761.
- Wu, F., G. Zhang und J. Yu. 2003. "Interaction of Cadmium and Four Microelements for Uptake and Translocation in Different Barley Genotypes." *Communications in soil science and plant analysis* 34(13 & 14):2003–2020.
- Ye, Z., P. Jiang und Q. Xu. 2006. "Use of Composting Manure to Improve Plant Iron and Zinc." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37:2577–2593.
- Zhang, G., M. Fukami und H. Sekimoto. 2002. "Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage." *Field Crops Research* 77:93–98.
- Zhang, L. und F.B. Song. 2006. "Effects of Forms and Rates of Zinc Fertilizers on Cadmium Concentrations in Two Cultivars of Maize." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37:1905–1916.
- Zhao, Z.Q., Y.G. Zhu, S.E. Smith und F.A. Smith. 2005. "Cadmium Uptake by Winter Wheat Seedlings in Response to Interactions Between Phosphorus and Zinc Supply in Soils." *Journal of Plant Nutrition* 28:1569–1580.
- Zörner, D. 2010. "Prognose des Schwermetallhaushaltes von Landschaften mit dem Modell ATOMIS." *Boden und Landschaft. Schriftenreihe zu Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie*. Band 53. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen
- Zurayk, R.A., N.F. Khoury, S.N. Talhouk und R.Z. Baalbaki. 2001. "Salinity - heavy metal interactions in four salt-tolerant plant species." *Journal of plant nutrition* 24(11):1773–1786.

17 Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Held, bei Dr. Schneider und Herrn Prof. Dr. Schenkel für die Unterstützung bei der Dissertation bedanken.

Die für diese Arbeit bedeutenden und freundlicherweise von Frau Dr. Kratz bereitgestellten Daten zu Schwermetallkonzentrationen in Wirtschaftsdüngern haben mir sehr geholfen. Sehr wichtig waren auch die Angaben bezüglich der biologischen Behandlungsanlagen auf Länderebene des Statistischen Bundesamtes, für die ich Herrn Weinert, Frau Stratmann, Frau Kaiser, Frau Stute und Frau Firmenich danken möchte. Einen besonderen Dank möchte ich an Frau Schneider-Götz richten, die mich bezüglich der Strategie zur Verteilung der Düngemittel beraten hat und Herrn Messner, der mir bezüglich der Gärückstände wertvolle Hinweise gegeben hat.

Stefan Kühne und Gerhard Joermann möchte ich für die hilfreichen Hinweise bezüglich des Pestizideinsatzes insbesondere im ökologischen Landbau danken.

Frau Uhse und Frau Bieber vom UBA möchte ich für die Unterstützung bei der Suche nach Daten zur atmosphärischen Depositionen danken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Deller, der mir wichtige Informationen zu Schwermetallkonzentrationen gegeben und bei Herrn Dämmgen, der mir wichtige Daten zur Tierhaltung zur Verfügung gestellt hat. Frau Thelen-Jüngling hat mich freundlich beim Auffinden von Studien zum Kompostanfall in Deutschland unterstützt. Herrn Utermann möchte ich für die Ratschläge bezüglich der Versickerungsmengen und der atmosphärischen Depositionen danken.

Christa Müller hat mir bei der Suche nach Hintergrundgehalten von Schwermetallen geholfen, wofür ich ebenfalls sehr dankbar bin.

Besonders danke ich natürlich all jenen, die mich während der Zeit des intensiven Arbeitens begleitet haben, insbesondere meinen Eltern und Alex Spencer für die Hilfe beim Korrigieren.