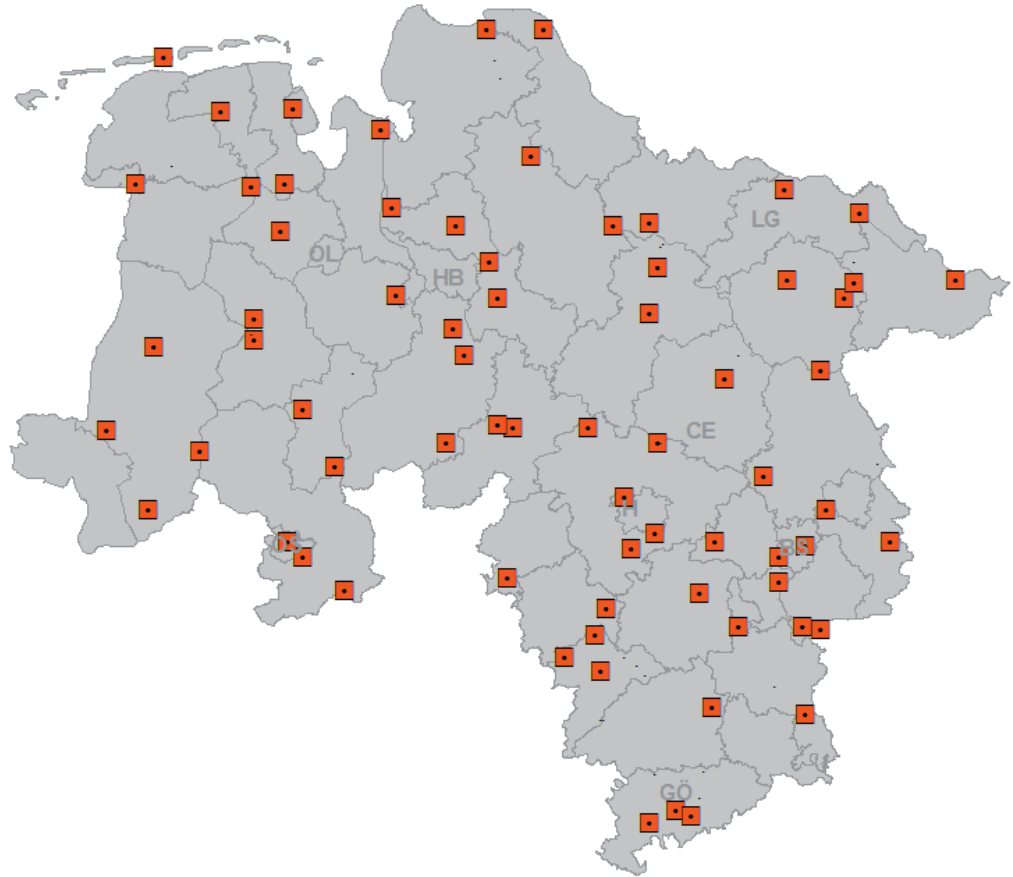


GeoBerichte 30



LANDESAMT FÜR
BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE



Schwermetallein-
und -austräge
niedersächsischer Boden-
Dauerbeobachtungsflächen



Niedersachsen



GeoBerichte 30

Landesamt für
Bergbau, Energie und Geologie

Schwermetallein- und -austräge niedersächsischer Boden- Dauerbeobachtungsflächen

DÖRTE KAMERMANN, HUBERT GROH &
HEINRICH HÖPER

Hannover 2015

Impressum

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stilleweg 2
30655 Hannover
Tel. (0511) 643-0
Fax (0511) 643-2304

Download unter www.lbeg.niedersachsen.de

1. Auflage.

Version: 02.07.2015

Redaktion: Ricarda Nettelmann
e-mail: bodenkundlicheberatung@lbeg.niedersachsen.de

Titelbild: Lage der Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen.

ISSN 1864–6891 (Print)

ISSN 1864–7529 (digital)

DOI 10.48476/geober_30_2015

GeoBer.	30	S. 3 – 56	4 Abb.	29 Tab.	Anh.	Hannover 2015
---------	-----------	-----------	--------	---------	------	---------------

Schwermetallein- und -austräge niedersächsischer Boden-Dauerbeobachtungsflächen

DÖRTE KAMERMANN, HUBERT GROH & HEINRICH HÖPER

Kurzfassung

Da Schwermetalle persistent sind und Schadstoffe im Boden sein können, wird ihnen im Bodenschutz eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen werden in regelmäßigen Abständen die Schwermetallgehalte der Böden untersucht, um zeitliche Veränderungen feststellen zu können. Die Ursache für diese Veränderungen sind Ungleichgewichte zwischen den Schwermetalleinträgen in die Böden durch Düngung und Deposition und den Schwermetallausträgen aus den Böden mit dem Erntegut und durch Auswaschung mit dem Sickerwasser. Schwermetallbilanzen, als Differenz aus Ein- und Austrägen, helfen, die Ursachen für Veränderungen der Bodengehalte zu finden, aktuelle Veränderungen der Bodengehalte nachzuvollziehen sowie zukünftige Veränderungen zu prognostizieren.

Im vorliegenden Bericht wurden für 20 Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) die mittleren Ein- und Austräge der Elemente Arsen, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei und Zink zwischen der Grundinventur (Jahr der Einrichtung der BDF) und der ersten Wiederholungsinventur (nach ca. 10 Jahren) ermittelt. Die Flächen wurden nach unterschiedlichen Belastungstypen ausgewählt, u. a. aufgrund historischer Belastung im Boden und potenzieller aktueller Belastung durch die Nähe zu Siedlung und Industrie sowie durch den Einsatz belasteter Dünge- oder Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft.

Es zeigt sich, dass vor allem bei Kupfer und Zink die maximal zulässige zusätzliche Fracht über alle Eintragspfade nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV 1999) auf einzelnen BDF überschritten wird. Dies gilt für Flächen, auf denen kupferhaltige Pflanzenschutzmittel bzw. kupfer- und zinkhaltige organische Düngemittel eingesetzt werden.

Für Arsen gibt es derzeit keine Vorsorgewerte für den Boden, und es sind keine maximal zulässigen zusätzlichen Frachten definiert. Die hier ermittelten Arseneinträge und Arsenbilanzen können als Referenz zur Bewertung von Arseneinträgen dienen und bei einer möglichen Weiterentwicklung der Bodenschutzgesetzgebung herangezogen werden.

Es wird prognostiziert, dass bei den festgestellten Schwermetallgehalten im Boden der Dauerbeobachtungsflächen und bei Fortsetzung der aktuellen Einträge auf einigen Flächen bereits nach 50 bis 200 Jahren die Vorsorgewerte im Boden für Kupfer und Zink erreicht werden. Bei Cadmium, Nickel und Blei ist die Lage deutlich entspannter, wenngleich auch hier in der Regel positive Schwermetallbilanzen, d. h. höhere Ein- als Austräge, beobachtet werden.

Eine Verarmung saurer Sandböden an den landwirtschaftlich bedeutsamen Mikronährstoffen Kupfer und Zink lässt sich derzeit nicht ableiten, auch wenn einige Standorte schwach negative Bilanzen aufweisen. Dennoch sollte vor allem auf nicht mit Schweinegülle gedüngten Sandböden die Verfügbarkeit dieser Mikronährstoffe und ihre Auswaschung genauer untersucht werden.

Inhalt

	Vorwort.....	5
1	Einleitung.....	6
2	Methoden.....	7
2.1	Flächenauswahl und Untersuchungszeitraum.....	7
2.2	Bilanzierung der Aus- und Einträge von Schwermetallen.....	10
2.3	Ermittlung der Schwermetallentzüge.....	10
2.3.1	Entzüge durch die Ernte.....	10
2.3.2	Entzüge durch das Sickerwasser.....	15
2.3.3	Entzüge durch Erosion.....	16
2.4	Ermittlung der Schwermetalleinträge.....	16
2.4.1	Schwermetalleinträge durch Mineraldünger.....	16
2.4.2	Schwermetalleinträge durch organische Düngemittel.....	17
2.4.3	Pflanzenschutzmittel.....	21
2.4.4	Deposition.....	21
3	Ergebnisse.....	23
3.1	Schwermetallbilanzen.....	23
3.1.1	Schwermetallein- und -austräge im Betrachtungszeitraum.....	23
3.1.2	Bilanzsalden der Belastungs- und Referenzflächen im Vergleich.....	29
3.2	Austräge von Schwermetallen mit dem Sickerwasser.....	33
4	Diskussion.....	35
4.1	Schlussfolgerungen für den Bodenschutz.....	35
4.2	Schlussfolgerungen für die Landwirtschaft.....	38
4.3	Schlussfolgerungen für das BDF-Programm.....	38
5	Literatur.....	41
6	Anhang.....	45

Vorwort

Geologisch bedingt sind Schwermetalle in allen Böden und Gesteinen in meist geringen Konzentrationen vorhanden. Sie können aber auch durch den Menschen in die Böden eingebracht werden und sich dort anreichern. Über die Pflanzen oder durch das Grundwasser (Trinkwassernutzung) können sie in den Ernährungskreislauf von Mensch und Tier gelangen. Werden bestimmte Konzentrationen überschritten, kann dies negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Es gibt daher gesetzliche Regelungen, die den Eintrag von Schwermetallen in den Boden und die zulässigen Höchstwerte unter Beachtung des Vorsorgeprinzips regeln, so beispielsweise das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG 1998).

Bodenveränderungen laufen meist sehr langsam (schleichend) ab und können daher nur durch kontinuierliche Beobachtungen über Jahrzehnte hinweg diagnostiziert werden. Wenn schädliche Bodenveränderungen unbemerkt voranschreiten, könnte dies zu einer ökologisch und ökonomisch brisanten und irreversiblen Beeinträchtigung der Lebensgrundlagen führen. Somit ist es unabdingbar, schädliche Veränderungen genauestens zu beobachten.

In Niedersachsen wird vor den Hintergrund eines vorsorgenden Bodenschutzes bereits seit 1991 das Langzeitprojekt „Boden-Dauerbeobachtung“ betrieben. Dieses Programm ermöglicht es, langfristige Bodenveränderungen frühzeitig zu erkennen und warnt so rechtzeitig vor schädlichen Entwicklungen. Um Veränderungen des Bodens zu registrieren, werden dabei eine Vielzahl von bodenkundlichen Arbeitstechniken wie Kartierung, Feldmessung, Laboranalytik und Modellierung eingesetzt. In regelmäßigen Abständen werden Boden- und Sickerwasserproben u. a. auf Schwermetalle untersucht; so können eventuelle Anreicherungen bzw. Auswaschungen verfolgt werden. Ein- und Austräge von Schwermetallen werden bilanziert. Daraus ergeben sich frühzeitig Hinweise, welche Veränderungen (Trends) der Schwermetallgehalte im Boden zu erwarten sind. Werden mehr Schwermetalle ein- als ausgebracht, reichern sie sich im Boden an und können auf Dauer die festgelegten Grenzwerte überschreiten. Bei Bedarf können rechtzeitig Maßnahmen zur Verminderung der Einträge ergriffen werden.

Ziel des Monitoringprogramms ist es, mögliche Bodenveränderungen aufzudecken, Ursachen und Auswirkungen zu bewerten und zu prognostizieren. Gelingt dies, steht den Handelnden in Politik, Verwaltung und Bodennutzung rechtzeitig eine gesicherte Datengrundlage für ihre Entscheidungsprozesse zur Verfügung.

Andreas Sikorski

Präsident des Landesamtes für Bergbau,
Energie und Geologie



1 Einleitung

Schwermetalle zählen zu den anorganischen Schadstoffen in der Umwelt, da sie in die Nahrungskette gelangen und durch ihre Neigung zur Akkumulation toxisch auf Pflanzen, Tiere und Menschen wirken können (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Zwar sind einige Schwermetalle, als Bestandteile von Enzymen oder Vitaminen, Mikronährelemente und daher essenziell (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Se und Zn), dennoch sind sie in größeren Mengen, wie die nicht essenziellen Schwermetalle (Pb, Cd, Ni, Hg), toxisch (SCHNEIDER 1999, HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Die meisten Schwermetalle verbleiben in der Regel sehr lange im Boden (Ausnahme Cadmium), eine Belastung ist irreversibel (BARTELS, GROH & KLEEFISCH 1997). Dennoch besteht unter Umständen die Gefahr einer Mobilisierung, die unter anderem vom Bindungsmedium (z. B. Tonminerale), von der Bodenart, vom Wassergehalt (Redoxbedingungen) und vom pH-Wert abhängig ist (BLUME 2004). Aufgrund ihres Gefahrenpotenzials zielen verschiedene Gesetze und Verordnungen auf die Minimierung von Schwermetalleinträgen (z. B. BImSchG 2002, BzBlG 1971, DÜMV 2008, ABFKLÄRV 1992). Dadurch konnten zwar in den letzten Jahren die Einträge erheblich reduziert werden, dennoch kann es zu einer Akkumulation von Schwermetallen in Böden kommen (PLUQUET & KLEEFISCH 2001).

Ziel des Bodenschutzes ist es, die Gehalte von Schadstoffen, wie z. B. Schwermetallen, langfristig möglichst nicht ansteigen zu lassen und deren Mobilität dauerhaft einzuschränken, damit Störungen der natürlichen Bodenfunktionen ausgeschlossen werden können. Für eine Beschreibung und Bewertung der Situation bzw. für eine Prognose ist es methodisch sinnvoll, Stoffein- und Stoffausträge zu bilanzieren. (PLUQUET & KLEEFISCH 2001). Der Bilanzierungsansatz bietet darüber hinaus die Möglichkeit, geeignete Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis zu bestimmen (KELLER, ROSSIER & DESAULES 2005), was von großer Bedeutung ist, da für die Erzeugung qualitativ hochwertiger Nahrungs- und Futtermittel ein gesunder und leistungsfähiger Boden die Voraussetzung ist (KUES & BARTELS 1997). Für die Bilanzierung müssen alle Bilanzglieder ausreichend genau und in entsprechender zeitli-

cher Auflösung dokumentiert werden (PLUQUET & KLEEFISCH 2001).

In der vorliegenden Studie wurden Ein- und Austräge für Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink für ausgewählte Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Niedersachsen berechnet. Arsen zählt zwar zu den Halbmetallen, wird hier aber aufgrund des Eintragspfades (Abwasserverrieselung, Düngemittel) und seiner langen Verweildauer im Boden gemeinsam mit den ausgewählten Schwermetallen betrachtet. Die Datenbasis wurde im Rahmen des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms erhoben, das 1991 auf Grundlage von Kabinettsbeschlüssen der niedersächsischen Landesregierung von 1985 und 1990 (KUES & BARTELS 1997) in Kooperation mit der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, der LUFA Nord-West und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) begonnen wurde (KLEEFISCH 2001). Ziel der Boden-Dauerbeobachtung ist es, den jeweils aktuellen Zustand des Bodens zu beschreiben und langfristige Veränderungen bzw. belastungs- und nutzungsspezifische Einflüsse zu dokumentieren. Darüber hinaus können Prognosen getroffen, Vorsorgemaßnahmen frühzeitig entwickelt und Vorschläge für eine Aktualisierung gesetzlicher Grundlagen entwickelt werden (KUES & BARTELS 1997, SEIFERT 2001, KUES & MEESENBURG 2001, SCHÄFER & KLEEFISCH 2001, PLUQUET & KLEEFISCH 2001).

Bis zum Jahre 2000 wurden insgesamt 90 BDF eingerichtet, von denen sich 70 auf landwirtschaftlich genutzten Standorten (BDF-L) und 20 unter Wald (BDF-F) befinden. Die BDF unter Wald wurden aus Vorläuferprogrammen der Waldökosystemforschung in das Boden-Dauerbeobachtungsprogramm übernommen (KLEEFISCH 2001). Bei der Auswahl der Boden-Dauerbeobachtungsflächen spielten sowohl geowissenschaftliche (Geologie, Bodentyp, Klima) als auch nutzungs- und belastungsbezogene Kriterien eine Rolle (KUES & BARTELS 1997, FORTMANN et al. 2007).

Für die vorliegende Studie wurden nur ackerbaulich genutzte Belastungs- bzw. Referenzstandorte gewählt. Die Belastungsflächen sind BDF, die historisch einer Belastung ausgesetzt waren (aktuell hohe Schwermetallgehalte im Boden) oder auf denen aktuell hohe Schwer-

metalleinträge aus der Luft bzw. durch Düngemittel erwartet werden können. Referenzflächen weisen entsprechend geringe Schwermetallgehalte auf bzw. es wird davon ausgegangen, dass es aufgrund geringer Schwermetalleinträge nicht zu einer Akkumulation im Boden kommen kann.

Die im Rahmen des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms erfassten Daten wurden genutzt, um die Ein- und Austräge von Schwermetallen zu quantifizieren und zu bilanzieren, dabei standen folgende Fragen im Mittelpunkt:

- Wie hoch sind die Entzüge durch die Ernte und der Austrag durch das Sickerwasser?
- Wie hoch sind die Schwermetalleinträge durch Mineraldünger, organischen Dünger und Pflanzenschutzmittel?
- Wie hoch sind die durchschnittlichen jährlichen Frachten?
- Unterscheiden sich die Frachten je nach Belastungssituation?

Eine Bewertung der Veränderung der Boden-gehalte zwischen den Inventuren über die Bilanzen lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht realisieren, da die Wiederholungsinventuren noch nicht auf allen Flächen durchgeführt wurden. Dennoch sollte exemplarisch, anhand von wenigen BDF, der Frage nachgegangen werden, inwieweit die quantifizierten Frachten zu einer Veränderung des Bodengehalts führen könnten bzw. wann theoretisch der Vorsorge-wert überschritten werden würde. Diese Fragen sind im Sinne des nachhaltigen Bodenschutzes besonders relevant.

2 Methoden

2.1 Flächenauswahl und Untersuchungszeitraum

Von den 45 ackerbaulich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) wurden neun Belastungs- und elf Referenzflächen ausgewählt (Tab. 1). Die Belastungssituation der Böden auf den Belastungsflächen kann historisch verursacht sein (durch Bergbau bedingte Schwermetalleinträge in die Okeraue), was sich heute in entsprechenden Schwermetallgehalten im Boden dokumentiert, oder auf aktuell erhöhten Einträgen beruhen. Diese erhöhten Einträge können zum einen durch Deposition, aufgrund der Nähe zu Emittenten (Verkehr, Industrie und Siedlung) und zum anderen durch Düngung erfolgen. Den Belastungsflächen wurden elf Referenzflächen zugeordnet (Tab. 1), die a priori nur eine ubiquitäre bzw. geogene Grundbelastung aufweisen. Eine Referenzfläche ist zwei Belastungsflächen zugeordnet (B021GROE). Die Zuordnung von Referenzflächen zu den Belastungsflächen erfolgte zu Beginn des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms nach bodengenesischen Gesichtspunkten auf Grundlage der dritten Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODENKUNDE 1982, vgl. Tab. 2).

Vier der Flächen sind sogenannte Intensiv-BDF, auf denen, neben dem Standarduntersuchungsprogramm, Messungen zur Erfassung des Bodenwasserhaushaltes und der Stoffverlagerung mit dem Sickerwasser erfolgen (KLEEFISCH 2001).

Tab. 1: Belastungsflächen mit einer vorhandenen (fett) bzw. potenziellen Schwermetallbelastung und ihren zugeordneten Referenzflächen (GI: Jahr der Grundinventur, WI: Jahr der Wiederholungsinventur).

Belastungsflächen				Referenzflächen			
BDF	GI	WI	Bemerkung	BDF	GI	WI	Bemerkung
B002DRUE	1995	2005	Nähe zu Industrieanlagen	B043OLDE	1997	2007	
B016TETE	1993	2001	Klärschlammasbringung	B039HAND	1995	2006	
B027BARR	1997	2008	Klärschlammasbringung	B052SUES	1997	2008	
B031VINN	1993	2002	Nähe zu Stadtgebiet und Flughafen	B046RODE	1998	2008	
B032MARK	1993	2003	Kupferbelastung durch Schweinegülle	B021GROE	1998	2008	Biolandanbau
B033DINK	1993	2003	Kupferbelastung durch Schweinegülle				
B037SCHL	1995	2005	historische Belastung (Okeraue)	B012BUEH	1992	2001	
B045RIDD	1995	2005	Biolandanbau, Nähe zum Stadtgebiet	B003EHME	1994	2004	
B067LIST	1999	2010	Kompostausbringung	ohne zugeordnete Referenzfläche			
ohne zugeordnete Belastungsflächen				B049GLIS	1995	2005	Intensiv-BDF
				B064HOHE	1999	2009	Intensiv-BDF
				B010UESE	1997	2007	Intensiv-BDF
				B051REIH	1996	2007	Intensiv-BDF

Tab. 2: Bodentyp, Bodenart und pH-Wert der Belastungs- und Referenzflächen im Vergleich. Daten wurden im Rahmen der Grundinventur erhoben.

BDF	Flächentyp	Bodentyp	Bodenart	pH-Wert
B002DRUE	Belastungsfläche	Tschernosem-Parabraunerde	U	7,3 ±0,0
B043OLDE	Referenzfläche	Pseudogley-Parabraunerde	U	7,0 ±0,1
B016TETE	Belastungsfläche	Podsol-Braunerde	S	5,6 ±0,1
B039HAND	Referenzfläche	Podsol-Braunerde	S	5,2 ±0,1
B027BARR	Belastungsfläche	Parabraunerde	U	6,0 ±0,1
B052SUES	Referenzfläche	Pseudogley-Bänderparabraunerde	U	6,3 ±0,3
B031VINN	Belastungsfläche	Gley	L	5,3 ±0,1
B046RODE	Referenzfläche	Gley-Pseudogley	T	6,5 ±0,2
B032MARK	Belastungsfläche	Podsol, verglejt	S	4,7 ±0,1
B033DINK	Belastungsfläche	Gley-Podsol	S	4,7 ±0,1
B021GROE	Referenzfläche	Podsol	S	5,3 ±0,1
B037SCHL	Belastungsfläche	Gley-Auenboden	T	7,5 ±0,1
B012BUEH	Referenzfläche	Auenpseudogley-Auenboden	T	6,9 ±0,1
B045RIDD	Belastungsfläche	Pseudogley-Braunerde	S	6,1 ±0,1
B003EHME	Referenzfläche	Pseudogley	S	6,4 ±0,0
B067LIST	Belastungsfläche	Tiefer Umbruchboden	S	5,2 ±1,3
B010UESE	Referenzfläche/Intensiv-BDF	Pseudogley-Podsol	S	6,2 ±0,1
B049GLIS	Referenzfläche/Intensiv-BDF	Podsol-Braunerde	S	5,1 ±0,2
B051REIH	Referenzfläche/Intensiv-BDF	Pelosoil	T	7,0 ±0,2
B064HOHE	Referenzfläche/Intensiv-BDF	Braunerde	S	5,6 ±0,3

Tab. 3: Bodenart und Schwermetall-Gesamtgehalte (Königswasserextrakt, mg/kg) im Ap-Horizont der Flächen bei der Grundinventur. Mittelwerte der vier Kernflächen. Werte mit Überschreiten der Vorsorgewerte nach BBodSchV (1999) sind fett markiert.

BDF	Bodenart	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
B002DRUE	U	7,7	0,15	23,2	11,8	0,10	13,4	33,4	50,9
B003EHME	S	1,7	0,01	2,7	2,6	0,07	2,7	12,7	19,2
B010UESE	S	1,3	0,29	10,2	6,8	0,08	1,5	11,7	22,9
B012BUEH	T	8,0	0,01	23,0	13,5	0,06	19,5	22,7	53,9
B016TETE	S	1,8	0,50	5,2	8,6	0,04	1,8	17,9	16,7
B021GROE	S	1,6	0,20	7,4	10,0	0,15	0,9	10,9	26,6
B027BARR	U	2,5	0,01	9,4	4,7	0,12	2,3	12,5	28,9
B031VINN	L	7,2	0,41	14,7	21,1	0,25	9,0	51,2	62,2
B032MARK	S	1,2	0,18	7,9	12,0	0,06	1,1	9,3	12,9
B033DINK	S	0,9	0,06	5,9	9,9	0,05	1,4	6,4	15,4
B037SCHL	T	53,7	12,6	21,8	406	1,28	32,0	3 350	3 569
B039HAND	S	2,4	0,01	6,1	8,2	0,06	2,0	14,5	21,6
B043OLDE	U	5,7	0,08	14,5	8,7	0,18	12,6	30,9	56,2
B045RIDD	S	3,4	0,01	7,7	7,0	0,06	5,2	22,2	36,3
B046RODE	T	7,1	0,01	19,4	6,8	0,18	7,8	17,3	29,0
B049GLIS	S	3,1	0,01	7,7	4,7	0,04	2,7	12,9	24,6
B051REIH	T	10,8	0,01	25,3	21,1	0,11	30,9	22,2	73,8
B052SUES	U	2,7	0,01	11,5	9,9	0,20	3,4	17,4	26,8
B064HOHE	S	1,4	0,11	4,5	2,5	0,02	2,7	10,5	14,8
B067LIST	S	2,7	0,05	8,0	2,5	0,02	1,9	6,2	10,6

Das Standarduntersuchungsprogramm, welches bei KLEEFISCH & KUES (1997) detailliert beschrieben ist, sieht vor, dass, entsprechend der langsamen Entwicklung von Böden, Bodenuntersuchungen alle zehn Jahre in sogenannten Inventuren wiederholt werden. Bei der ersten Inventur, der sogenannten Grundinventur, wurden Profilgruben bis 1 m Tiefe ausgehoben und beprobt. Die Wiederholungsinventuren beinhalten die Beprobung der Ackerkrume (0–30 cm) bzw. der Grünlandnarbe (0–20 cm) sowie von 1 m mächtigen Bohrkernen auf den vier Kernflächen (16 x 16 m) einer BDF (Gesamtgröße = 1 ha). Neben dem Nährstoffgehalt wird der Boden auf Radioaktivität und Schadstoffe wie Schwermetalle, Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Dioxine untersucht. Fortlaufend wird eine Schlagkartei geführt, die sämtliche Aktivitäten (Bearbeitung, Saat, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte) auf der BDF dokumentiert.

Das Standard-Untersuchungsprogramm ist auf den Belastungs- und Referenzflächen um die Analyse des Ernteguts sowie der organischen Dünger auf Nähr- und Schadstoffe erweitert.

Die Bilanzen wurden für den Zeitraum zwischen der Grund- und Wiederholungsinventur (durchschnittlich zehn Jahre, vgl. Tab. 1) erstellt. Steht die Wiederholungsinventur noch aus, wurden alle Daten seit der Grundinventur bis einschließlich 2006 berücksichtigt.

2.2 Bilanzierung der Aus- und Einträge von Schwermetallen

Für jede der in Kapitel 2.1 genannten Flächen wurde eine Bilanz der Schwermetallausträge und der Schwermetalleinträge erstellt. Die einzelnen Bilanzglieder sind in Abbildung 1 beschrieben.

Schwermetall-Bilanz	
Soll (Einträge)	Haben (Austräge)
organische Düngung	Ernteentzüge
mineralische Düngung	Austräge mit dem Sickerwasser*
Deposition	Erosion**
ggf. Saldo	ggf. Saldo
Summe Einträge	Summe Austräge

Abb. 1: Glieder der Schwermetall-Bilanz
(* in der vorliegenden Studie nur exemplarisch bzw. ** nicht betrachtet).

Der sich ergebende Saldo gibt Aufschluss über die Situation auf der Fläche: Ist der Saldo negativ, werden dem System mehr Schwermetalle entzogen als zugeführt. Ist der errechnete Saldo dagegen positiv, übersteigen die Einträge die Entzüge. Ob in diesem Fall tatsächlich eine langfristige Akkumulation von Schwermetallen stattfindet, lässt sich über die Bodengehalte feststellen, die im Rahmen der Wiederholungsinventuren ermittelt werden.

Es wurden Bilanzen für den Zeitraum zwischen der Grund- und Wiederholungsinventur bzw. zwischen der Grundinventur und 2006 erstellt. Hierfür wurden alle Einträge zwischen den Inventuren summiert und mit der Gesamtsumme der Entzüge verrechnet. Aus den Summenwerten wurden mittlere jährliche Einträge und Entzüge von Schwermetallen berechnet und bilanziert. Auf der Austragsseite wurde die Erosion nicht quantifiziert. Die Entzüge durch das Sickerwasser wurden exemplarisch für vier Standorte berechnet (Kap. 2.3.2).

2.3 Ermittlung der Schwermetallentzüge

2.3.1 Entzüge durch die Ernte

Der Entzug von Schwermetallen über die Pflanze kann über zwei Pfade erfolgen: zum einen durch eine systemische Aufnahme von Schwermetallen über die Wurzel und zum anderen über eine Verschmutzung der Pflanzenoberfläche durch anhaftenden schwermetallbelasteten Boden. Der Kontaminationspfad über die Wurzel wird bestimmt von der Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle und der Pflanzenart. Die Pflanzenverfügbarkeit ist u. a. abhängig vom pH-Wert. Cadmium und Zink sind mobiler und werden überwiegend systemisch aufgenommen, während Blei und Arsen eher immobil im Boden vorliegen, so dass eine Aufnahme über die Wurzel eine untergeordnete Rolle spielt. Weizen entzieht dem Boden beispielsweise mehr Cadmium als Roggen. Die Aufnahme ist beim Weizen darüber hinaus auch sortenspezifisch bedingt (FORTMANN et al. 2007).

Methoden der Ertragsermittlung und Probennahme von Erntegut

Die Erträge für jede BDF werden entweder von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und/oder vom Bewirtschafter der Fläche bestimmt. Ermittelt wird jeweils die Menge an Biomasse, die von der Fläche abgefahren wird (KRUSE, SEVERIN & THOLEN 1997). Pflanzenteile, die auf der Fläche verbleiben und eingearbeitet werden, bleiben dabei unberücksichtigt (z. B. Stroh, Rübenblätter, Kartoffelkraut).

Die Ernteermittlung durch den Bewirtschafter erfolgt entweder aufgrund von Wägung oder durch seine Schätzung. Die so gewonnen Erntemengen beschreiben den Frischsubstanz-Ertrag für die 1 ha große BDF in dt/ha. Es wird kein Probenmaterial für Nähr- und Schadstoffanalysen entnommen. Die Erträge werden in der Schlagkartei erfasst.

Die Probennahme durch die Landwirtschaftskammer ist bei BARTELS, GROH & KLEEFISCH (1997) detailliert beschrieben: Die Ernteertragsbestimmung (in kg/ha) erfolgt kurz vor der Ernte in sechsfacher Wiederholung je Kernfläche gesondert. Die Größe der Entnahmeflächen auf den Kernflächen unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Fruchtart (Tab. 4). Die gemessenen Erträge werden im Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS®) dokumentiert.

Tab. 4: Ertragsermittlung und Probenentnahme je Fruchtart durch die Landwirtschaftskammer Niedersachsen (modifiziert nach BARTELS, GROH & KLEEFISCH 1997).

Fruchtart	Ertragsermittlung	beprobte Fläche	Probennahme
Getreide	Entnahmeflächen (sechs je Kernfläche, 24 je BDF) parallel zu den Drillreihen. Wägung des Materials je Entnahmefläche, ggf. auch Stroh, wenn dieses abgefahren wird.	Länge: 1 m, Breite: abhängig vom Reihenabstand, ≥ 1 m, Σ je BDF: ≥ 24 m ² .	Trennung des Probenmaterials ggf. in Korn und Stroh. Analysiert wird eine Mischprobe je Kernfläche (= vier Proben je BDF).
Raps	Bis 2000: Ertragsermittlung durch die LWK mittels Mahd der vier Kernflächen mit Standardmähdröschler. Seit 2000: Ertragsermittlung durch den Bewirtschafter.	Bis 2000: Σ je BDF 1 024 m ² . Seit 2000: gesamte BDF (= 1 ha).	Bis 2000: Mischprobe (1/2 kg), entnommen aus Drusch der vier Kernflächen. Seit 2000: Mischprobe (1/2 kg), entnommen aus dem Drusch des Schlags.
Silomais	Je Kernfläche sechs nicht benachbarte und zufällig verteilte Maisreihen; Pflanzen werden 5 cm über den Boden abgeschnitten. Wägung des Materials pro Reihe.	Länge der beprobten Maisreihen: 3 m, Reihenabstand: 0,75 m, Σ je BDF: 54 m ² .	Je Kernfläche eine Mischprobe aus 12 repräsentativen Maispflanzen (inkl. Kolben, je Reihe zwei Pflanzen).
Körnermais	Wie Silomais, geerntet werden nur die Kolben.	Wie Silomais.	Je Maisreihe werden die Kolben gesammelt (= 24 Proben), Ermittlung des Korngewichts. Anschließend Herstellung von Mischproben je Kernfläche für Analyse.
Kartoffeln/ Gemüse	Je Kernfläche sechs nicht benachbarte und zufällig verteilte Gemüse-reihen; Wägung pro Reihe, ggf. auch Blätter, wenn diese abgefahren werden.	Länge der beprobten Gemüsereihen: 4 m, Reihenabstand: 0,75 m, Σ je BDF: 72 m ² .	Je Kernfläche (sechs Reihen) wird eine Mischprobe eines bestimmten Gewichts gezogen (z. B. 5 kg (frisch) Kartoffeln).
Zucker-rüben	Wie Kartoffeln.	Länge der beprobten Zuckerrübenreihen: 4 m, Reihenabstand: 0,5 m, Σ je BDF: 48 m ² .	Je Kernfläche eine Mischprobe aus 12 repräsentativen Zuckerrüben (je Reihe zwei Pflanzen).
Zwischen-früchte	Sechs Entnahmeflächen je Kernfläche; Wägung je Entnahmefläche.	Entnahmefläche: 1 m ² , Σ je BDF: 24 m ² .	Je Kernfläche eine Mischprobe von 5 kg (frisch).

Methoden der Schwermetallgehaltsbestimmung im Erntegut

Im Rahmen der jährlichen Ertragsermittlung durch die Landwirtschaftskammer Niedersachsen wird auf den Belastungs- und Referenzflächen Probenmaterial für Nähr- und Schadstoffanalysen gewonnen (Tab. 4). Je nach Lage der BDF ist für die Analyse das Labor Oldenburg oder Hameln der LUFA Nordwest zuständig. Hier erfolgt auch die Aufbereitung der Proben. Die angewandten Methoden richten sich nach dem VDLUFA-Methodenbuch in den Ausgaben von 1995 (Probenaufbereitung) bzw. 1976 (für

die Schwermetallanalyse). Die Vorgehensweise der Probenaufbereitung ist in Tabelle 5 und die Methoden der Schwermetallgehaltsbestimmung sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Pflanzenteile, die zur unmittelbaren Verwertung vorgesehen sind, werden gewaschen, so dass anhaftender Boden oder Staub entfernt wird. Dies betrifft Gemüse und Zuckerrüben. Raps, Mais und Getreide werden vor der Analyse nicht gewaschen. Analysiert wird auch nur das Material, das zur weiteren Verwertung vorgesehen ist. Die Proben für Getreide entsprechen dem Druschergebnis des Mähdeschers, je nach Art enthalten die Proben Spelzen (z. B. Wintergerste).

Tab. 5: Probenaufbereitung der Pflanzenproben (TR: Trockenrückstand).

Frucht	Aufbereitung	Methode
Getreide, Mais	<ul style="list-style-type: none"> • Drusch, Gewichtsfeststellung, • Herstellung der Analyseproben, • Vermahlung: 0,5 mm (ggf. Vortrocknung), • TR: nach Zerkleinerung bei 105 °C; wenn Wassergehalt > 17 %, dann Vortrocknung bei 60 °C, • Trocknung der Analyseproben bei 40–60 °C. 	Richtlinie für die Durchführung der besonderen Ernteermittlung und
Raps	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtsfeststellung, • Herstellung der Analyseproben, • TR: nach Zerkleinerung bei 105 °C, • Trocknung der Analyseproben bei 40–60 °C. 	VDLUFA-Methodenbuch, Band II (1995)
Gras, Stroh, Rübenblatt, Silomais	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtsfeststellung, • Herstellung der Analyseproben, • Zerkleinerung auf 1 mm, • TR: nach Zerkleinerung bei 105 °C, • Trocknung der Analyseproben bei 40–60 °C. 	
Zuckerrüben, Kartoffeln	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtsfeststellung, • Herstellung der Analyseproben, • TR: nach Zerkleinerung bei 105 °C, • Trocknung der Analyseproben bei 40–60 °C. 	

Tab. 6: Methoden der Ermittlung der Schwermetallkonzentration [mg/kg] in Pflanzen.

Element	Aufschluss	Messmethode	Grundlage
As (Arsen)	Nassveraschung Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Hydridsystem)	VDLUFA-Methodenbuch, Band III (1976)
Cd (Cadmium)	Nassveraschung Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Graphitrohr)	
Cu (Kupfer)	Lösen der Asche nach Veraschung in Salzsäure oder Aufschluss mit Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Graphitrohr)	
Ni (Nickel)	Nassveraschung Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Graphitrohr)	
Pb (Blei)	Nassveraschung Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Graphitrohr)	
Zn (Zink)	Lösen der Asche nach Veraschung in Salzsäure oder Aufschluss mit Perchlorsäure/Salpetersäure	AAS (Flamme)	

Ermittlung der Entzüge durch die Ernte

Zur Ermittlung der Entzüge durch die Ernte wurden zunächst die Erträge in einer Datenbank zusammengestellt. Die Daten wurden für die einzelnen Kernflächen geführt, da es auf einigen BDF zeitweise eine kernflächenspezifische Bewirtschaftung, vor allem durch Anbau unterschiedlicher Kulturen, gegeben hat. Damit die von der Landwirtschaftskammer ermittelten Erträge mit den Angaben des Bewirtschafters abgeglichen werden konnten, mussten die Daten jeweils bereinigt werden. Der von der Landwirtschaftskammer in kg/ha (trocken) vor der eigentlichen Ernte ermittelte Ertrag wurde um einen fruchtspezifischen Ernteverlustfaktor (Tab. 7) korrigiert, da es bei der Ernte in der Praxis, im Gegensatz zur Ertragsfeststellung durch die Landwirtschaftskammer, zu Ernteverlusten kommt, die nicht als Ernteentzug gewertet werden können. Die Raps-erträge bedürfen keiner Korrektur durch einen Ernteverlustfaktor, da die Ertragsermittlung seit 2000 ausschließlich durch den Bewirtschaftler erfolgt. Auch die Raps-erträge vor dem Jahr 2000 müssen nicht korrigiert werden, da die Ertragsermittlung durch einen Standardmäh-drescher erfolgte und daher der Ernte durch den Bewirtschaftler entspricht.

Tab. 7: Mittlere fruchtspezifische Ernteverlustfaktoren.

Gruppe	Ernteverlustfaktor
Gemüse	0,2
Getreide	0,1
Gras	0,1
Gründünger	0,1
Mais	0,2
Zuckerrüben	0,1
Gemenge: Getreide	0,1
Gemenge: Getreide/Gründünger	0,1

Die vom Bewirtschaftler ermittelten Erträge wurden anhand von durchschnittlichen Wassergehalten je Fruchtart auf Trockensubstanz umgerechnet (Anhang, Tab. 30).

Da nicht für alle abgefahrenen Ernterückstände (Stroh, Blätter) Ertragsdaten vorlagen, wurden fehlende Werte anhand des Korn : Stroh-Verhältnisses (KTBL 2005) geschätzt (Tab. 8).

Tab. 8: Faustzahlen Korn : Stroh-Verhältnis (KTBL 2005).

Frucht	Korn : Stroh-Verhältnis ¹⁾
Ackerbohnen	2,0
Erbsen	1,4
Hafer	1,2
Mais	1,3
Öllein	1,8
Saatwicken	1,5
Sojabohnen	1,4
Sommergerste	1,1
Sommerraps	2,0
Sommerroggen	1,6
Sommerweizen	1,0
Wintergerste	1,0
Winterraps	1,7
Winterroggen	1,4
Wintertriticale	1,4
Winterweizen	0,9
Zuckerrüben	0,8

¹⁾ Verhältnis von Erntegut (Korn, Bohne, Zuckerrübe) zu Ernterückstand, Erntegut = 1.

Die von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen ermittelten Erträge wurden für die Berechnung der Schwermetallentzüge durch die Pflanze prioritär genutzt, da sie für jede Kernfläche einzeln erfasst worden sind. Lagen keine exakten Ertragserhebungen der Landwirtschaftskammer vor, wurden die Informationen der Schlagkartei herangezogen (Angaben der Bewirtschaftler) und den Kernflächen zugeordnet. Auf Flächen ohne Ertragsangaben für einzelne Wirtschaftsjahre wurde eine Schätzung durchgeführt. Diese konnte im konkreten Fall BDF-spezifisch erfolgen, d. h. es wurde der mittlere Ertrag für die jeweilige Fruchtart aus anderen Jahren herangezogen. Dieses war nur für eine BDF notwendig: Für B064HOHE lagen keine Angaben für die Zuckerrüben-erträge von 1999 vor, so dass das arithmetische Mittel aller Kernflächen dieser BDF von 2003 angenommen wurde.

Mit der Zusammenstellung der Ertragsdaten lagen für alle Belastungs- und Referenzflächen kernflächenspezifisch die Erträge je Wirtschaftsjahr innerhalb des Zeitraums zwischen der Grundinventur und der Wiederholungsinventur bzw. bis einschließlich 2006 vor (Abb. 2).

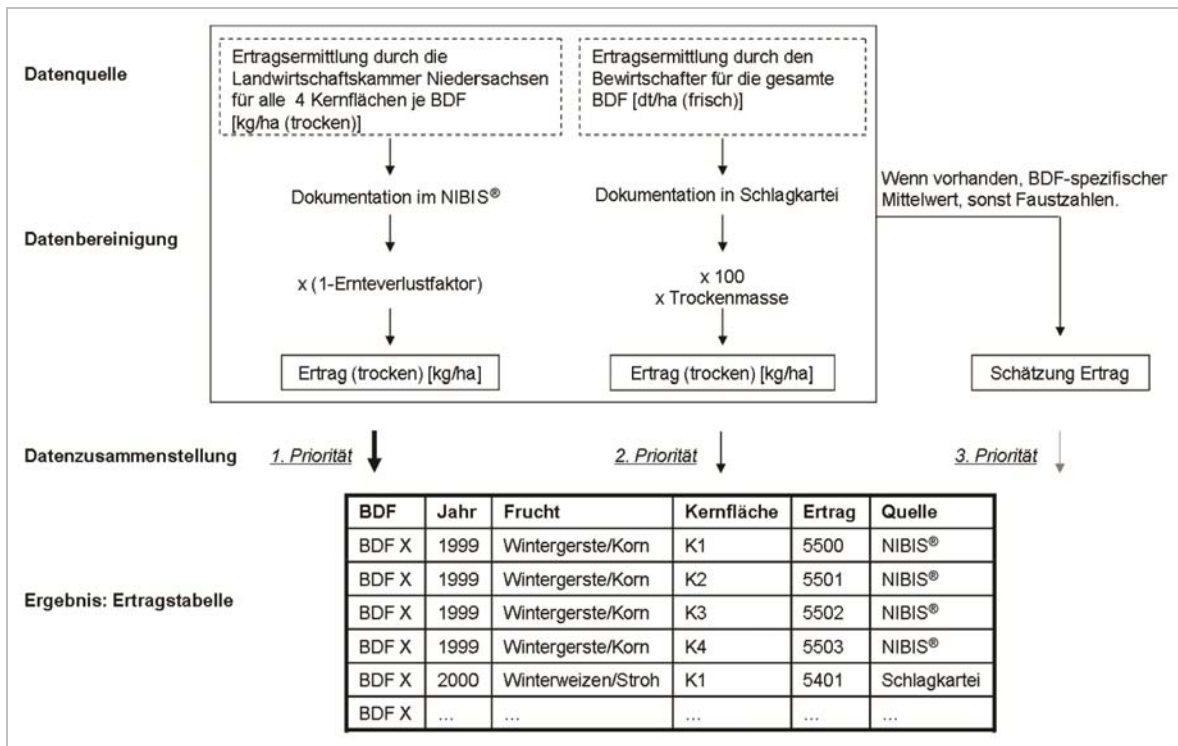


Abb. 2: Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der Erträge für die Ermittlung der Entzüge durch die Ernte.

Die Trockenmasseerträge wurden mit den Schwermetallgehalten im Erntegut zu Entzügen in g/ha verrechnet.

Die Schwermetallgehalten im Erntegut ergaben sich prioritär aus den im Boden-Dauerbeobachtungsprogramm vorgenommenen Analysen. Lagen die Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze, wurde die halbe Nachweisgrenze angenommen. Da nur für zwei Drittel der Datensätze Schwermetallgehalten vorlagen, mussten fehlende Daten geschätzt werden. Soweit vorhanden, wurden BDF-spezifisch Schwermetallgehalten für die jeweilige Fruchtart aus anderen Jahren arithmetisch gemittelt und übernommen. Falls dieses nicht möglich war, wurde der fruchtspezifische arithmetische Mittelwert aller BDF genutzt. Für die Schätzung

der Arsengehalte wurden nur Analysen des LUFA-Labors Hameln herangezogen, da dort messtechnisch eine größere Genauigkeit gegeben ist (Nachweisgrenze < 0,01 mg/kg), als bei der LUFA Oldenburg (Nachweisgrenze < 0,25 mg/kg). Auch hier wurde zunächst BDF-spezifisch ein arithmetischer Mittelwert gebildet. Falls dies nicht möglich war, wurde ein arithmetischer Mittelwert der Frucht, unabhängig von der BDF, berechnet (Abb. 3).

Die kernflächenspezifischen Entzüge wurden dann zu gesamten Entzügen je BDF summiert. Außerdem wurde ein mittlerer jährlicher Entzug für den Zeitraum zwischen den Inventuren bzw. von der Grundinventur bis einschließlich 2006 errechnet.

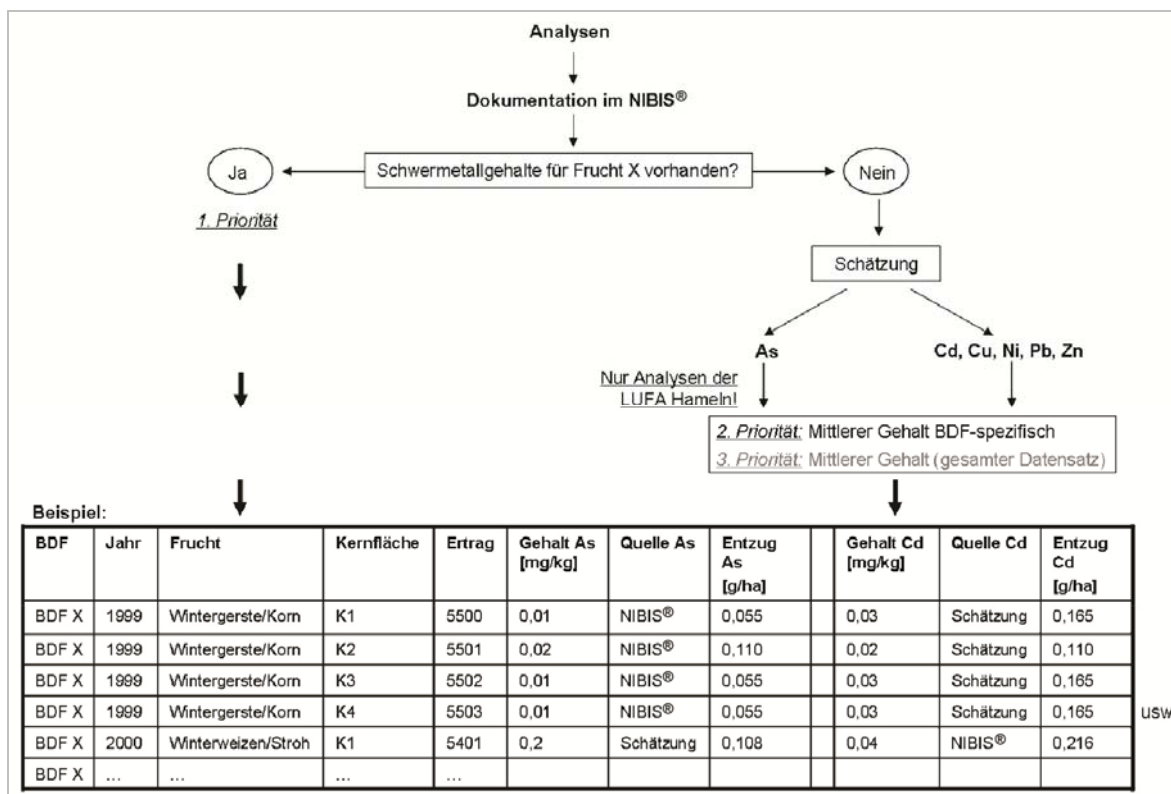


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Ermittlung der Schwermetallgehalte und bei der Berechnung der Entzüge.

2.3.2 Entzüge durch das Sickerwasser

In Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften können Schwermetalle über das Sickerwasser ins Grundwasser verlagert und damit dem System Boden entzogen werden.

Probennahme des Sickerwassers

Auf ausgewählten Belastungs- und Referenzflächen wird mit Hilfe von Saugkerzen Sickerwasser gewonnen. Die Saugkerzen, aus z. T. unterschiedlichen Materialien, sind standortabhängig in verschiedenen Tiefen horizontal unterhalb des Hauptwurzelraumes in vierfacher Wiederholung eingebaut worden: Auf B032MARK und B033DINK wurden Saugkerzen aus Borosilikat in 1,2 bzw. 1,4 m Tiefe, auf B037SCHL solche aus Nylon in 0,35 und 0,75 m Tiefe und auf B051REIH, für die nur Werte aus dem Jahre 1998 vorliegen, solche aus Keramik (P80) in 0,7 m Tiefe installiert. Eigene, vergleichende Untersuchungen auf B032MARK und B033DINK haben gezeigt, dass die Borosilikat- und die Nylonsaugkerzen

gleiche Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser ergeben. Keramische Saugkerzen tendieren bei Nickel zu höheren, ansonsten aber, bei mehrjährigem Betrieb, ebenfalls zu gleich hohen Ergebnissen (bei Cd, Cu, Zn) wie die anderen beiden Sondentypen.

Die Unterdruckleitungen bzw. die Unterflur-Sickerwassersammelstellen befinden sich unterhalb der Bearbeitungstiefe, so dass eine Bewirtschaftung störungsfrei möglich ist. Die akkubetriebene Vakuumpumpe ist automatisch gesteuert (zeit- bzw. tensiometergesteuert), die Beprobung erfolgt bei einem Unterdruck von 0,4 bar. Maximal 100 ml Sickerwasser werden diskontinuierlich vierzehntägig gewonnen (SCHÄFER 1997).

Für die Bilanzierung der Ein- und Austräge von Schwermetallen standen Sickerwasseruntersuchungen von vier BDF zur Verfügung (Tab. 9), bei denen es sich um drei Belastungsflächen und eine Referenzfläche (Intensiv-BDF) handelt (vgl. Tab. 1).

Bestimmung der Sickerwassermenge

Die Sickerwassermengen wurden näherungsweise mit dem Wasserhaushaltsmodell GROWA06 ermittelt, das der Berechnung des langjährigen Wasserhaushalts der Grundwasserkörper dient (KUNKEL & WENDLAND 2002). Eine detaillierte Darstellung der Modellanwendung für Niedersachsen findet sich bei DORHÖFER et al. (2001). Aus verschiedenen hydrometeorologischen Eingangsgrößen wird in diesem Modell der Gesamtabfluss als langjähriger Mittelwert berechnet.

Tab. 9: Angenommene Sickerwassermenge für ausgewählte Belastungsflächen nach GROWA06.

BDF	Sickerwassermenge nach GROWA06 [mm/a]
B032MARK	360
B033DINK	304
B037SCHL	123
B051REIH	240

Labormethoden zur Bestimmung der Schwermetallgehalte im Sickerwasser

Die Sickerwasserprobe (max. 100 ml) wird nach der Probennahme mit Salpetersäure angesäuert und gekühlt ins Labor transportiert. Die Analyse des Wassers auf die Schwermetallkonzentration in µg/l erfolgt nach den DIN-Normen 38405 und 38406 (Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung).

Zusammenstellung und Berechnung der Entzüge durch das Sickerwasser

Es wurden für die genannten BDF elementspezifisch die geometrischen Mittelwerte der Konzentration über alle Jahre und über die vier Messwiederholungen gebildet. Für Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze wurde der halbe Wert der Bestimmungsgrenze verwendet. Für Arsen wurden keine mittleren Konzentrationen ermittelt, da über 90 % der Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Aus der Multiplikation der mittleren Konzentration mit den mittleren jährlichen Sickerwassermengen ergibt sich die mittlere jährliche Schwermetallfracht, die ins Grundwasser verlagert wird.

2.3.3 Entzüge durch Erosion

Da die Erosion nur auf wenigen ausgewählten BDF gemessen wird, liegen keine repräsentativen Daten für die Quantifizierung von Schwermetallausträgen vor, so dass dies Bilanzglied in dieser Studie unberücksichtigt bleibt.

2.4 Ermittlung der Schwermetalleinträge

2.4.1 Schwermetalleinträge durch Mineraldünger

Mineraldünger weisen je nach Rohstoff und Herstellungsverfahren unterschiedliche Schwermetallgehalte auf. Phosphatdünger werden häufig aus Rohphosphaten unterschiedlicher geologischer Herkunft hergestellt. Primäre, magmatisch entstandene Rohphosphate enthalten weniger Schwermetalle (vor allem Cadmium) als sekundär entstandene Rohphosphate (organische Sedimente). Rohphosphate aus Russland (magmatische Entstehung) weisen beispielsweise niedrigere Gehalte an Cadmium auf als solche aus Nordafrika (organische Sedimente). Die sekundären Vorkommen zeigen darüber hinaus erhebliche Schwankungen in den Gehalten, je nach Herkunft bzw. Lagerstätte (BOYSEN 1992, DITTRICH & KLOSE 2008). Das bei der Verhüttung von Eisenerz anfallende Thomasphosphat enthält dagegen vor allem Mangan und Chrom. Dagegen sind die Gehalte an Arsen, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink im Vergleich zum Rohphosphat gering (BOYSEN 1992).

Durch die Beimengung von Phosphor-Komponenten ist der Schwermetallgehalt von NP- und NPK-Düngern höher als in reinen Stickstoffdüngern. NPK-Dünger enthalten durch das Hinzufügen von Kaliumkomponenten (Verdünnungseffekt) weniger Schwermetalle als NP-Dünger (BOYSEN 1992).

Der Schwermetallgehalt von Kalken wird ebenfalls von der natürlichen Lagerstätte beeinflusst. Auch innerhalb der Lagerstätte sind erhebliche Schwankungen möglich. Neben natürlichen Kalken werden Industrie- und Rückstandskalke als Dünger verwendet. In Industriekalken (Hütten- und Konverterkalk) ist der Schwermetallgehalt in etwa vergleichbar mit dem von Thomasphosphat, allerdings ist der Chromgehalt hier geringer. Die aus der indust-

riellen Produktion stammenden Rückstandskalke weisen je nach Herkunft und Entstehung unterschiedliche Schwermetallgehalte auf. Als Dünger wird außerdem Carbokalk genutzt, der z. B. aus der Verarbeitung von Zuckerrüben stammt (BOYSEN 1992, DITTRICH & KLOSE 2008).

Synthetische Düngemittel sind in der Regel frei von Schwermetallen, es sei denn, es handelt sich um spezielle Spurenstoffdünger (z. B. für Kupfer).

Methoden der Düngermengenermittlung und Probennahme für Laboranalysen

Die ausgebrachten Düngermengen werden vom Bewirtschafter ermittelt und sind entsprechend in der Schlagkartei dokumentiert. Je nach Konsistenz des Düngers erfolgt die Mengenangabe in kg/ha (fester Dünger) oder l/ha (Flüssigdünger).

Von den auf den Belastungs- bzw. Referenzflächen ausgebrachten Düngemitteln werden Proben von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen nach den Vorschriften des VDLUFA-Methodenbuchs (Band II, Dünganalytik, 1995) genommen. Eine Probennahme erfolgt nicht für synthetische Dünger, da hier die von der Düngemittelverkehrskontrolle geprüften Herstellerangaben genutzt werden können.

Labormethoden

Die Analyse von Mineraldüngerproben erfolgt für Cu, Ni, Pb und Zn nach DIN ISO 11885, für Cd nach DIN ISO 11885 bzw. 5961 und für As nach DIN ISO 38406 (E29).

Zusammenstellung und Berechnung der Einträge durch Mineraldünger

Für die zur Quantifizierung der Einträge durch Mineraldünger benötigten Schwermetallgehalte wurden zunächst Analysen aus dem niedersächsischen BDF-Programm herangezogen. Bei Unterschreiten der Nachweisgrenze wurden die Werte auf Null gesetzt. Falls keine Analysen vorlagen, wurden Herstellerangaben genutzt. Für den Fall, dass keine Herstellerangaben herangezogen werden konnten, wurden die umfangreichen Studien von BOYSEN (1992) bzw. DITTRICH & KLOSE (2008) zugrunde ge-

legt. In BOYSEN (1992) wurden 1 200 Proben aus der Düngemittelverkehrskontrolle der Jahre 1985–1989 mit Angaben aus der Literatur verglichen. Bei DITTRICH & KLOSE (2008) sind 621 Mineraldüngerproben der Düngemittelverkehrskontrolle in Sachsen der Jahre 2005/2006 untersucht worden. Da die Untersuchungen von DITTRICH & KLOSE (2008) aktueller sind, hatte diese Quelle Priorität. Dort sind im Anhang, Tabelle 31, die verwendeten Schwermetallgehalte der auf den Belastungs- und Referenzflächen ausgebrachten Mineraldünger zusammengestellt.

Die Berechnung der Einträge durch Mineraldünger erfolgte über die Multiplikation der Mengen mit der Konzentration. Die Mengen in l/ha wurden zuvor über die Dichte in kg/ha umgerechnet. Die Dichten wurden entweder analytisch ermittelt oder vom Hersteller übernommen. Die Schwermetalleinträge durch Mineraldünger wurden dann zu Gesamteinträgen je BDF summiert. Außerdem wurde ein mittlerer jährlicher Eintrag während des Zeitraums zwischen den Inventuren bzw. von der Grundinventur bis einschließlich 2006 ermittelt.

2.4.2 Schwermetalleinträge durch organische Düngemittel

Als organische Düngemittel werden Wirtschaftsdünger und Sekundärrohstoffdünger (Serodünger) bezeichnet. Wirtschaftsdünger entstehen im landwirtschaftlichen Tierproduktionsprozess (Gülle, Festmist, Hühnerkot), Serodünger sind Abfallstoffe wie Klärschlamm, Biogülle bzw. Gärsubstrat (aus Biogasanlagen) und Komposte. Neben Nährstoffen enthalten organische Dünger auch Schadstoffe wie Schwermetalle, die in den Boden eingetragen und dort angereichert werden können (UBA 2004, 2007).

Der Schwermetallgehalt von Wirtschaftsdüngern ist abhängig von der Nutztierart, vom Tierfutter, aber auch von der Art der Haltung (Desinfektionsmittel, Einstreumaterialien) und von den Gegebenheiten im Stall (Korrosion der Stalleinrichtung, Abrieb von verputzten Stallwänden und -böden, UBA 2004). Wirtschaftsdünger aus Schweinemastbetrieben weisen höhere Cu- und Zn-Gehalte auf als solche, die aus Betrieben mit Milchviehhaltung stammen, da hier mehr wirtschaftseigene Futtermittel eingesetzt werden (KTBL 2005, UBA 2004).

Wirtschaftseigene Futtermittel enthalten in der Regel geringere Mengen an Schwermetallen als zugekaufte Ergänzungs- und Alleinfuttermittel, da diesen (oft hoch dosiert) Spurenelemente beigefügt wurden und zum Teil Verunreinigungen mit nicht essenziellen Schwermetallen vorliegen. Da nicht benötigte Spurenelemente von den Tieren über die Exkremente ausgeschieden werden, ist eine Herabsetzung des Schwermetalleintrags in Wirtschaftsdünger über die Anpassung der Spurenelementgehalte in zugekauften Futtermitteln an die Versorgungsempfehlungen realisierbar (UBA 2004). Gesetzlich geregelte Grenzwerte für den Schwermetallgehalt in Flüssig- und Festmist liegen nicht vor.

Die Grenzwerte für Schwermetalle in Klärschlämmen nach Abfallklärverordnung (ABFKLÄRV 1992) werden in der Regel nicht überschritten (UBA 2007). Die Inhaltsstoffe von Klärschlämmen können vom Einzugsgebiet der Kläranlage (urban, industriell oder ländlich geprägt) beeinflusst sein. Komposte und Gärsubstrate bzw. Biogülle gelten als Bioabfälle im Sinne der Bioabfallverordnung (BIOABFV 1998), in der die maximalen Schwermetallgehalte geregelt sind.

Methoden der Düngermengenermittlung und Probennahme für Laboranalysen

Die ausgebrachte Menge an Frischsubstanz wird vom Bewirtschafter ermittelt und anschließend in der Schlagkartei dokumentiert. Die Mengenangabe für Flüssigmist, Klärschlamm und Gärsubstrat erfolgt in m³/ha, die der anderen Düngertypen in t/ha.

Die Entnahme der Proben von Wirtschaftsdüngern und Serodüngern für die Analyse auf Schwermetalle erfolgt durch die Landwirtschaftskammer Niedersachsen auf Grundlage des VDLUFA-Methodenbuchs (Band II.1, Düngeranalytik, 1995). Klärschlämme werden direkt vom Kläranlagenbetreiber beprobt und auf Nähr- und Schadstoffe analysiert.

Labormethoden

Die Analyse von Wirtschafts- und Serodüngerproben, die im Rahmen des BDF-Programms entnommen wurden, erfolgt für Cu, Ni, Pb und Zn nach DIN ISO 11885, für Cd nach DIN ISO 11885 bzw. 5961 und für As nach DIN ISO 38406 (E29).

Zusammenstellung und Berechnung

Für die Quantifizierung der Einträge durch organischen Dünger wurden prioritär die Schwermetallanalysen aus dem niedersächsischen BDF-Programm herangezogen. Lagen die Ergebnisse dieser Analysen unterhalb der Nachweisgrenze, wurde die halbe Nachweisgrenze für weitere Berechnungen genutzt. Falls keine Daten vorlagen, wurden die Schwermetallgehalte anhand von Literaturdaten geschätzt (Abb. 3). Die Nutzung von Daten, die im BDF-Programm gewonnen wurden, hatte dabei Priorität. Wenn möglich, wurde ein BDF-spezifischer arithmetischer Mittelwert für den Schwermetallgehalt der jeweiligen Düngertypen errechnet.

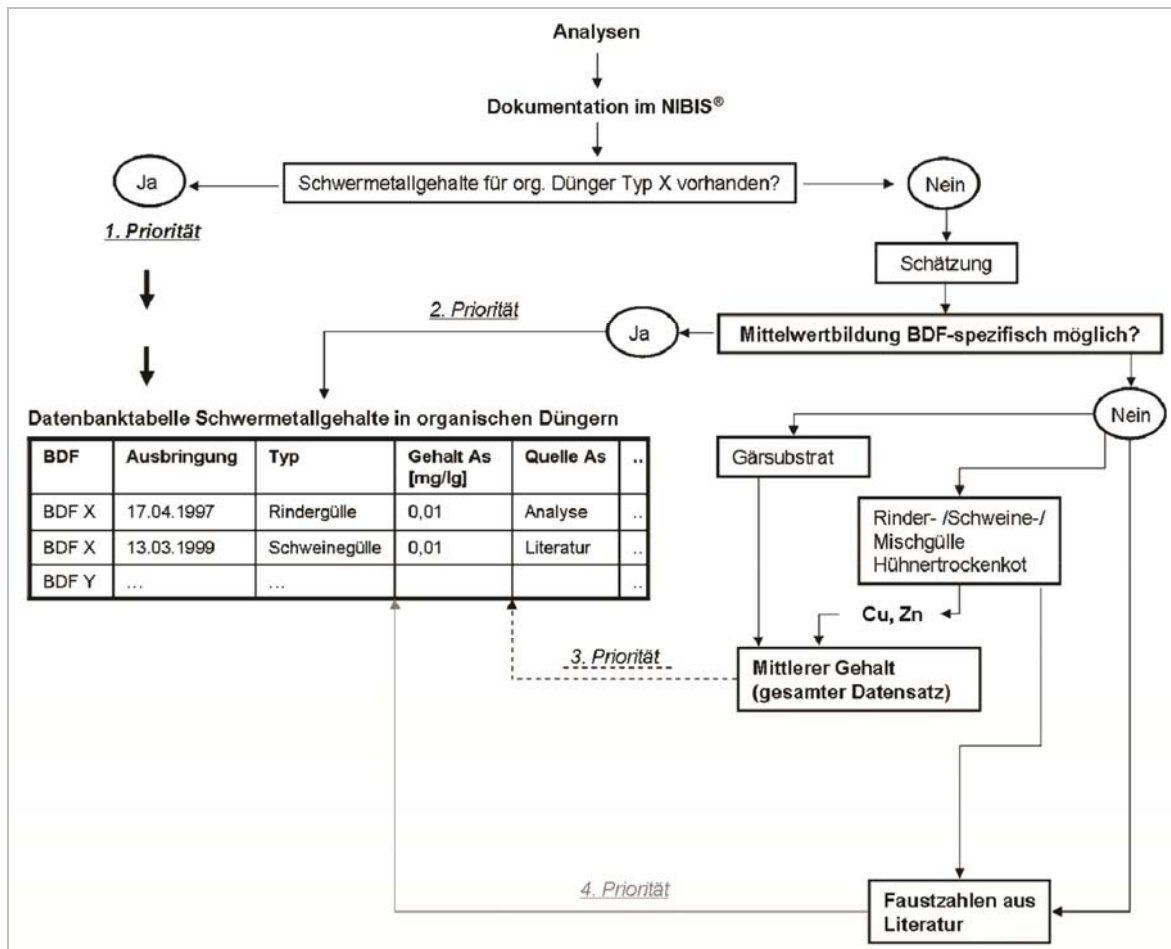


Abb. 4: Vorgehensweise bei der Ableitung der Schwermetallgehalte in organischen Düngern.

Aufgrund des Umfangs der im Rahmen des BDF-Programms analysierten Düngemittelproben konnten für Kupfer und Zink in Schweine-, Rinder- und Mischgülle (Rind und Schwein) eigene Faustzahlen ermittelt werden (Abb. 4). In Tabelle 10 werden diese Werte mit Faustzahlen aus der Literatur verglichen. Die im niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm ermittelten Kupfer- und Zinkgehalte in Rindergülle liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Literaturangaben. Dies gilt auch für die Schweinegülle, wobei insgesamt deutlich wird, dass die Gehalte einer größeren Streuung unterliegen.

Tab. 10: Kupfer- und Zinkgehalte in Rinder- und Schweinegülle im Vergleich.

Typ	Quelle	n	Cu [mg/kg TM]	Zn [mg/kg TM]
Rindergülle	Mittelwert aller relevanten BDF	16	49,0 ±15	230,0 ±47
	KTBL (2000)	130–135	37,0	161,0
	UBA (2004)	127	48,0	305,0
	UBA (2007)	keine Angaben	55,0	225,0
Schweinegülle	Mittelwert aller relevanten BDF	Cu = 11; Zn = 3	314 ±216	1 022 ±379
	KTBL (2000)	35–37	184	647
	UBA (2004)	65	531	1500
	UBA (2007)	keine Angaben	225	875
	ZETHNER et al. (2002) (Österreich)	7	267	1 194
	ZETHNER et al. (2007) (Österreich)	30	187	819

Für die Gärsubstrate wurde jeweils geprüft, welche Pflanzen in der Biogasanlage verarbeitet werden. Für das Pflanzenmaterial wurden Mittelwerte aller im BDF-Programm ermittelten Gehalte verwendet, um zumindest die regionalen Besonderheiten Niedersachsens, im Vergleich zu anderen Bundesländern oder anderen Staaten (z. B. Österreich), zu berücksichtigen. Eine stärkere Regionalisierung innerhalb Niedersachsens war aufgrund der begrenzten Anzahl von Standorten nicht möglich (Abb. 4).

Nur für den Fall, dass landesspezifische Werte nicht verwendet werden konnten, wurden Faustzahlen aus der Literatur herangezogen (Abb. 4). Diese Faustzahlen wurden je nach Düngertyp unterschiedlichen Quellen entnommen (Tab. 11).

Für Arsen konnten lediglich für Rinder-, Schweine- und Mischgülle sowie für Hühner-trockenkot, Hähnchen- und Hühnermist verlässliche Daten zusammengestellt werden. Die Bilanz für Arsen bleibt daher unvollständig.

Tab. 11: Quellen der Faustzahlen für Schwermetallgehalte in unterschiedlichen organischen Düngern.

Typ organischer Dünger	Quelle
Hühnermist Pferdemist	UBA 2007
Hähnchenmist Hühnertrockenkot (ohne Cu und Zn) Rindergülle (ohne Cu und Zn) Rindermist Schweinegülle (ohne Cu und Zn) Schweinemist Mischgülle (Rind u. Schwein, ohne Cu und Zn)	UBA 2004
Kompost	KTBL 2005
Klärschlamm	LANDWIRTSCHAFTS- KAMMER NIEDERSACH- SEN (2005, 2006)
Kartoffel-fruchtwasser Senf	keine Angaben

Die Berechnung der Schwermetalleinträge durch organischen Dünger erfolgte über die Multiplikation der Mengen (Trockengewicht) mit der Konzentration. Da sich die Mengenangaben vom Bewirtschafter auf die Frischsubstanz beziehen, mussten die Düngermengen in Trockensubstanz umgerechnet werden. Die hierfür notwendigen spezifischen Trockensubstanzgehalte je Düngertyp wurden vergleichbar zu der Vorgehensweise, wie sie in Abbildung 4 beschrieben ist, ermittelt: Die Nutzung von Daten aus Analysen des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms stand im Vordergrund. Für

Rinder-, Schweine- und Mischgülle wurde in den Fällen, in denen ein BDF-spezifischer Mittelwert für den Kupfer- und Zinkgehalt gebildet werden konnte, das mittlere Trockengewicht angenommen (entspricht Priorität 2 in Abb. 4). Für Gärsubstrate wurde ein arithmetisches Mittel über den gesamten Datensatz gebildet (entspricht Priorität 3 in Abb. 4). In allen anderen Fällen wurden die Angaben zu Trockensubstanzgehalten von BAUMGÄRTEL & HÖPER (2000) herangezogen (vgl. Anhang, Tab. 32).

Die ausgebrachten Güllemengen in m^3/ha wurden für die Berechnung der Einträge über die Dichte in kg/ha umgerechnet, wobei die Dichte ($1 \text{ t}/\text{m}^3$, wenn der Trockensubstanzgehalt $< 10 \%$) nach Angaben der Landwirtschaftskammer Niedersachsen übernommen wurde (LUFA 1998).

Die kernflächenspezifischen Einträge durch organischen Dünger wurden zu Gesamteinträgen je BDF summiert. Außerdem wurde ein mittlerer jährlicher Eintrag während des Zeitraums zwischen den Inventuren bzw. von der Grundinventur bis einschließlich 2006 errechnet.

2.4.3 Pflanzenschutzmittel

In Pflanzenschutzmitteln (PSM) sind Schwermetalle entweder als Wirkstoff oder als Verunreinigung enthalten. Arsen, blei- oder quecksilberhaltige Pflanzenschutzmittel (auch Beizmittel) sind mittlerweile verboten. Der Schwermetalleintrag durch PSM spielt auf Ackerstandorten nur noch dann eine Rolle, wenn Fruchtfolgen mit Kartoffeln angebaut werden, da hier kupferhaltige Fungizide zum Einsatz kommen. Fungizide, die Kupfer enthalten, werden auch im Wein- und Hopfenanbau angewandt. Der Eintrag von Zink durch PSM ist sehr gering und kann daher vernachlässigt werden (LBP 1997).

Methoden zur Ermittlung der eingesetzten Mengen an Pflanzenschutzmitteln

Die Erfassung der Mengen (in kg/ha bzw. l/ha) an ausgebrachten PSM erfolgt durch den Bewirtschafter, diese Angaben werden in der Schlagkartei dokumentiert.

Da die Angaben zu Schwermetallgehalten und zur Dichte in PSM vom Hersteller übernommen werden können, erfolgt im niedersächsischen

Boden-Dauerbeobachtungsprogramm keine Beprobung und Analytik dieser Stoffe.

Zusammenstellung und Berechnung

Im niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm wurde während des gesamten Untersuchungszeitraums lediglich auf einer Fläche ein schwermetallhaltiges Fungizid (Cuprozin) eingesetzt. Die Ausbringung auf Kartoffeln erfolgte insgesamt sieben Mal innerhalb von zwei Jahren.

Für die Ermittlung des Eintrags wurde zunächst der Kupferanteil im Cuprozin (CuOH_2) berechnet (= 65 %) und anschließend mit der ausgebrachten Menge multipliziert. Der Schwermetalleintrag wurde für die BDF bestimmt. Außerdem wurde ein mittlerer jährlicher Eintrag während des Zeitraums zwischen den Inventuren bzw. von der Grundinventur bis einschließlich 2006 errechnet.

2.4.4 Deposition

Die Deposition spielt als Eintragspfad von Schwermetallen ebenfalls eine Rolle. Schwermetalle und Arsen werden durch Stäube transportiert, die dann auf den Pflanzen und dem Boden sedimentiert werden können. Besonders relevant ist dies in Gebieten mit schwermetallbelastetem Boden, der durch Winderosion transportiert wird.

Mit Einrichtung des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms wurde das bereits vorhandene Messnetz der Grundwassergüte (GÜN) integriert, das eine Erfassung der Niederschlagsbeschaffenheit (Bulkdeposition = sedimentierender Teil des Niederschlags) auf ausgewählten BDF umfasst (KUES & MEESENBURG 2001, JANKOWSKI & HARMS 2001). Allerdings werden aus Kostengründen nicht von allen Belastungs- bzw. Referenzflächen Daten zur Schwermetalldeposition erhoben. Zur Ermittlung typischer Schwermetalleinträge auf den hier untersuchten Flächen wurden die an einzelnen Standorten und nicht in der Nähe zu Punktemittenten gemessenen Depositionen einem Regiontyp zugeordnet und Mittelwerte über alle Messstellen desselben Regiontyps gebildet. In Einzelfällen wurden Ausreißer, d. h. einzelne, deutlich über dem Mittelwert des Regiontyps liegende Messstellen, herausgenommen und getrennt ausgewiesen. Hier wer-

den punktuell erhöhte Einträge über die Deposition angenommen.

Aus dieser Vorgehensweise ergeben sich an Freilandmessstellen die in Tabelle 12 dargestellten Schwermetalldepositionen im Mittel der Jahre 2000–2006. Interessanterweise weist

der Regiontyp 2 „Regionen mit Verdichtungsansätzen“ bei einigen Schwermetallen eine etwas höhere Deposition als der Regiontyp 1 „Regionen mit großen Verdichtungsräumen“ auf. Die Ursache dafür kann derzeit nicht festgestellt werden.

Tab. 12: Mittlere jährliche Schwermetalldepositionen 2000–2006, gemessen an Freilandmessstellen auf landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF-L), klassifiziert nach Regiontyp [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$].

Typ-Nr.	Regiontyp	n	Cd ¹⁾	Cr	Cu	Ni	Pb ²⁾	Zn ³⁾
1	Regionen mit großen Verdichtungsräumen	7	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
2	Regionen mit Verdichtungsansätzen	11	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
3	Ländlich geprägte Regionen	6	0,4	4,6	6,0	7,3	3,5	103
Sonderfälle								
(1)	B031VINN						7,8	
(2)	B034NORD							766

¹⁾ Regiontyp 2 ohne B051REIH, B067JUEN, B043OLDE (n = 8).

²⁾ Regiontyp 1 ohne B031VINN (n = 6).

³⁾ Regiontyp 2 ohne B034NORD (n = 10).

Den in dieser Studie untersuchten Standorten wurden über den Regiontyp typische mittlere Schwermetalleinträge durch Deposition zugewiesen (Tab. 13).

Tab. 13: Einzelnen BDF-Standorten über den Regiontyp zugeordnete mittlere jährliche Schwermetalldeposition [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] (Erläuterung zur Typ-Nr. s. Tab. 12).

BDF	Typ-Nr.	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
B002DRUE	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B003EHME	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B010UESE	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B012BUEH	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B016TETE	3	0,4	4,6	6,0	7,3	3,5	103
B021GROE	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B027BARR	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B031VINN	1	0,8	4,9	12,1	12,0	7,8	117
B032MARK	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B033DINK	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B037SCHL	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B039HAND	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B043OLDE	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B045RIDD	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B046RODE	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B049GLIS	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B051REIH	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200
B052SUES	1	0,8	4,9	12,1	12,0	3,4	117
B064HOHE	3	0,4	4,6	6,0	7,3	3,5	103
B067LIST	2	1,2	6,2	16,6	9,6	3,4	200

3 Ergebnisse

3.1 Schwermetallbilanzen

3.1.1 Schwermetallein- und -austräge im Betrachtungszeitraum

In den Tabellen 14–19 sind die Ein- und Austräge für die untersuchten Schwermetalle zwischen Grundinventur und erster Wiederholungsinventur bzw. zwischen Grundinventur und 2006 (für alle nach 1996 eingerichteten BDF) dargestellt.

Arsen

Die Arseneinträge (Tab. 14) erfolgten auf allen BDF überwiegend durch mineralische Düngemittel. Auf den BDF mit einem Arseneintrag über $20 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (B012BUEH, B032MARK, B043OLDE, B052SUES und B064HOHE) wurde im Untersuchungszeitraum mindestens einmal gekalkt oder mit Rohphosphat gedüngt. Die Arsengehalte in Rohphosphaten und Kalken sind höher als in synthetischen Düngemitteln

und variieren je nach Herkunft des Rohstoffs.

Der Eintrag durch organische Dünger war vergleichsweise gering. Leicht erhöhte Werte von bis zu $5,3 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wurden auf den Flächen B032MARK und B033DINK, die häufig mit Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein) gedüngt wurden (Tab. 21), beobachtet.

Die gesamten Einträge liegen zwischen 0 und $56 \text{ g As ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Die Entzüge durch die Ernte sind sehr gering ($0\text{--}1,9 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), so dass Arsen langfristig im Boden angereichert werden könnte. Unberücksichtigt bleiben hier noch die Austräge mit dem Sickerwasser (Tab. 23).

Die Salden liegen zwischen $-0,4$ und $56,2 \text{ g As ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, im Median bei $5,4 \text{ g As ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Da nicht für alle Düngemittel Arsengehalte bestimmt wurden und auch nicht durch Faustzahlen abgeschätzt werden konnten, ist die Bilanz für Arsen unvollständig.

Tab. 14: As-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Datenbasis unvollständig, Angaben in $\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Erntentzüge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	7,9	0,0	0	n. b.	7,9	0,4	7,5
B003EHME	1994–2004	3,9	0,0	0	n. b.	3,9	0,2	3,7
B010UESE	1997–2006	5,8	0,0	0	n. b.	5,8	0,0	5,8
B012BUEH	1992–2001	45,2	0,0	0	n. b.	45,2	0,1	45,1
B016TETE	1993–2001	1,5	0,4	0	n. b.	1,9	0,2	1,7
B021GROE	1998–2006	0,0	0,4	0	n. b.	0,4	0,2	0,2
B027BARR	1997–2006	4,0	1,0	0	n. b.	5,0	0,1	4,9
B031VINN	1993–2002	14,2	0,0	0	n. b.	14,2	0,4	13,8
B032MARK	1993–2003	24,7	5,3	0	n. b.	30,0	0,4	29,6
B033DINK	1993–2003	0,3	1,3	0	n. b.	1,6	0,6	1,0
B037SCHL	1995–2005	2,6	0,1	0	n. b.	2,7	1,9	0,7
B039HAND	1995–2006	13,5	0,3	0	n. b.	13,7	0,1	13,6
B043OLDE	1997–2006	32,1	0,0	0	n. b.	32,1	0,4	31,7
B045RIDD	1995–2005	0,0	0,0	0	n. b.	0,0	0,4	-0,4
B046RODE	1998–2006	1,7	0,3	0	n. b.	2,1	0,3	1,8
B049GLIS	1995–2005	1,8	0,2	0	n. b.	2,0	0,1	1,9
B051REIH	1996–2006	2,6	0,0	0	n. b.	2,6	0,2	2,4
B052SUES	1997–2006	30,4	0,7	0	n. b.	31,2	1,0	30,2
B064HOHE	1999–2006	56,1	0,3	0	n. b.	56,4	0,2	56,2
B067LIST	1999–2006	17,0	1,0	0	n. b.	18,0	0,5	17,6

n. b.: nicht bestimmt

Cadmium

Vergleichbar mit Arsen (Tab. 14), wurde Cadmium überwiegend durch Mineraldünger eingetragen (Tab. 15). Cadmium ist besonders in Rohphosphaten enthalten, so dass eine Düngung zu entsprechenden Einträgen auf den Ackerflächen führt. Dieses ist insbesondere durch B031VINN dokumentiert, die im Untersuchungszeitraum mehrfach mit Phosphordüngern (z. B. Thomaskali) gedüngt wurde. Auch

B003EHME und B049GLIS wurden mindestens einmal mit Thomaskali gedüngt. Bei der organischen Düngung erfolgten die höchsten Einträge durch Klärschlamm auf B027BARR.

Die gesamten Cd-Einträge summieren sich auf 0,8 (B064HOHE) bis 3,7 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ (B027BARR) und überschreiten nicht die zulässige zusätzliche jährliche Fracht über alle Wirkungspfade von 6 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ (BBodSCHV 1999). Die Cd-Salden reichen von -2,0 bis 3,5 g Cd ha⁻¹ a⁻¹.

Tab. 15: Cd-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Ernteeinträge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	0,9	0,0	0,0	1,2	2,1	0,5	1,6
B003EHME	1994–2004	0,4	0,0	0,0	1,2	1,7	0,5	1,1
B010UESE	1997–2006	0,2	0,0	0,0	0,8	1,0	0,1	0,9
B012BUEH	1992–2001	0,6	0,0	0,0	0,8	1,3	0,3	1,1
B016TETE	1993–2001	0,0	0,4	0,0	0,4	0,9	0,5	0,4
B021GROE	1998–2006	0,0	0,6	0,0	1,2	1,8	0,3	1,5
B027BARR	1997–2006	0,0	2,9	0,0	0,8	3,7	0,2	3,5
B031VINN	1993–2002	2,5	0,0	0,0	0,8	3,3	2,0	1,2
B032MARK	1993–2003	0,2	0,7	0,0	1,2	2,1	1,1	1,0
B033DINK	1993–2003	0,0	1,4	0,0	1,2	2,6	2,2	0,4
B037SCHL	1995–2005	0,0	0,0	0,0	1,2	1,3	3,3	-2,0
B039HAND	1995–2006	0,1	0,2	0,0	0,8	1,1	0,4	0,7
B043OLDE	1997–2006	0,1	0,0	0,0	1,2	1,3	0,6	0,7
B045RIDD	1995–2005	0,0	0,1	0,0	1,2	1,4	0,4	1,0
B046RODE	1998–2006	0,0	0,3	0,0	0,8	1,1	0,3	0,8
B049GLIS	1995–2005	0,2	0,2	0,0	0,8	1,2	0,2	1,0
B051REIH	1996–2006	0,0	0,1	0,0	1,2	1,3	0,3	1,0
B052SUES	1997–2006	0,1	0,6	0,0	0,8	1,5	0,6	0,9
B064HOHE	1999–2006	0,1	0,2	0,0	0,4	0,8	1,0	-0,2
B067LIST	1999–2006	0,1	0,8	0,0	1,2	2,1	1,2	0,9

Kupfer

Die Kupfereinträge liegen zwischen 17 und 805 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ (Tab. 16). Fünf Flächen wiesen Salden von deutlich über 360 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ auf. Dieser Wert gilt nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSCHV 1999) als zulässige zusätzliche jährliche Fracht über alle Wirkungspfade für Kupfer für den Fall, dass der Vorsorgewert im Boden überschritten wird. Letzteres ist für die betroffenen BDF nicht der Fall, so dass der Grenzwert hier lediglich als Vergleichswert herangezogen wird.

Die Einträge erfolgten überwiegend durch Pflanzenschutzmittel und organische Düngemittel.

Auf B021GROE sind die Kupfereinträge am höchsten, was auf den Einsatz von Pflanzenschutzmittel (Cuprozin), aber auch von kupferhaltigen Mineraldüngern zurückzuführen ist.

Besonders hoch war die Kupferzufuhr ebenfalls auf Flächen, die häufig mit Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein) gedüngt wurden (B032MARK, B033DINK, B038HAND, B046RODE, B052SUES und B067LIST, s. Tab. 21).

Auf der BDF B027BARR wurde überwiegend mit Klärschlamm gedüngt (Tab. 21). Die Kupfereinträge sind vergleichbar mit den Flächen, auf denen häufig Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein) ausgebracht wurde. Auch auf B016TETE wurde im Untersuchungszeitraum Klärschlamm ausgebracht, dennoch sind die Einträge hier bedeutend geringer. Dies ist zum einen auf die geringere Menge an zugeführtem Klärschlamm zurückzuführen. Zudem stammte der Klärschlamm aus einer Kläranlage mit einem ländlichen Einzugsgebiet, während auf B027BARR überwiegend Klärschlamm aus einer Großstadt ausgebracht wurde.

Im Gegensatz zu den variierenden Kupfereinträgen sind die Entzüge durch die Ernte relativ

ähnlich (zwischen 11 und 64 g Cu ha⁻¹ a⁻¹) und häufig deutlich niedriger als die Einträge, so dass auf einigen Flächen von einer langfristigen Anreicherung dieses Schwermetalls ausgegangen werden muss. Die höchsten Entzüge weist B037SCHL auf, die aufgrund historischer Bergbautätigkeit im Harz hohe Kupfer-, Blei- und Zinkgehalte im Boden aufweist. Dies führt zu einer erhöhten Cu-Aufnahme durch die Pflanzen und damit zu höheren Entzügen.

Die Salden variieren zwischen -26 und 781 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ und liegen im Median bei 81 g Cu ha⁻¹ a⁻¹, wobei acht Flächen deutlich positive Salden von über 100 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ aufweisen. Unberücksichtigt bleiben hier die Austräge mit dem Sickerwasser (Tab. 23).

Tab. 16: Cu-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Erntentzüge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	1	0	0	17	17	33	-15
B003EHME	1994–2004	2	0	0	17	19	18	0
B010UESE	1997–2006	34	5	0	12	50	11	39
B012BUEH	1992–2001	2	29	0	12	44	24	20
B016TETE	1993–2001	0	120	0	6	127	28	98
B021GROE	1998–2006	140	80	568	17	805	24	781
B027BARR	1997–2006	1	342	0	12	356	21	335
B031VINN	1993–2002	6	0	0	12	18	44	-26
B032MARK	1993–2003	3	427	0	17	446	40	406
B033DINK	1993–2003	0	614	0	17	631	54	577
B037SCHL	1995–2005	1	22	0	17	39	64	-24
B039HAND	1995–2006	9	141	0	12	162	23	139
B043OLDE	1997–2006	6	0	0	17	22	44	-22
B045RIDD	1995–2005	0	9	0	17	26	17	9
B046RODE	1998–2006	1	219	0	12	232	32	200
B049GLIS	1995–2005	1	87	0	12	99	17	82
B051REIH	1996–2006	12	4	0	17	33	28	5
B052SUES	1997–2006	13	350	0	12	375	44	331
B064HOHE	1999–2006	3	55	0	6	63	28	35
B067LIST	1999–2006	1	632	0	17	650	40	610

Nickel

Die Nickeleinträge durch Düngung und Deposition belaufen sich auf Werte zwischen 11 und 51 g ha⁻¹ a⁻¹. Nickel wird besonders über organische Düngemittel und die Deposition eingetragen (Tab. 17). Auffällig ist, dass die höchsten Nickeleinträge auf B027BARR, die häufiger und überwiegend mit urbanem bzw. industriellem Klärschlamm gedüngt wurde, zu verzeichnen waren. Auch einige der Flächen, die häufiger

mit Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein) gedüngt wurden, weisen vergleichsweise höhere Nickeleinträge auf (B032MARK, B033DINK, B052SUES und B067LIST, s. Tab. 21). Die Nickeleinträge überschreiten in keinem Fall die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten über alle Wirkungspfade nach BBODSCHV (1999) von 100 g Ni ha⁻¹ a⁻¹. Die Belastungssituation mit Nickel kann daher als unbedenklich eingestuft werden.

Tab. 17: Ni-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Ernteentzüge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	2,2	0,0	0	9,6	11,8	1,6	10,1
B003EHME	1994–2004	1,6	0,0	0	9,6	11,2	1,3	9,9
B010UESE	1997–2006	1,9	0,8	0	12,0	14,8	0,2	14,6
B012BUEH	1992–2001	13,2	0,7	0	12,0	26,0	1,7	24,3
B016TETE	1993–2001	0,1	8,2	0	7,3	15,6	2,3	13,4
B021GROE	1998–2006	0,0	11,0	0	9,6	20,6	5,0	15,6
B027BARR	1997–2006	1,3	37,7	0	12,0	51,1	1,0	50,1
B031VINN	1993–2002	5,1	0,0	0	12,0	17,2	4,9	12,3
B032MARK	1993–2003	2,5	21,6	0	9,6	33,7	5,3	28,3
B033DINK	1993–2003	0,0	24,5	0	9,6	34,1	12,0	22,0
B037SCHL	1995–2005	1,0	1,9	0	9,6	12,5	2,2	10,3
B039HAND	1995–2006	2,9	4,4	0	12,0	19,3	2,3	17,0
B043OLDE	1997–2006	9,5	0,0	0	9,6	19,1	1,3	17,8
B045RIDD	1995–2005	0,0	1,5	0	9,6	11,1	2,5	8,6
B046RODE	1998–2006	0,0	5,5	0	12,0	17,6	2,2	15,4
B049GLIS	1995–2005	0,2	5,0	0	12,0	17,2	0,5	16,7
B051REIH	1996–2006	0,9	0,7	0	9,6	11,2	1,6	9,6
B052SUES	1997–2006	9,5	13,0	0	12,0	34,5	2,2	32,3
B064HOHE	1999–2006	3,6	5,0	0	7,3	15,9	2,1	13,8
B067LIST	1999–2006	5,2	16,3	0	9,6	31,1	6,0	25,1

Die Nickelentzüge durch die geernteten Pflanzen liegen zwischen 0,2 und 12 g Ni ha⁻¹ a⁻¹ und damit deutlich unter den Einträgen. Die Salden weisen, ohne Berücksichtigung der Austräge mit dem Sickerwasser, einen Wertebereich zwischen 9 und 50 g Ni ha⁻¹ a⁻¹, im Median bei 17 g Ni ha⁻¹ a⁻¹, auf.

Blei

Die Einträge von Blei (Tab. 18) durch Düngemittel und Deposition summieren sich auf Werte zwischen 4 und 137, im Median von 11 g Pb ha⁻¹ a⁻¹. Die höchsten Einträge finden durch Klärschlamm auf B027BARR statt. Die Flächen B032MARK und B033DINK weisen etwas höhere Bleieinträge auf, die vermutlich auf eine häufige Düngung mit Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein) zurückzuführen sind (vgl. Tab. 21). Die Einträge überschreiten in keinem Fall die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten über alle Wirkungspfade von 400 g Pb ha⁻¹ a⁻¹ (BBODSCHV 1999).

Die Entzüge mit dem Erntegut sind mit Ausnahme der B037SCHL sehr gering, was auf die geringe Mobilität von Blei im Boden hinweist. Die in der Okeraue gelegene und historisch hoch belastete BDF B037SCHL (Bleigehalte im Boden im Mittel 3 350 mg/kg, Tab. 3) weist naturgemäß auch erhöhte Entzüge mit dem Erntegut auf.

Die Salden liegen zwischen -80 und 137 g Pb ha⁻¹ a⁻¹, im Median bei 9 g Pb ha⁻¹ a⁻¹. Unberücksichtigt bleiben hier die Bleientzüge durch das Sickerwasser (Tab. 23).

Tab. 18: Pb-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Erntentzüge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	0,0	0,5	0	3,4	3,9	1,9	2,0
B003EHME	1994–2004	0,0	5,2	0	3,4	8,7	1,9	6,8
B010UESE	1997–2006	0,9	3,2	0	3,4	7,6	0,2	7,4
B012BUEH	1992–2001	0,5	2,8	0	3,4	6,7	0,6	6,1
B016TETE	1993–2001	8,3	2,7	0	3,5	14,6	2,0	12,6
B021GROE	1998–2006	7,6	0,0	0	3,4	11,1	1,4	9,7
B027BARR	1997–2006	133,4	0,4	0	3,4	137,2	0,6	136,6
B031VINN	1993–2002	0,0	9,7	0	7,8	17,5	3,0	14,5
B032MARK	1993–2003	17,4	15,1	0	3,4	35,9	5,1	30,8
B033DINK	1993–2003	19,7	2,0	0	3,4	25,1	7,2	17,9
B037SCHL	1995–2005	0,6	0,04	0	3,4	4,0	84,3	-80,2
B039HAND	1995–2006	3,2	3,4	0	3,4	10,0	1,3	8,7
B043OLDE	1997–2006	0,0	0,1	0	3,4	3,5	2,3	1,2
B045RIDD	1995–2005	1,9	0,0	0	3,4	5,4	2,6	2,8
B046RODE	1998–2006	4,1	9,4	0	3,4	16,9	1,6	15,3
B049GLIS	1995–2005	4,3	6,0	0	3,4	13,7	0,9	12,8
B051REIH	1996–2006	0,9	1,2	0	3,4	5,6	0,8	4,8
B052SUES	1997–2006	10,8	1,2	0	3,4	15,4	2,0	13,4
B064HOHE	1999–2006	5,1	0,3	0	3,5	8,9	2,0	6,9
B067LIST	1999–2006	11,5	2,6	0	3,4	17,5	6,4	11,1

Zink

Die Einträge des essenziellen Spurenelements Zink mit Düngemitteln und über die Deposition sind die höchsten aller Schwermetalle und belaufen sich auf Werte zwischen 163 und 2 775 g Zn ha⁻¹ a⁻¹ (Tab. 19). Auf fünf Standorten werden die zulässigen zusätzlichen jährlichen Frachten über alle Wirkungspfade von 1 200 g Zn ha⁻¹ a⁻¹ (BBODSCHV 1999) überschritten. Dieser Wert wird hier allerdings nur zu Vergleichszwecken herangezogen, da auf keiner der Flächen der Vorsorgewert im Boden überschritten wurde.

Die Zinkeinträge erfolgten vorwiegend durch organische Düngemittel. Besonders hoch sind sie auf Flächen mit einer regelmäßigen Ausbringung von Schweinegülle bzw. Mischgülle (Rind und Schwein; z. B. B032MARK, B033DINK, B052SUES und B067LIST, s. Tab. 21). B027BARR weist durch Klärschlamm erhöhte Zinkeinträge auf (s. obige Aussagen).

Die Zinkausträge mit dem Erntegut liegen zwischen 88 und 660 g Zn ha⁻¹ a⁻¹. Die höchsten Entzüge weist die BDF037SCHL mit der historischen Belastung auf. Die Zinkbilanz dieser Fläche ist vergleichbar mit denen von Blei und Kupfer: Geringe Einträge stehen hohen Ernteeinträgen gegenüber.

Die Bilanz weist, wie bei Kupfer (Tab. 16), Salden auf, die um ein Vielfaches höher sind als die der anderen hier betrachteten Schwermetalle (Tab. 20). Sie liegen zwischen -361 und 2 202 g Zn ha⁻¹ a⁻¹, im Median bei 186 g Zn ha⁻¹ a⁻¹. Unberücksichtigt bleiben insgesamt die Entzüge durch das Sickerwasser (Tab. 23).

Aufgrund der relativ hohen atmosphärischen Einträge von Zink ergibt sich für keine der vom Boden her unbelasteten Flächen (alle Flächen ohne B031VINN und B037SCHL) eine nennenswerte negative Zinkbilanz, so dass es auch auf den auswaschungsgefährdeten Sandböden langfristig nicht zu einem Mangel an diesem Mikronährstoff kommen kann.

Tab. 19: Zn-Bilanz aller Untersuchungsflächen (Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹).

BDF	Zeitraum	Mineraldünger	organischer Dünger	Pflanzenschutzmittel	Deposition	Summe Einträge	Ernteeinträge	Saldo
B002DRUE	1995–2005	16	0	0	200	215	224	-9
B003EHME	1994–2004	26	0	0	200	225	138	87
B010UESE	1997–2006	19	27	0	117	163	113	50
B012BUEH	1992–2001	70	85	0	117	272	177	95
B016TETE	1993–2001	6	433	0	103	542	166	376
B021GROE	1998–2006	0	514	0	200	714	140	574
B027BARR	1997–2006	12	1 405	0	117	1 533	189	1 344
B031VINN	1993–2002	84	0	0	117	201	325	-125
B032MARK	1993–2003	47	1 611	0	200	1 858	468	1 389
B033DINK	1993–2003	4	2 571	0	200	2 775	573	2 202
B037SCHL	1995–2005	9	90	0	200	299	660	-361
B039HAND	1995–2006	23	448	0	117	587	199	388
B043OLDE	1997–2006	32	0	0	200	232	208	24
B045RIDD	1995–2005	0	46	0	200	245	88	157
B046RODE	1998–2006	19	708	0	117	844	167	677
B049GLIS	1995–2005	16	231	0	117	363	149	214
B051REIH	1996–2006	18	21	0	200	239	209	31
B052SUES	1997–2006	46	1 152	0	117	1 314	257	1 057
B064HOHE	1999–2006	15	185	0	103	302	197	105
B067LIST	1999–2006	25	2 059	0	200	2 283	514	1 769

3.1.2 Bilanzsalden der Belastungs- und Referenzflächen im Vergleich

In Tabelle 20 sind die Salden differenziert nach Belastungs- und Referenzflächen gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass sich die Salden je nach Element und Fläche deutlich voneinander unterscheiden.

Tab. 20: Salden für die untersuchten Schwermetalle von Belastungs- und Referenzflächen im niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm (Angaben in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$).

Belastungsflächen								Referenzflächen							
BDF	Zeitraum	As*	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	BDF	Zeitraum	As*	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
B002DRUE	1995-2005	7,5	1,6	-15	10,1	1,98	-9	B043OLDE	1997-2006	31,7	0,7	-22	17,8	1,21	24
B016TETE	1993-2001	1,7	0,4	98	13,4	12,55	376	B039HAND	1995-2006	13,6	0,7	139	17,0	8,70	388
B027BARR	1997-2006	4,9	3,5	335	50,1	136,62	1344	B052SUES	1997-2006	30,2	0,9	331	32,3	13,43	1057
B031VINN	1993-2002	13,8	1,2	-26	12,3	14,54	-125	B046RODE	1998-2006	1,8	0,8	200	15,4	15,29	677
B032MARK	1993-2003	29,6	1,0	406	28,3	30,81	1389	B021GROE	1998-2006	0,2	1,5	781	15,6	9,65	574
B033DINK	1993-2003	1,0	0,4	577	22,0	17,91	2202								
B037SCHL	1995-2005	0,7	-2,0	-24	10,3	-80,24	-361	B012BUEH	1992-2001	45,1	1,1	20	24,3	6,05	95
B045RIDD	1995-2005	-0,4	1,0	9	8,6	2,82	157	B003EHME	1994-2004	3,7	1,1	0	9,9	6,76	87
B067LIST	1999-2006	17,6	0,9	610	25,1	11,12	1769	ohne zugeordnete Referenzfläche							
ohne zugeordnete Belastungsflächen								B049GLIS	1995-2005	1,9	1,0	82	16,7	12,77	214
								B064HOHE	1999-2006	56,2	-0,2	35	13,8	6,87	105
								B010UESE	1997-2006	5,8	0,9	39	14,6	7,37	50
								B051REIH	1996-2006	2,4	1,0	5	9,6	4,80	31

* Datenbasis unvollständig

Kupfer und Zink weisen insgesamt die höchsten Salden mit der größten Varianz auf. Im Gegensatz zur A-priori-Annahme über die Belastungssituation sind die Salden der Belastungsflächen häufig nicht höher als die der Referenzflächen.

So ergeben sich für die Belastungsfläche B002DRUE (Nähe zu Industrieanlagen) etwa ähnliche Salden wie für die industrieferne B043OLDE. Dies verwundert nicht, da beide über den Regiontyp 2 der gleichen Depositiionsklasse zugeordnet wurden. Die Direktmessung am Standort Drütte ergab keine signifikant erhöhten Schwermetalleinträge durch Deposition im Vergleich zu den anderen Flächen desselben Regionstyps.

Die mit ländlichem Klärschlamm beaufschlagte „Belastungsfläche“ B045TETE zeigt lediglich

bei Pb leicht höhere Salden als die nicht mit Klärschlamm gedüngte Referenzfläche B039HAND. Die As- und Cu-Salden liegen sogar auf der Belastungsfläche etwas niedriger als auf der Referenzfläche.

Die ebenfalls mit Klärschlamm, allerdings städtischer Herkunft, gedüngte B027BARR weist vor allem bei Cd und Pb deutlich höhere Salden auf als die Referenzfläche B052SUES.

Die Belastungsfläche B031VINN, potenziell belastet durch die Nähe zu Industriegebieten und zum Flughafen, hat vor allem bei Cu und Zn deutlich niedrigere und sogar negative Salden, im Vergleich zur Referenzfläche B046RODE, die mit Schweinegülle gedüngt wird.

B032MARK und B033DINK sind vor allem durch die Ausbringung von Cu- und Zn-haltiger Schweinegülle belastet. Vor allem bei Zn, aber

auch bei Ni und Pb haben sie höhere Salden als die Referenzfläche B021GROE. Allerdings erweist sich die Referenzfläche bei Cu, aufgrund der Anwendung von kupferhaltigen Pflanzenschutzpräparaten, als belastet.

Die historisch belastete B037SCHL hat deutlich geringere, bei Cd, Cu, Pb und Zn sogar negative Salden im Vergleich zur Referenzfläche B012BUEH. Die aktuellen Einträge werden bei diesen Elementen deutlich durch die aufgrund der erhöhten Bodengehalte ebenso erhöhten Pflanzenentzüge überschritten.

Die Fläche B045RIDD gilt aufgrund ihrer Stadtlage ebenfalls als Belastungsfläche im Vergleich zu B003EHME. Von der Deposition her werden beide jedoch dem gleichen Regionstyp 2, Regionen mit Verdichtungsansätzen, zugeordnet. Riddagshausen weist leicht erhöhte atmosphärische Einträge im Direktvergleich mit B003EHME auf, vor allem bei Cu (+33 %), Ni (+17 %), Pb (+17 %) und Zn (+25 %). In Absolutwerten sind diese Abweichungen aber von untergeordneter Bedeutung, so dass sich die (geringfügigen) Unterschiede in den Schwermetallsalden zwischen den beiden Flächen auf den unterschiedlichen Düngemittelsatz zurückführen lassen.

Insgesamt wird deutlich, dass die a priori vorgenommene Zuweisung von BDF als Belas-

tungs- oder Referenzfläche a posteriori relativiert werden muss. So erweist sich die Referenzfläche B021GROE bezüglich Cu als Belastungsfläche, während die Belastungsflächen B002DRUE und B045RIDD eher als gering belastet eingestuft werden können.

Da die Schwermetalleinträge offensichtlich am stärksten durch die organische Düngung beeinflusst sind (vgl. Tab. 14–19), werden, zusätzlich zu den siedlungsbedingten, bewirtschaftungsbedingte Belastungstypen definiert (Tab. 21). Eine Einordnung wird anhand der überwiegend ausgebrachten organischen Düngemittel vorgenommen.

Die Schwermetall-Belastungstypen „historische Belastung“, „Industrie-/Siedlungsnähe“ und „keine/selten organische Düngung“ zeichnen sich durch keine oder einmalige organische Düngemittelgaben aus (Tab. 21). Die Differenzierung der beiden zuerst genannten Belastungstypen wird dennoch aufrecht erhalten, da die Belastungssituation sich im Boden widerspiegelt („historische Belastung“) bzw. die Nähe zu Industrieanlagen und Siedlungsanlagen gegeben ist („Industrie-/Siedlungsnähe“) und deren Einfluss untersucht werden soll. Alle relevanten Flächen wurden bereits zu Beginn des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms als Belastungsflächen definiert.

Tab. 21: Prozentualer Anteil der einzelnen organischen Düngemittel an insgesamt durchgeführten Düngevorgängen zwischen Grund- und Wiederholungsinventur.

BDF	Flächentyp	Schwermetall-Belastungstyp	Summe Düngevorgänge	SG	RG	MG	RM	GM/HTK	PM/SM	Klä	Gä/Ka
B037SCHL	B	historische Belastung	1					100 %			
B002DRUE	B	Industrie-/Siedlungsnähe	0								
B031VINN	B		0								
B045RIDD	B		1				100 %				
B003EHME	R	keine/selten organische Düngung	0								
B043OLDE	R		0								
B010UESE	R		1		100 %						
B012BUEH	R		1	100 %							
B051REIH	R		1				100 %				
B049GLIS	R	Rindergülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Rindergülle	4		25 %	75%					
B064HOHE	R		5		60 %	20%					20 %
B016TETE	B	Klärschlamm	6	33 %	33 %					17 %	17 %
B027BARR	B		7							86 %	14 %
B021GROE	R	PSM	9				22 %	56 %			22 %
B039HAND	R	Schweinegülle, bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Schweinegülle	5	80 %		20%					
B046RODE	R		8	88 %					12 %		
B052SUES	R		13	77 %	15 %	8%					
B067LIST	B		14	100 %							
B033DINK	B		16	63 %	12 %	25%					
B032MARK	B		22		5 %	90%		5 %			

B = Belastungsfläche, R = Referenzfläche, SG = Schweinegülle, RG = Rindergülle, MG = Mischgülle (Rind und Schwein), RM = Rindermist, GM/HTK = Geflügelmist (Hähnchen-/Hühnermist)/Hühnertrockenkot, PM/SM = Pferde-/Schweinemist, Klä = Klärschlamm, Gä/Ka = Gärsubstrat/Kartoffelfruchtwasser.

Der Schwermetall-Belastungstyp „historische Belastung“ zeichnet sich durch Cadmium-, Kupfer-, Blei- und Zinkentzüge aus. Die Bilanzen von Arsen und Nickel sind dagegen schwach positiv (Tab. 22).

Niedersächsische BDF, die sich in der Nähe von Industrieanlagen und Siedlungen befinden, weisen überwiegend negative Bilanzen (Entzüge) bei den Elementen Kupfer und Zink auf. Bei Arsen, Cadmium, Nickel und Blei sind die Bilanzen schwach positiv (Tab. 22). Die As-

Einträge auf der Fläche B031VINN sind dabei auf die Ausbringung von Mineraldünger und nicht auf die Nähe zu Industrie und Siedlungen zurückzuführen.

Der Belastungstyp „keine/selten organische Düngung“ besteht ausschließlich aus Referenzflächen. Diese Flächen weisen in der Regel niedrige, schwach positive Schwermetallbilanzen auf (Tab. 22). Es gibt jedoch eine Auffälligkeit: B012BUEH und B043OLDE haben erhöhte As-Einträge (Mineraldüngung).

Tab. 22: Jährliche Salden der Schwermetall-Belastungstypen zwischen Grund- und Wiederholungsinventur bzw. zwischen Grundinventur und 2006 [g ha⁻¹ a⁻¹].

BDF	Flächentyp	Schwermetall-Belastungstyp	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
B037SCHL	Belastungsfläche	historische Belastung	0,7	-2,0	-24	10,3	-80,2	-361
B002DRUE	Belastungsfläche	Industrie-/ Siedlungsnähe	7,5	1,6	-15	10,1	2,0	-9
B031VINN	Belastungsfläche		13,8	1,2	-26	12,3	14,5	-125
B045RIDD	Belastungsfläche		-0,4	1,0	9	8,6	2,8	157
B003EHME	Referenzfläche	keine/selten organische Düngung	3,7	1,1	0	9,9	6,8	87
B010UESE	Referenzfläche		5,8	0,9	39	14,6	7,4	50
B012BUEH	Referenzfläche		45,1	1,1	20	24,3	6,1	95
B043OLDE	Referenzfläche		31,7	0,7	-22	17,8	1,2	24
B051REIH	Referenzfläche		2,4	1,0	5	9,6	4,8	31
B016TETE	Belastungsfläche	Klärschlamm	1,7	0,4	98	13,4	12,6	376
B027BARR	Belastungsfläche		4,9	3,5	335	50,1	136,6	1 344
B021GROE	Referenzfläche	PSM	0,2	1,5	781	15,6	9,7	574
B049GLIS	Referenzfläche	Rindergülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Rindergülle	1,9	1,0	82	16,7	12,8	214
B064HOHE	Referenzfläche		56,2	-0,2	35	13,8	6,9	105
B032MARK	Belastungsfläche	Schweinegülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Schweinegülle	29,6	1,0	406	28,3	30,8	1 389
B033DINK	Belastungsfläche		1,0	0,4	577	22,0	17,9	2 202
B067LIST	Belastungsfläche		17,6	0,9	610	25,1	11,1	1 769
B039HAND	Referenzfläche		13,6	0,7	139	17,0	8,7	388
B046RODE	Referenzfläche		1,8	0,8	200	15,4	15,3	677
B052SUES	Referenzfläche		30,2	0,9	331	32,3	13,4	1 057

Minimalwert kursiv, Werte oberhalb 90-Perzentil fett.

Die beiden Flächen des Schwermetall-Belastungstyps „Klärschlamm“ weisen keine Gemeinsamkeiten in ihren Bilanzen auf. Dies liegt vermutlich in der Häufigkeit der Ausbringung (Tab. 21) und der unterschiedlichen Herkunft der Klärschlämme begründet (s. Kap. 3.1.1). Die Fläche B016TETE wurde darüber hinaus auch mit anderen Düngern wie Schweine- und Rindergülle sowie Gärsubstrat und Hühnertrockenkot gedüngt (Tab. 21). Die Fläche B027BARR ist mit den höchsten Einträgen an Ni und Pb aller hier untersuchten BDF belastet (Tab. 22).

Der Schwermetall-Belastungstyp „Schweinegülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Schweinegülle“ ist charakterisiert durch hohe Kupfer- und Zinkeinträge (Tab. 22). Innerhalb dieser Kategorie erfolgte die höchste Zinkzufuhr insgesamt. Auffällig ist, dass innerhalb

dieser Gruppe die zu Beginn des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms definierten Belastungsflächen höhere Einträge aufweisen als die Referenzflächen. Dies ist im Wesentlichen auf die Häufigkeit und Menge der organischen Düngung zurückzuführen (Tab. 21). Die Kupfer- und Zinkzufuhr auf den Referenzflächen dieses Belastungstyps übersteigt die der anderen Schwermetall-Belastungstypen.

Die Fläche B021 ist ebenfalls durch hohe Kupfereinträge geprägt, die aber überwiegend durch Pflanzenschutzmittel verursacht wurden. Sie bildet daher einen eigenen Schwermetall-Belastungstyp (Tab. 21 und 22).

Der verbleibende Schwermetall-Belastungstyp „Rindergülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem Anteil an Rindergülle“ weist im Vergleich zum Typ „Schweinegülle bzw. Mischgülle mit erhöhtem

Anteil an Schweinegülle“ deutlich geringere Einträge von Kupfer und Zink auf (Tab. 22). Insgesamt wurde weniger häufig organisch gedüngt (Tab. 21).

Das zu Beginn des niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramms entwickelte Konzept der Belastungs- und Referenzflächen ist sinnvoll und kann insgesamt bestätigt werden. Dieses gilt insbesondere für einen Großteil der Referenzflächen. Die Referenzflächen unter dem Einfluss von schwermetallhaltigen Pflanzenschutzmitteln und einer überwiegenden Düngung mit Schweinegülle weisen dagegen höhere Schwermetalleinträge auf als erwartet.

3.2 Austräge von Schwermetallen mit dem Sickerwasser

Die Austräge von Schwermetallen mit dem Sickerwasser blieben in Kapitel 3.1 unberücksichtigt, da nicht für alle BDF Daten hierzu vorliegen. In Tabelle 23 sind die Sickerwasser-austräge von Schwermetallen für ausgewählte Flächen dargestellt.

Signifikante Arsen- und Bleiausträge mit dem Sickerwasser wurden nicht nachgewiesen. Die Nickelausträge sind auf den Standorten mit Ausnahme von B033DINK auf einem ähnlichen Niveau. Diese BDF ist gekennzeichnet durch die höchsten Sickerwasserfrachten an Nickel, Kupfer und Zink. Die BDF B032MARK weist ähnlich hohe Cadmium- und Kupferausträge auf. Dass der Transport mit dem Sickerwasser auf beiden Flächen vergleichsweise hoch ist, lässt sich anhand der Bodeneigenschaften erklären. Die Bodenart ist Sand (Tab. 2), und der pH-Wert des Bodens liegt zwischen pH 4–5, was für eine geringe Bindung und eine höhere Mobilität dieser Schwermetalle spricht. Beide Flächen wurden überwiegend mit Schweine- oder Mischgülle gedüngt. Diese Art der Bewirtschaftung hatte auf diesen Standorten eine hohe Zufuhr von Kupfer und Zink zur Folge (Tab. 22). Die relativ hohen Nickelausträge auf B033DINK, auch im Vergleich zu B032MARK, lassen sich weder aus den Einträgen und den Bodengehalten, noch aus Unterschieden im Boden-pH-Wert erklären. Hier kommen eventuell Unterschiede in der tatsächlich auf der Fläche eingesetzten Gülle zum Tragen, für die leider nur sehr vereinzelt Proben vom Bewirtschafter der Fläche bereitgestellt worden sind.

Tab. 23: Mittlere jährliche Schwermetallausträge mit dem Sickerwasser auf ausgewählten Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF; Angaben in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$).

BDF	Jahre	Cd	Cu	Ni	Zn
B032MARK	2005–2008	0,7	27,4	7,2	52,6
B033DINK	2005–2008	0,9	46,5	15,8	351,4
B037SCHL	1998–2008	0,15	9,1	4,8	50,1
B051REIH	1998	0,05	7,2	8,9	18,5

Die Sickerwasserausträge der Fläche B033DINK beeinflussen entsprechend die Gesamtbilanzen von Kupfer und Zink (Tab. 24): Der Saldo verringert sich (vgl. Tab. 16). Wenn auch die Gefahr der Anreicherung von Kupfer und Zink im Boden dadurch etwas geringer ist, so ist doch der Austrag in das Grundwasser als problematisch anzusehen.

Trotz der hohen Bodenvorräte an Kupfer und Zink sind die Sickerwasserfrachten auf der Fläche B037SCHL geringer als auf der Fläche B033DINK, was mit der Bodenart (Ton) und dem hohem pH-Wert zu begründen ist. Ohne eine angepasste Bewirtschaftung wären die Austräge vermutlich noch höher. Die Auflagen zur Bewirtschaftung umfassen eine regelmäßige Kalkung zur Stabilisierung des pH-Wertes und eine Fruchtfolge aus Winterweizen und Zuckerrüben.

Tab. 24: (Vervollständigte) Gesamtbilanzen ausgewählter Belastungs- und Referenzflächen im niedersächsischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm unter Berücksichtigung der Entzüge durch das Sickerwasser (vgl. hierzu Tab. 23) (Angaben in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$).

BDF	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
B032MARK	29,5	0,3	379	21,1	30,8	1 336
B033DINK	1,0	-0,5	530	6,2	17,9	1 851
B037SCHL	0,7	-2,1	-33	5,5	-80,2	-411
B051REIH	2,4	0,9	-2	0,7	4,8	13

Die BDF B051REIH ist ebenfalls ein toniger Standort, allerdings mit einer anderen Boden-genese. Es ist zudem keine besondere Belastung durch eine historische bzw. aktuelle Bewirtschaftung gegeben. Die Entzüge von Schwermetallen durch das Sickerwasser sind vergleichsweise gering. Kupfer und Zink wurden kaum durch Dünger zugeführt, allerdings sind die Einträge durch die Deposition hoch genug, um einem potenziellen Mangel an den betrachteten Mikronährstoffen entgegenzuwirken.

4 Diskussion

4.1 Schlussfolgerungen für den Bodenschutz

Abgleich mit den zulässigen zusätzlichen Frachten nach BBodSchV

Auf jeweils fünf BDF wird bei Cu und Zn die zulässige zusätzliche Fracht über alle Wirkungspfade durch die Einträge aus Düngung, Pflanzenschutz und Deposition überschritten (Tab. 25). Haupteintragspfade sind der Einsatz von Cu-haltigen Pflanzenschutzmitteln, von Cu- und Zn-haltiger Schweinegülle und von Klärschlamm.

Der Cu-Einsatz im ökologischen Landbau, im konkreten Fall bei Kartoffeln, stellt ein Problem für den Bodenschutz dar. Auch von der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP 1997) wurden Cu-Einträge durch Pflanzenschutzmittel von bis zu $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ beobachtet. Nach der EG-Verordnung 889/2008 (EG 2008, Anhang II.6) dürfen $6 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ angewendet werden. Die strenger gefasste Richtlinie des Anbauverbandes Bioland begrenzt die Kupfermenge auf $3 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und macht die Anwendung im Kartoffelanbau von einer Ausnahmegenehmigung durch den Verband abhängig (BIOLAND 2009). Eine Harmonisierung zum Bodenschutz wäre, auch bei der EG-Gesetzgebung, anzustreben.

Tab. 25: Zulässige zusätzliche jährliche Fracht (BBODSCHV 1999), Median und Maximum der beobachteten Einträge über Düngung, Pflanzenschutz und Deposition; Anzahl der BDF mit Überschreiten der zulässigen zusätzlichen jährlichen Fracht und Haupteintragsquellen für die Schwermetalle (Angaben in $\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

Schwermetall	zulässige zusätzliche Fracht	Eintrag Düngung/ Pflanzenschutz/Deposition		Anzahl BDF mit Eintrag über zulässiger zusätzlicher Fracht	Haupteintrag
		Median	Maximum		
As	–	5,4	56	–	Kalke Rohphosphate
Cd	6	1,4	3,7	0	Klärschlamm Rohphosphate
Cu	360	81	805	5	Pflanzenschutzmittel Schweinegülle Klärschlamm
Ni	100	17	51	0	Klärschlamm Schweinegülle
Pb	400	11	137	0	Klärschlamm
Zn	1 200	333	2 775	5	Schweinegülle Klärschlamm

Die Kupfer- und Zinkeinträge über Schweinegülle waren im betrachteten Zeitraum zwischen Grund- und Wiederholungsinventur ebenfalls sehr hoch und führten im Mittel der Jahre bei einigen Flächen zum Überschreiten der zulässigen zusätzlichen Frachten. Bei der Frage, ob hier Handlungsbedarf aus Sicht des Bodenschutzes besteht, ist folgendes zu beachten:

- Der betrachtete Zeitraum liegt, je nach Boden-Dauerbeobachtungsfläche, zwischen 1992–2001 und 1999–2006. Damit sind neuere Entwicklungen in der Gesetzgebung noch nicht eingeflossen. Die EG-VO 1334/2003 (EG 2003) reduziert ab 2004 die erlaubten Höchstwerte für Cu und Zn in Futtermitteln. Damit sollten sich nach

2004 auch die Gehalte dieser beiden Substanzen in der Schweinegülle reduziert haben.

- In der vorliegenden Studie werden teilweise Faustzahlen oder Mittelwerte von Standorten über den gesamten Untersuchungszeitraum verwendet, um Lücken in den Datensätzen zu schließen. Damit kann zwar die relative Bedeutung dieses Eintragspfades im Vergleich zu den anderen Eintragspfaden im Mittel der Jahre herausgearbeitet werden. Die zeitliche Entwicklung der Einträge kann allerdings nicht abgeleitet werden. Die Bereitstellung historischer und aktueller Analysedaten durch die LUFA Nordwest wäre hier sehr hilfreich.

- Die Futtermittelverordnung (FUTTMV 2007) sieht Mindestgehalte in Mastschweine-Alleinfuttermitteln von 20 mg/kg Cu und 50 mg/kg Zn vor. Mit der EG-VO 1334/2003 (EG 2003) sind Höchstwerte für Kupfer- und Zinkgehalte in Futtermitteln festgelegt. Für Alleinfuttermittel für Mastschweine liegen die Werte bei 25 mg/kg Cu bzw. 150 mg/kg Zn. Bei Einhaltung dieser Höchstwerte im Futtermittel müssten sich im reinen Schweinemastbetrieb die Cu- und Zn-Gehalte in der Gülle auf 110 bzw. 660 mg/kg reduzieren. In jüngeren Studien (UBA 2007, ZETHNER, SATTELBERGER & HANUS-ILLNAR 2007) wurden Cu- und Zn-Gehalte in Schweinegülle von ca. 200 bzw. 820 mg/kg festgestellt. Diese Werte liegen bereits deutlich unter den Werten, die im Mittel an Schweinegülleproben im BDF-Programm untersucht worden sind: 314 mg Cu/kg und 1022 mg Zn/kg (Tab. 10). Es bestätigt sich somit die Vermutung abnehmender Cu- und Zn-Gehalte in der Schweinegülle nach 2004.

Mit Umsetzung der EG-VO 1334/2003 (EG 2003) werden die Einträge in Böden über die Gülle von Mastschweinebeständen bei Beachtung der Höchstgrenzen rechnerisch auf ca. 200 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ und 1 200 g Zn ha⁻¹ a⁻¹ limitiert (Kalkulation im Anhang, Tab. 28 und Tab. 29). Bei Zink ergibt sich unter Beachtung anderer Einträge aus Deposition und mineralischer Düngung allerdings insgesamt noch eine leichte Überschreitung der zusätzlichen zulässigen Fracht über alle Wirkungspfade nach BBODSCHV (1999) um 18 %. Eine weitere Reduktion der Zinkanwendung in der Schweinemast wäre wünschenswert. Bei Kupfer würden unter Ausschöpfung der Höchstwerte in Futtermitteln sowie unter Berücksichtigung der Einträge über mineralische Düngemittel und die Deposition die zulässigen zusätzlichen Frachten nach BBODSCHV (1999) zu ca. 60 % ausgeschöpft.

Bei den Elementen Cd, Ni und Pb ist die Situation deutlich entspannter. Die Einträge aus Düngung, Pflanzenschutz und Deposition erreichen derzeit maximal 62 (Cd), 51 (Ni) bzw. 30 % (Pb) der zulässigen zusätzlichen Frachten und liegen im Median bei 23 (Cd), 17 (Ni) bzw. 3 % (Pb).

Für Arsen sind bisher keine Vorsorgewerte und keine maximal zulässigen zusätzlichen Frachten definiert worden. Allerdings ist für Arsen ein

Prüfwert zur Beurteilung des Wirkungspfadens Boden–Grundwasser festgelegt worden, der mit 10 µg l⁻¹ nur doppelt so hoch ist, wie der relativ niedrige Wert bei Cadmium (5 µg l⁻¹) (BBODSCHV 1999). Die festgestellten As-Gehalte im Boden liegen im Median etwa 50-mal höher als die Cd-Gehalte. Auch sind die Einträge bei Arsen mit im Median 5,4 g ha⁻¹ a⁻¹ etwa 4-mal so hoch, wie die von Cadmium (Tab. 25). Im Maximum werden As-Einträge bis zu 56 g ha⁻¹ a⁻¹ festgestellt, ein Wert der etwa 15-mal höher liegt als der maximale Eintrag bei Cd. Der wichtigste Eintragspfad ist die mineralische Düngung. Eine umfassende Bewertung der As-Belastung mineralischer Düngemittel und des Bodens unter Berücksichtigung der Toxizität und der Mobilität dieses Stoffes wäre sinnvoll.

Zeitraum bis zum Erreichen der Vorsorgewerte

Da auf den meisten Standorten und für die meisten Schwermetalle positive Bilanzen festgestellt wurden, ist damit zu rechnen, dass langfristig die Schwermetallgehalte im Boden ansteigen und dass früher oder später die Vorsorgewerte nach BBODSCHV (1999) erreicht werden.

Bei den im Bilanzierungszeitraum ermittelten Einträgen können auf einzelnen Standorten bereits in weniger als 100 Jahren die Vorsorgewerte für Cu und Zn erreicht werden (Tab. 26). Dies ergibt sich unter Berücksichtigung der Schwermetallvorräte in der Ackerkrume bei der Grundinventur und der beobachteten mittleren Schwermetallsalden.

Auf den Standorten mit positiven Salden für Cd würden, bei Fortschreibung der aktuellen Bewirtschaftung und Deposition, die Vorsorgewerte frühestens in ca. 450 Jahren erreicht (Tab. 26). Im Median aller Standorte mit positivem Saldo stände hierfür ein Zeitraum von ca. 1 800 Jahren zur Verfügung. Im Hinblick auf ein allgemeines Vorsorgegebot, insbesondere in Anbetracht der Mobilität und Toxizität von Cadmium, sollten jedoch auch hier die Einträge so gering wie möglich gehalten werden.

Bei Ni und Pb wären die Vorsorgewerte frühestens nach 1 500 Jahren erreicht. Angesichts der Schwierigkeit, mit Schwermetallen kontaminierte Böden zu sanieren, sollten jedoch auch bei diesen Schwermetallen die Einträge langfristig reduziert werden.

Für eine nachhaltige Bodennutzung müssten vor allem die Stoffeinträge von Cu und Zn weiter gesenkt werden. Mit Überschreiten der Vorsorgewerte kämen die zulässigen zusätzlichen Frachten auch rechtlich zum Tragen. Die Reduzierung der Einträge wäre dann gesetzlich gefordert.

Tab. 26: Anzahl der Jahre ab Grundinventur, bis bei den Schwermetallen Cd, Cu, Ni, Pb und Zn unter Zugrundelegung der Schwermetallvorräte bei der Grundinventur und der beobachteten Schwermetalleinträge die Vorsorgewerte nach BBodSchV in der Ackerkrume erreicht werden (fett: BDF, bei denen die Vorsorgewerte für einzelne Schwermetalle in weniger als 150 Jahren erreicht werden können).

BDF	Jahr der Grundinventur	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
B002DRUE	1995	2 115	a	14 678	74 873	a
B003EHME	1994	1 398	a	5 081	16 551	1 926
B010UESE	1997	450	1 218	3 326	13 814	2 669
B012BUEH	1992	3 641	5 356	5 082	31 648	4 095
B016TETE	1993	b	490	4 172	7 453	487
B021GROE	1998	578	56	3 935	13 094	253
B027BARR	1997	1 047	396	3 575	1 583	339
B031VINN	1993	1 682	a	11 390	4 428	a
B032MARK	1993	932	82	2 042	4 145	141
B033DINK	1993	3 881	81	2 864	8 662	94
B037SCHL	1995	b	b	6 029	b	b
B039HAND	1995	2 491	396	3 556	13 644	461
B043OLDE	1997	3 585	a	9 282	142 463	17 246
B045RIDD	1995	1 840	7 088	5 606	30 976	742
B046RODE	1998	4 681	639	10 519	13 251	687
B049GLIS	1995	1 511	754	2 967	8 567	668
B051REIH	1996	5 859	30 450	15 920	63 355	15 919
B052SUES	1997	4 878	409	6 502	17 646	525
B064HOHE	1999	a	2 209	3 935	18 889	1 897
B067LIST	1999	1 668	128	2 320	13 509	124

a: negative Schwermetallsalden,

b: Vorsorgewerte wurden bei der Grundinventur bereits überschritten.

Abnahme der Schwermetallgehalte auf belasteten Flächen

Auf B037SCHL, die historisch relativ hoch belastet ist, liegen die Austräge der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn durch pflanzlichen Entzug oder durch Auswaschung über den Einträgen. Die Salden sind negativ. Bezieht man die Salden auf die Vorräte in der oberen Ackerkrume, würde es zwischen 2 000 (Cd) und

13 200 (Pb) Jahre dauern, bis sich, bei aktueller Nutzung, der Schwermetallvorrat im Boden um 20 % reduziert hätte (Tab. 27). Die Vorsorgewerte wären frühestens nach 8 600 Jahren (Cd) erreicht. Diese Werte zeigen die Dimension der Belastung auf und unterstreichen die Bedeutung des vorbeugenden Bodenschutzes. Eine solche Belastung mit Schwermetallen ist in überschaubaren Zeiträumen nicht rückgängig zu machen.

Tab. 27: Anzahl der Jahre ab Grundinventur, bis auf B037SCHL bei den Schwermetallen Cd, Cu, Pb und Zn unter Zugrundelegung der Vorräte in der Ackerkrume (0–0,15 m) bei der Grundinventur und der Bilanzsalden (inkl. Auswaschung) auf (a) die Vorsorgewerte nach BBodSchV erreicht werden, (b) die aktuellen Schwermetallvorräte um 20 % reduziert sind.

Jahre	Cd	Cu	Pb	Zn
(a)	8 626	12 815	63 918	10 866
(b)	1 958	3 008	13 177	2 302

4.2 Schlussfolgerungen für die Landwirtschaft

Pflanzenernährung

Cu und Zn sind Mikronährstoffe, die für die Ertragsbildung relevant sind. Auf Flächen ohne organische Düngung kann der Cu-Saldo negativ werden. Es wurden auf vier Standorten negative Salden in der Größenordnung von -15 bis -25 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ ohne Berücksichtigung der Auswaschung festgestellt. Für die Auswaschung liegen leider keine Werte für nicht organisch gedüngte Sandböden vor. Auf dem lediglich in geringem Umfang organisch gedüngten Tonboden B051REIH wurden 7 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ ausgewaschen.

Die Zn-Salden sind dagegen ohne Berücksichtigung der Auswaschung auf allen Standorten, mit Ausnahme der im Boden belasteten B037SCHL und B031VINN, positiv oder neutral. Mit dem Sickerwasser können weitere Austräge von mindestens 18 g Zn ha⁻¹ a⁻¹, wie am tonigen Standort B051REIH festgestellt, dazukommen. Auf den Sandböden sind noch höhere Austräge mit dem Sickerwasser zu erwarten, Messwerte liegen hier allerdings nur für Flächen vor, die mit Zn-haltiger Schweinegülle gedüngt worden sind. Hier wurden Schwermetallausträge mit dem Sickerwasser von bis zu 924 g Zn ha⁻¹ a⁻¹ festgestellt. Diese Austräge lassen sich allerdings nicht auf Standorte ohne Düngung mit Schweinegülle übertragen.

Derzeit lässt sich aus diesen Ergebnissen nicht ableiten, dass es langfristig zu einer Verarmung der Gesamtgehalte der Böden an den Mikronährstoffen Cu und Zn und damit zu Mangelerscheinungen bei Kulturpflanzen kommen kann. Sogar auf den sandigen Standorten ohne organische Düngung (B003EHME) sind, aufgrund der Deposition, positive Bilanzen zu verzeichnen.

4.3 Schlussfolgerungen für das BDF-Programm

- Empfehlung 1:
Der zehnjährige Zyklus der Wiederholungsuntersuchungen von Bodenproben sollte vor allem bei den Schwermetallen Cd, Cu und Zn fortgeführt werden, um die prognostizierte Auffüllung der Bodengehalte bis zu den Vorsorgewerten zu verifizieren. Da As bisher gesetzlich nicht geregelt ist, sollten auch hier die Untersuchungen fortgeführt werden.

Um eine signifikante Veränderung von Bodengehalten (Trend) nachzuweisen, sollten Werte von mindestens fünf zeitlich aufeinander folgenden Bodenuntersuchungen vorliegen. Bei einem Abstand von zehn Jahren zwischen den Untersuchungen entspricht dies einem Zeitraum von 40 Jahren und damit in etwa dem prognostizierten Zeitraum, innerhalb dessen

bei den ersten Schwermetallen (Cu, Zn) der Vorsorgewert erreicht wird. Auch gilt es zu verifizieren, ob bereits alle Einträge hinreichend genau erfasst sind. Neue Erkenntnisse im Hinblick auf die Schwermetallakkumulation im Boden sollten schnellstmöglich vorliegen, um einen größtmöglichen Handlungsspielraum zu haben.

Schon jetzt zeigen sich erste Handlungserfordernisse. Im Hinblick auf den Bodenschutz ist eine Reduzierung des Cu-Einsatzes im Pflanzenschutz zu fordern. Zum Einsatz Cu- und Zn-haltiger Zusatzstoffe in der Tierhaltung, vor allem in der Schweinehaltung, sind bereits weitgehend hinreichende gesetzliche Maßnahmen erfolgt, deren Wirksamkeit an den Boden-Dauerbeobachtungsflächen überprüft werden kann. Für As sind Vorsorgewerte noch nicht definiert, so dass hier die Ergebnisse aus den BDF zu einer Vervollständigung der Gesetzeslage beitragen können.

■ Empfehlung 2:

Der Austrag der mobilen Schwermetalle As, Cd, Cu und Zn mit dem Sickerwasser sollte auch weiterhin auf den bisher untersuchten vier Intensiv-BDF gemessen werden.

Nach DUIJNISVELD et al. (2008) können auf sandigen Böden vor allem bei den Schwermetallen Cd, Cu, Ni, V und Zn die Geringfügigkeitsschwellen nach LAWA (2004) für die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser überschritten werden. Die 90-Perzentile der beobachteten Sickerwasserkonzentrationen liegen auf gleicher Höhe oder oberhalb der Geringfügigkeitsschwellen.

Aus analytischen Gründen ist die Datenlage beim As noch sehr unvollständig, so dass hier längere Zeitreihen gewonnen werden sollten. B033DINK weist beim toxischen Cd erhöhte Konzentrationen im Sickerwasser auf, und weitere Sandböden zeigen recht hohe Austräge an Cu und Zn, so dass die Lage auch hier weiter verfolgt werden sollte.

■ Empfehlung 3:

Der Austrag der mobilen Schwermetalle As, Cd, Cu und Zn mit dem Sickerwasser sollte auf weiteren, nicht mit Schweinegülle gedüngten Sandstandorten mit niedrigen pH-Werten gemessen werden.

Die Austräge dieser Schwermetalle mit dem Sickerwasser können auf diesen Standorten einen erheblichen Anteil an den Gesamtausträgen oder an den Stoffbilanzen ausmachen. Zudem können so Hintergrundwerte für den Schwermetallaustrag ohne anthropogen durch die Düngung bedingten Schwermetalleintrag erstellt werden. Schließlich kann es auf nicht organisch mit Schweinegülle gedüngten Standorten aufgrund der Austräge langfristig zu einem Cu- oder Zn-Mangel bei den Kulturpflanzen und damit zu Mindererträgen kommen.

■ Empfehlung 4:

Auf den sandigen und meist sauren Standorten sollten neben den Bodenuntersuchungen auf Cu- und Zn-Gesamtgehalte auch regelmäßig Bodenanalysen der CAT-extrahierbaren Fraktion durchgeführt werden, die in Beziehung zum pflanzenverfügbaren Anteil dieser Spurenelemente steht.

Die CAT-Methode wird von der LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2008) eingesetzt, um den Versorgungsgrad der Böden mit pflanzenverfügbarem B, Mn, Cu und Zn abzuschätzen. In Abhängigkeit von der Bodenart und dem pH-Wert der Böden werden Gehaltsklassen für den Versorgungsgrad der Böden abgeleitet und Düngungsempfehlungen gegeben. Durch den Einsatz der CAT-Methode in der Boden-Dauerbeobachtung kann geprüft werden, ob es langfristig zu Karenzen bei der Mikronährstoffversorgung von Kulturpflanzen kommen kann.

■ Empfehlung 5:

Für eine validere und aktuelle Ermittlung der Schwermetalleinträge in Böden durch Düngemittel sollten die Ergebnisse der Düngemittelverkehrskontrolle (Cd in P-Düngern) sowie von repräsentativen Erhebungsuntersuchungen der Schwermetallgehalte in organischen Düngemitteln, vor allem Cu und Zn, herangezogen werden.

Die im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung untersuchten Düngemittelproben reichen für repräsentative Aussagen zu den Schwermetallgehalten der Düngemittel nicht aus. Daher können auch keine Zeitreihen über die Entwicklung dieser Gehalte und damit der Einträge in die Böden erstellt werden. Mögliche zeitliche Entwicklungen wären zu- oder abnehmende Cu- und Zn-Gehalte in Güllen aufgrund

anderer veterinärmedizinischer Rahmenbedingungen oder auch Veränderungen der Cd-Gehalte in Phosphordüngern aufgrund der Globalisierung und einer Erschöpfung der Cd-armen Rohphosphate.

- Empfehlung 6:
Die Einstufung der Flächen in Belastungs- und Referenzflächen ist zu überprüfen.

Es ist eine weitgehend paarweise Zuordnung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Belastungs- und Referenzflächen vorgenommen worden. Beide sollten eine ähnliche Landnutzung und ähnliche Bodeneigenschaften aufweisen und sich vor allem in der Belastungsintensität unterscheiden. Die „Belastung“ war jedoch bei den verschiedenen Paaren deutlich unterschiedlicher Art. Zudem erwiesen sich Referenzflächen z. T. als höher „belastet“, d. h. sie hatten höhere Schwermetallgehalte im Boden oder wiesen höhere Schwermetallbilanzüberschüsse auf, als die zugeordneten Belastungsflächen. Deshalb wurde im vorliegenden Bericht bereits eine erweiterte Typisierung der Belastungsart unter Berücksichtigung der Art und Häufigkeit der organischen Düngung verwendet. Im Gegensatz zur mineralischen Düngung ist die organische Düngung stärker an die betrieblichen Gegebenheiten gekoppelt (vor allem an Art und Umfang des Viehbesatzes) und daher langfristig weniger variabel.

5 Literatur

- AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 3. Aufl., 331 S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil.; Hannover.
- ABFKLÄRV (1992): Klärschlammverordnung vom 15. April 1992. – BGBl. I: 912.
- BARTELS, R., GROH, H. & KLEEFISCH, B. (1997): Bodendauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen. Beschreibung der anfallenden Feldarbeiten. – Arb.-H. Boden 1997/2: 109–122 (Anlage 2), 2 Abb., 2 Tab., 4 Anl.; Hannover (NLfB).
- BAUMGÄRTEL, G. & HÖPER, H. (2000): Trockenmassen und Nährstoffgehalte organischer Düngemittel. – LBEG [Unveröff.].
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I: 502), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 30 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I: 212).
- BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung in der Fassung vom 12. Juli 1999. – BGBl. I: 1554.
- BlMSCHG (2002): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002. – BGBl. I: 3830.
- BIOABFV (1998): Bioabfallverordnung vom 21. September 1998. – BGBl. I: 2955.
- BIOLAND (2009): Bioland-Richtlinien. – 46 S., Bioland e. V., Verband für organisch-biologischen Landbau; Mainz.
- BLUME, H.-P. (2004): Handbuch des Bodenschutzes. – Landsberg (Ecomed).
- BOYSEN, P. (1992): Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln - Literaturlauswertung und Analysen. – UBA-Texte 55/92.
- BRANDT, O. (2003): Eintrags- und Wirkungspfade von Schwermetallen und Arsen in Flußaue-Systemen am Beispiel der Mulde zwischen Bitterfeld/Wolfen und Dessau, Sachsen-Anhalt. – Dissertation, Technische Universität Berlin.
- BVL - BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT (2009): Schwermetalle. – <http://www.bvl.bund.de/cln_007/nn_493374/DE/01__Lebensmittel/03__UnerwStoffeUndOrganismen/05__Schwermetalle/schwermetalle__node.html>, Internetauftritt vom 02.07.2009.
- BzBLG (1971): Benzinbleigesetz vom 5. August 1971. – BGBl. I: 1234.
- DESTATIS (2015): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Anleitung für die Ernte- und Betriebsberichterstattung der landwirtschaftlichen Feldfrüchte und des Grünlandes. – 50 S., Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/Methoden/AnleitungEBE.pdf?__blob=publicationFile>.
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1980): DIN 38406-21 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E), Bestimmung von neun Schwermetallen (Ag, Bi, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn) nach Anreicherung durch Extraktion (E 21). – 1980-09; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1990): DIN 38406-16 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E); Bestimmung von 7 Metallen (Zink, Cadmium, Blei, Kupfer, Thallium, Nickel, Cobalt) mittels Voltammetrie (E 16). – 1990-03; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1991): DIN 38406-7 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E); Bestimmung von Kupfer mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 7). – 1991-09; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1991): DIN 38406-11 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E); Bestimmung von Nickel mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 11). – 1991-09; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1995): DIN 5961 - Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Cadmium durch Atomabsorptionsspektrometrie (ISO 5961: 1994); Deutsche Fassung EN ISO 5961: 1995. – 1995-05; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1998): DIN 38406-6 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser

- und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E) - Teil 6: Bestimmung von Blei mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 6). – 1998-07; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (1999): DIN 38406-29 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E) - Bestimmung von 61 Elementen durch Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS) (E29). – 1999-05; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (2004): DIN 38405-35 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D) - Teil 35: Bestimmung von Arsen - Verfahren mittels Graphitrohrföfen-Atomabsorptionsspektrometrie (GF-AAS) (D 35). – 2004-09; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (2004): DIN 38406-8 - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Kationen (Gruppe E) - Teil 8: Bestimmung von Zink - Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der Luft-Ethin-Flamme (E 8). – 2004-10; Berlin (Beuth).
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (Hrsg.) (2009): DIN 11885 - Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009. – 2009-09; Berlin (Beuth).
- DITTRICH, B. & KLOSE, R. (2008): Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten. – Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft **3/2008**; Dresden.
- DÖRHÖFER, G., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & WENDLAND, F. (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. – Arb.-H. Wasser 2001/1: 109–167, 11 Abb., 16 Tab., 15 Kt.; Hannover (NLfB).
- DÜMV (2008): Düngemittelverordnung vom 16. Dezember 2008. – BGBl. I: 2524.
- DUIJNISVELD, W. H. M., GODBERSEN, L., DILLING, J., GÄBLER, H. E., UTERMANN, J., KLUMP, G., & SCHEEDER, G. (2008): Ermittlung flächen-repräsentativer Hintergrundkonzentrationen prioritärer Schadstoffe im Bodensickerwasser. – 163 S., UBA-Forschungsvorhaben 204 72 264; Hannover (BGR).
- EG (2003): Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 der Kommission vom 25. Juli 2003 zur Änderung der Bedingungen für die Zulassung einer Reihe von zur Gruppe der Spurenelemente zählenden Futtermittelzusatzstoffen. – ABl. L 187: 11 vom 26.07.2003.
- EG (2006): Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. – ABl. L 364: 5, zuletzt geändert am 2. Juli 2008, ABl. L 173: 6.
- EG (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. – ABl. L 250 vom 18.09.2008, S. 1; geändert durch: Verordnung (EG) Nr. 1254/2008 der Kommission vom 15. Dezember 2008, ABl. L 337 vom 16.12.2008, S. 80 (Hefe, Futtermittel, gefärbte Eier).
- FORTMANN, H., GUNREBEN, M., MEESENBURG, H., MEIWES, K.-J., MERKEL, D., KLEEFISCH, B., SCHNEIDER, J. & SEVERIN, K. (2007): Bodenqualitätszielkonzept Niedersachsen – Teil 2: Schwermetalle, organische Belastungen und Säurebildner. – GeoBerichte **7**: 64 S., 28 Abb., 8 Tab., Anh.; Hannover (LBEG).
- FUTTMV (2007): Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Mai 2007. – BGBl. I: 770.
- HINTERMAIER-ERHARD, G. & ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. – Stuttgart (Enke).
- JANKOWSKI, A. (2007): Atmosphärische Stoffeinträge. Vergleich der Messergebnisse unterschiedlicher Depositionsmessnetze in Niedersachsen sowie Repräsentativität bestehender Bezugsmessstellen an Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF). – Bericht des NLWKN, 9 S. [Unveröff.].
- JANKOWSKI, A. & HARMS, B. (2001): Atmosphärische Stoffeinträge. – Vortrag im Rahmen

- der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- KELLER, A., ROSSIER, N. & DESAULES, A. (2005): Schwermetallbilanzen von Landwirtschafts-parzellen der nationalen Bodenbeobachtung; NABO - Nationales Bodenbeobachtungsnetz der Schweiz. – Schriftenreihe der FAL Reckenholz **54**; Zürich.
- KLEEFISCH, B. (2001): Das Boden-Dauerbeobachtungsprogramm von Niedersachsen. – Vortrag im Rahmen der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- KLEEFISCH, B. & KUES, J. (1997): Das Bodendauerbeobachtungsprogramm von Niedersachsen. Methoden und Ergebnisse. – Arb.-H. Boden 1997/2: 8–10; Hannover (NLfB).
- KRUSE, W., SEVERIN, K. & THOLEN, E. (1997): Schlagkartei, Ernteterminierung, Wirtschaftsdünger, Klärschlamm. – Arb.-H. Boden 1997/2: 36–41; Hannover (NLfB).
- KTBL – KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (2000): Faustzahlen für die Landwirtschaft. – 13. Aufl.; Darmstadt.
- KTBL – KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (2005): Organische/mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger. – Datenbank, Version 1.0; Darmstadt.
- KUES, J. & BARTELS, R. (1997): Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen - Anlaß und Zielsetzung. – Arb.-H. Boden 1997/2: 7–8; Hannover (NLfB).
- KUES, J. W. & MEESENBERG, H. (2001): Bodenzustandsbericht Niedersachsen. – Vortrag im Rahmen der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- KUNKEL R. & WENDLAND F. (2002): The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins. – Journal of Hydrology **259**: 152–162.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. & SCHWERDT-FEGER, G. (1994): Bodenkunde. – Stuttgart (Ulmer).
- LABO – BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden, Text und Anhang. – 3. überarb. u. erg. Aufl.; o. O.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2005): Klärschlammbericht 2004. – <http://cdl.niedersachsen.de/blob/images/C12559430_L20.pdf>.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2006): Klärschlammbericht 2005. – http://cdl.niedersachsen.de/blob/images/C6431298_L20.pdf.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2008): Richtwerte für die Düngung in Niedersachsen. Auszug aus den Düngungsrichtlinien, Stand März 2008, Mikronährstoffe Bor, Mangan, Kupfer und Zink. – Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover, 2 S., <<http://www.lufa-nord-west.de/lufa2/downloads/pdf/duengeempfehlungmikronaehrstoffe.pdf>>.
- LAWA – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (2004): Methodik und Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. – Stand: 02.09.2003, Länderarbeitsgruppe Wasser (LAWA), Unterausschuss „Geringfügigkeitsschwellen“, 20 S., Anhang 195 S.
- LBP – BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BODENKULTUR UND PFLANZENBAU (1997): Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) - Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985–1995; Teil II: Stoffeinträge, Stoffausträge, Schwermetall - Bilanzierung verschiedener Betriebstypen. – Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau **5/97**.
- LITZ, N., WILCKE, W. & WILKE, B.-M. (Hrsg.) (2005): Bodengefährdende Stoffe. Bewertung - Stoffdaten - Ökotoxikologie - Sanierung. – Landsberg (Ecomed).
- LUFA (1998): Dichten von Flüssigdüngern. – schriftliche Mitteilung der LUFA Nordwest.
- NEUGSCHWANDTNER, R. W., TLUSTOŠ, P., KOMÁREK, M. & SZÁKOVÁ J. (2008): Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: Laboratory versus field scale measures of efficiency. – Geoderma **144** (3-4), 446–454.
- NIBIS®: Niedersächsisches Bodeninformationssystem. – <<http://nibis.lbeg.de/cardo-map3/>>.

- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT UND KLIMASCHUTZ (2009): Umweltbericht 2006. – <www.umweltbericht.niedersachsen.de> (unter: Schutzgüter > Luftqualität > Luftschadstoffbelastung > Schwermetalle).
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2009): Depositionsmessstellen - Belastungsschwerpunkte: Stoffeinträge im Freiland und im Bestand. – <http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C6588301_N5745757_L20_D0_I5231158.html>
- PLUQUET, E. & KLEEFISCH, B. (2001): Schwermetallgehalte und Schwermetallbilanzierung in niedersächsischen Böden. – Vortrag im Rahmen der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- RICHTLINIE EG (2003): Richtlinie 2003/4/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2003 über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen und zur Aufhebung der Richtlinie 90/313/EWG des Rates. – ABl. L 41 vom 14.02.2003: 26–32.
- SCHÄFER, W. (1997): Bodenwasserhaushalt und Stofftransport. – Arb.-H. Boden 1997/2: 41–44; Hannover (NLfB).
- SCHÄFER, W. & KLEEFISCH, B. (2001): Nutzung niedersächsischer Boden-Dauerbeobachtungsflächen als Forschungsplattform. – Vortrag im Rahmen der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- SCHIEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde – 15. Aufl.; Berlin (Spektrum).
- SCHNEIDER, J. (1999): Schwermetalle in Böden Niedersachsens. Hintergrundwerte für Schwermetalle in Böden Niedersachsens. Schwermetallbelastung in den Böden der Talauen des Harzes und des Harzvorlandes. Schwermetalle in einem städtischen Belastungsraum. – Arb.-H. Boden 1999/2: 24 S., 3 Abb., 4 Tab., 3 Kt.; Hannover (NLfB).
- SEIFERT, H. (2001): Bodeninformation - Ein Beitrag zur Daseinsvorsorge. – Vortrag im Rahmen der Tagung „10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen“, 17./18.10.2001, Hannover (NLfB).
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2004): Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. – UBA-Texte **06/04**.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2007): Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung. – UBA-Texte **30/07**.
- VDLUFA – VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (1976): Methodenbuch, Band III - Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. – 3. Aufl., inkl. 1.–7. Ergänzungslieferung 1983/1988/1993/1997/2004/2006/2007, 1 850 S.
- VDLUFA – VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (1995): Methodenbuch, Band II.1 - Die Untersuchung von Düngemitteln. – 4. Aufl., inkl. 1.–4. Ergänzungslieferung 1999/2004/2007, ca. 1 100 S.
- ZETHNER, G., PFUNDTNER, E. & HUMER, J. (2002): Qualität von Abfällen aus Biogasanlagen. – Monographien **160**; Wien.
- ZETHNER, G., SATTELBERGER, R. & HANUSILLNAR, A. (2007): Kupfer und Zink im Wirtschaftsdünger von Schweine- und Geflügelmastbetrieben. – Umweltbundesamt GmbH (Hrsg.), Report Band 0073; Wien.

6 Anhang

Tab. 28: Theoretische Einträge von Zink über Schweinegülle in Böden bei Ausnutzung der Höchstwerte für Zink im Alleinfuttermittel Schwein nach EG (2003).

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
1. Berechnung der Anzahl der Schweine unter Einhaltung der max. auszubringenden N-Menge pro ha			
maximal zulässige N-Menge pro ha über organische Düngemittel	170	kg N ha ⁻¹	DÜMV (2008), § 4
N-Ausscheidung/Tierplatz/Jahr bei einphasiger Fütterung	14,4	kg N Mastplatz ⁻¹ a ⁻¹	KTBL (2005), S. 262
Mastplätze bei max. zulässiger N-Menge	12	Mastplätze a ⁻¹	berechnet
Anzahl Schweine/Platz (220 kg Zuwachs/a; 90 kg Zuwachs/Schwein)	2,4	Schweine Mastplatz ⁻¹	berechnet
Anz. Schweine für max. zulässige N-Menge	29	Schweine ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
2. Berechnung der benötigten Futtermenge			
Gewichtszunahme von 20 auf 50 kg	866	kg Gewichtszunahme ha ⁻¹ a ⁻¹	berechnet
Gewichtszunahme von 50 auf 110 kg	1 731	kg Gewichtszunahme ha ⁻¹ a ⁻¹	berechnet
Futterverwertung 20–50 kg; 1:	2,4	kg Futter kg ⁻¹ Schwein	KTBL (2005), eig. Berechnung
Futterverwertung 50–110 kg; 1:	3,3	kg Futter kg ⁻¹ Schwein	KTBL (2005), eig. Berechnung
Schweinefutterbedarf (20–110 kg)	7 792	kg Futter ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
3. Berechnung der im Futtermittel eingesetzten Menge an Zink, bezogen auf 1 ha			
Zn-Gehalt im Futter	150	mg kg ⁻¹	EG 2003
Zn-Menge im Futter/ha	1 169	g Zn ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
4. Bewertung nach BBodSchV			
Einträge aus mineralischer Düngung	50	g Zn ha ⁻¹ a ⁻¹	Tab. 19
Einträge aus Deposition	200	g Zn ha ⁻¹ a ⁻¹	Tab. 19
potenzielle Einträge aus organischer Düngung	1 169	g Zn ha ⁻¹ a ⁻¹	
potenzielle Gesamteinträge	1 419	g Zn ha⁻¹ a⁻¹	
maximal zulässige Fracht nach BBodSchV	1 200	g Zn ha ⁻¹ a ⁻¹	BBodSCHV (1999)
Ist in % von Soll	118	%	berechnet
5. Berechnung der Zn-Gehalte in der Gülle			
Güllemenge/Stallplatz	3,0	m ³ /Platz/a	KTBL (2005), S. 264
Güllemenge/ha	35	m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹	
Zn-Konzentration in der Gülle	33	g Zn m ⁻³	
TS-Gehalt	5	%	
Zn-Konzentration in der Gülle	660	mg Zn kg⁻¹ Gülle	

Tab. 29: Theoretische Einträge von Kupfer über Schweinegülle in Böden bei Ausnutzung der Höchstwerte für Kupfer im Alleinfuttermittel Schwein nach EG (2003), Ergänzung zu Tabelle 28.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
1. Berechnung der Anzahl der Schweine unter Einhaltung der max. auszubringenden N-Menge pro ha			
maximal zulässige N-Menge pro ha über organische Düngemittel	170	kg N ha ⁻¹	DüMV (2008), § 4
N-Ausscheidung/Tierplatz/Jahr bei einphasiger Fütterung	14,4	kg N Mastplatz ⁻¹ a ⁻¹	KTBL (2005), S. 262
Mastplätze bei max. zulässiger N-Menge	12	Mastplätze a ⁻¹	berechnet
Anzahl Schweine/Platz (220 kg Zuwachs/a; 90 kg Zuwachs/Schwein)	2,4	Schweine Mastplatz ⁻¹	berechnet
Anz. Schweine für max. zulässige N-Menge	29	Schweine ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
2. Berechnung der benötigten Futtermenge			
Gewichtszunahme von 20 auf 50 kg	866	kg Gewichtszunahme ha ⁻¹ a ⁻¹	berechnet
Gewichtszunahme von 50 auf 110 kg	1731	kg Gewichtszunahme ha ⁻¹ a ⁻¹	berechnet
Futterverwertung 20–50 kg; 1:	2,4	kg Futter kg ⁻¹ Schwein	KTBL (2005), eig. Berechnung
Futterverwertung 50–110 kg; 1:	3,3	kg Futter kg ⁻¹ Schwein	KTBL (2005), eig. Berechnung
Schweinefutterbedarf (20–110 kg)	7 792	kg Futter ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
3. Berechnung der im Futtermittel eingesetzten Menge an Kupfer, bezogen auf 1 ha			
Cu-Gehalt im Futter	25	mg kg ⁻¹	EG 2003
Cu-Menge im Futter/ha	195	g Cu ha⁻¹ a⁻¹	berechnet
4. Bewertung nach BBodSchV			
Einträge aus mineralischer Düngung	10	g Cu ha ⁻¹ a ⁻¹	Tab. 16
Einträge aus Deposition	17	g Cu ha ⁻¹ a ⁻¹	Tab. 16
potenzielle Einträge aus organischer Düngung	195	g Cu ha ⁻¹ a ⁻¹	
potenzieller Gesamteintrag	222	g Cu ha⁻¹ a⁻¹	
maximal zulässige Fracht nach BBodSchV	360	g Cu ha ⁻¹ a ⁻¹	BBODSCHV (1999)
Ist in % von Soll	62	%	berechnet
5. Berechnung der Cu-Gehalte in der Gülle			
Güllemenge/Stallplatz	3,0	m ³ /Platz/a	KTBL (2005), S. 264
Güllemenge/ha	35	m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹	
Cu-Konzentration in der Gülle	5,5	g Cu m ⁻³	
TS-Gehalt	5	%	
Cu-Konzentration in der Gülle	110	mg Cu kg⁻¹ Gülle	

Tab. 30: Trockenmasse (TM) in Abhängigkeit von der Fruchtart.

Frucht	TM %	Quelle
P/ Ackerbohnen/ Bohne	88,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Ackergras/ Grünpflanze/ 1. Schnitt	19,9	Mittelwert eigene Daten
P/ Ackergras/ Grünpflanze/ 2. Schnitt	17,1	Mittelwert eigene Daten
P/ Ackergras/ Grünpflanze/ 3. Schnitt	22,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Ackergras/ Grünpflanze/ 4. Schnitt	17,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Ackergras/ Grünpflanze/ 5. Schnitt	18,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Aufwuchs	82,3	Mittelwert eigene Daten
P/ Chicorée/ Blatt	13,9	Mittelwert eigene Daten
P/ Chicorée/ Rübe	26,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Dinkel/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Dinkel/ Stroh	82,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Erbsen/ Erbsen	74,5	Mittelwert eigene Daten
P/ Gemenge Sommergerste-Hafer/ Korn	72,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Gemenge Sommergerste-Hafer/ Stroh	86,0	Mittelwert aus Hafer/Stroh und Sommergerste/Stroh
P/ Gemenge Sommergerste-Hafer-Erbsen/ Korn	85,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Gemenge Sommergerste-Hafer-Erbsen/ Stroh	82,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Gemenge Wicken-Sommergerste/ Korn	86,9	Mittelwert eigene Daten
P/ Gemenge Winterroggen-Winterwicken/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Gras/ Grünpflanze/ 1. Schnitt	20,6	Mittelwert eigene Daten
P/ Grassamen/ Grünpflanze/ 1. Schnitt	78,3	Mittelwert eigene Daten
P/ Grassamen/ Samen	84,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Hafer/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Hafer/ Stroh	87,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Kartoffeln/ Knolle	22,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Klee gras/ Grünpflanze	16,5	Mittelwert eigene Daten
P/ Klee gras/ Grünpflanze/ 1. Schnitt	21,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Klee gras/ Grünpflanze/ 2. Schnitt	30,6	Mittelwert eigene Daten
P/ Lupine/ Korn	45,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Mais/ CCM	55,3	Mittelwert eigene Daten
P/ Mais/ Ganzpflanze	35,1	Mittelwert eigene Daten
P/ Mais/ Kolben	64,1	Mittelwert eigene Daten
P/ Mais/ Korn	58,8	Mittelwert eigene Daten
P/ Möhren/ Kraut	28,1	Mittelwert eigene Daten
P/ Möhren/ Möhren	12,7	Mittelwert eigene Daten
P/ Öllein/ Korn	87,6	Mittelwert eigene Daten
P/ Pastinacken/ Rüben	24,3	Mittelwert eigene Daten
P/ Rote Beete/ Rüben	10,1	Mittelwert eigene Daten

Tab. 30: (Fortsetzung).

Frucht	TM %	Quelle
P/ Sommergerste/ Ganzpflanze	84,9	gewichtetes Mittel aus Sommergerste/Korn + Stroh mittels Korn:Stroh-Verhältnis
P/ Sommergerste/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Sommergerste/ Stroh	84,3	Mittelwert eigene Daten
P/ Sommerraps/ Korn	74,1	Mittelwert eigene Daten
P/ Sommerroggen/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Sommertriticale/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Sommertriticale/ Stroh	74,7	Mittelwert eigene Daten
P/ Sommerweizen/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Spargel/ Spargel	5,7	Mittelwert eigene Daten
P/ Wintergerste/ Ganzpflanze	83,5	gewichtetes Mittel aus Wintergerste/Korn + Stroh mittels Korn:Stroh-Verhältnis
P/ Wintergerste/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Wintergerste/ Stroh	81,2	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterraps/ Korn	91,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterraps-Winterwicken/ Korn	92,9	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterroggen/ Ganzpflanze	83,7	gewichtetes Mittel aus Winterroggen/Korn + Stroh mittels Korn:Stroh-Verhältnis
P/ Winterroggen/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Winterroggen/ Stroh	82,4	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterroggen+Triticale/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Wintertriticale/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Wintertriticale/ Stroh	85,5	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterweizen/ Korn	86,0	DESTATIS (2015)
P/ Winterweizen/ Stroh	83,7	Mittelwert eigene Daten
P/ Winterzwiebeln/ Zwiebeln	12,0	Mittelwert eigene Daten
P/ Zuckerrüben/ Rüben	23,7	Mittelwert eigene Daten

Tab. 31: Schwermetallgehalte in mineralischen Düngemitteln und Referenzen (Schlüssel am Ende der Tabelle).

Dünger (Name)	Dünger (Nr.)	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
40er Kali mit Na	D3011	0,49	2	0,01	2	0,74	2	0,62	2	0,29	2	2,26	2
60er Kali, Kaliumchlorid 60	D301	0,49	2	0,01	2	0,74	2	0,62	2	0,29	2	2,26	2
Alzon 25	D107												
Alzon 47	D1075												
Alzon flüssig (AHL + Didin)	D106												
Alzon flüssig (AHL + Didin) in kg	D1060												
Amfert NPK 12-12-17-2	D61013	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2
AMIX Bor flüssig	D100010												
Ammonnitrat-Harnstoff-Lsg. (AHL)	D105	0,06	1	0,01	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Ammonnitrat-Harnstoff-Lsg. (AHL) in kg	D1050	0,06	1	0,01	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Ammonsulfatsalpeter	D109	0,3	2	0,01	2	2,49	2	0,39	2	0,07	2	4,68	2
Ammonthiosulfat (ATS)	D1101												
Bittersalz, Magnesiumsulfat	D403	0,22	2	0,02	2	1,88	2	0,37	2	0,12	2	10	2
Diammonphosphat	D801	7,97	2	93,3	2	26,5	2	35,1	2	0,87	2	330	2
Esta Kieserit fein mit S	D401	3,25	2	0,05	2	0,61	2	1,05	2	0,01	2	5,69	2
Esta Kieserit granuliert mit S	D402	3,25	2	0,05	2	0,61	2	1,05	2	0,01	2	5,69	2
Foliarel Flussmangan	D10114												
Foliarel Proti-Bor	D10113											3 500	4
Foliarel QS	D10111												
Folicin-Bor fl	D1018												
Folicin-Combi fl	D10181												
Harnstoff	D104	0,09	2	0,01	2	0,83	2	0,27	2	0,35	2	3,67	2
Hüttenkalk	D505	3,99	2	0,01	2	0,086	2	0,01	2	0,01	2	60,7	2
Hydro 13+13+21	D605	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2

Tab. 31: (Fortsetzung).

Dünger (Name)	Dünger (Nr.)	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
Kalkammonsalpeter	D101	0,35	2	0,05	2	1,47	2	0,03	2	21,2	2	40,9	2
Kalkammonsalpeter mit MgO	D102	0,35	2	0,05	2	1,47	2	0,03	2	21,2	2	40,9	2
Kalkstickstoff	D112			0	3	7,8	3	15,8	3	0	3	5,9	3
kohlensaurer Kalk mit Mg	D507	6,22	2	0,52	2	5,42	2	3,62	2	38	2	91,9	2
kohlensaurer Magnesiumkalk	D508	6,22	2	0,52	2	5,42	2	3,62	2	38	2	91,9	2
Konverterkalk	D513	0,63	2	0,02	2	0,01	2	3,19	2	0,01	2		
Konverterkalk, gekörnt	D514	0,63	2	0,02	2	0,01	2	3,19	2	0,01	2		
Konverterkalk, Hamburger	D51302	0,63	2	0,02	2	0,01	2	3,19	2	0,01	2		
Korn-Kali mit MgO	D302	0,49	2	0,01	2	0,74	2	0,62	2	0,29	2	2,26	2
Kupfer-Questuran	D1015			0	4	224 000	4						
LEBOSOL-Mangan500	D101715												
LEBOSOL-Triple	D101725					64 000	4					49 000	4
Librel Bor	D1019					140 000	4						
Librel Mangan	D1023												
Magnesia-Kainit	D303	3,25	2	0,05	2	0,61	2	1,05	2	0,01	2	5,69	2
Magnesium-Mischkalk	D520												
Mangansulfat	D1017												
Micro Top	D4031	3,25	2	0,05	2	0,61	2	1,05	2	0,01	2	5,69	2
Monoammonphosphat	D802												
Nitrophos 20/20	D804	4,27	2	38,8	2	11,3	2	0,01	2	3,73	2	70,3	2
Nitrophos 26/14	D805	4,27	2	38,8	2	11,3	2	0,01	2	3,73	2	70,3	2
Nitrophoska 12+12+17 (2/4)	D617	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2
Nitrophoska 13+13+21	D604	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2
Nitrophoska 14+10+20	D618	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2
Nitrophoska-Magnesium 13+9+16 (4)	D615	2,9	2	116	2	26,7	2	23,1	2	2,18	2	82,8	2

Tab. 31: (Fortsetzung).

Dünger (Name)	Dünger (Nr.)	As [mg/kg]	As_Referenz	Cd [mg/kg]	Cd_Referenz	Cu [mg/kg]	Cu_Referenz	Ni [mg/kg]	Ni_Referenz	Pb [mg/kg]	Pb_Referenz	Zn [mg/kg]	Zn_Referenz
Nutribor	D10161											1 000	4
Nutrimix	D10162					30 000	4					30 000	4
Patentkali, Kaliumsulfat mit Mg	D305	3,25	2	0,05	2	0,61	2	1,05	2	0,01	2		
Piagran 46	D1051	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Piamon 33-S	D1112												
PK 12+24 (5)	D719	4,06	2	280	2	20,1	2	17,9	2	0,38	2	202	2
Profi Triple Selen	D10167					50 000	4					150 000	4
RHE-KA-PHOS 11+22+3MgO+5S	D7121	4,06	2	280	2	20,1	2	17,9	2	0,38	2	202	2
RHE-KA-PHOS 16+20 (8)	D715	4,06	2	280	2	20,1	2	17,9	2	0,38	2	202	2
Rückstandskalk, Carbokalk	D501	5,1	2	0,1	2	2	2	15,4	2	0,01	2	44,6	2
schwefelsaures Ammoniak	D111	0,15	2	0,01	2	0,82	2	0,27	2	0,06	2	0,41	2
Solubor	D1016												
Stickstoffmagnesia (Hydro)	D114												
Thomaskali 10+20+3 MgO	D707	1,76	2	518	2	5,68	2	4,41	2	4,7	2	134	2
Thomaskali 12+18+3 MgO	D708	1,76	2	518	2	5,68	2	4,41	2	4,7	2	134	2
Thomaskali 7+21+3 MgO	D705	1,76	2	518	2	5,68	2	4,41	2	4,7	2	134	2
Thomaskalk 6	D516	2,82	2	2,05	2	0,01	2	6,45	2	6,6	2	126	2
Triple-Superphosphat	D203	6,24	2	136	2	15,3	2	20,9	2	14,7	2	354	2
Wuxal 12+4+6	D1005												

Referenzen: 1: Mittelwerte eigener Analysen (2000–2006); 2: DITTRICH & KLOSE (2008); 3: BOYSEN (1992); 4: Herstellerangaben.

Tab. 32: Schwermetallgehalte in organischen Düngemitteln und Referenzen (Schlüssel am Ende der Tabelle).

BDF	Typ	TM [%]	TM [%] Referenz	Dichte [t/m³]	Dichte Referenz	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
B010UESE	Rindergülle	6,1	1a	1	3	0,4	4	0,4	5	46,1	1a	7,7	5	8,9	5	267	1a
B012BUEH	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	352 +/-22	1b	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B016TETE	Kalkklärschlamm	23,9 +/-1,0	1b					0,56	1	126	1a	10,0	1a	<10	1a	126	1a
B016TETE	Rindergülle	10,0	2	1	3	0,4	4	0,4	5	49,5 +/-15	1c	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B016TETE	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	314 +/-216	1c	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B021GROE	Hühnermist	55,0	2					0,85	7	65	7			8	7	425	6
B021GROE	Rindermist	22,0	2					0,3	5	25	6	4,1	5	5,2	5	122	5
B021GROE	Hühnertrockenkot	59,4 +/-8,3	1c			0,4	4	0,2	5	54,8 +/-24,1	1c	8,2	5	2,4	5	383 +/-68	1c
B027BARR	entwässerter Klärschlamm	22,8	1a					2,42	1a	260	1a	27,0	1a	114	1a	1094	1a
B027BARR	Gärsubstrat	7,6 +/-0,7	1b					<0,5	1a	42	1b	37,0	1a	7,2	1a	291	1a
B027BARR	Nassschlamm	2,8	1a			2,45	1a	0,52	1a	73	1a	26,0	1a	<10	1a	1356	1a
B027BARR	Nassschlamm	4,9	1a			2,45	1a	0,81	1a	258	1a	25,0	1a	<10	1a	646	1a
B027BARR	Nassschlamm	10,0	1a			2,45	1a	1,46	1a	223	1a	28,0	1a	74	1a	906	1a
B027BARR	Nassschlamm	10,0	1a			2,45	1a	1,28	1b	213	1b	28,5	1b	74	1b	977	1b
B027BARR	Nassschlamm	5,1	1a			2,45	1a	2,32	1a	298	1a	35,0	1a	74	1a	999	1a
B032MARK	Rinder-/ Schweinegülle	4,6	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	104	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/ Schweinegülle	9,0	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	133	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/ Schweinegülle	7,1	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	141	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b

Tab. 32: (Fortsetzung).

BDF	Typ	TM [%]	TM [%] Referenz	Dichte [t/m ³]	Dichte Referenz	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	7,2	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	417	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	8,1	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	148	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	6,8	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	132	1a	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	7,8	1a	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	173 +/-95	1b	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	6,4 +/-1,7	1b	1	3	2,1	1b	<0,5	1b	173 +/-95	1b	8,0	1b	6,75	1b	625 +/-228	1b
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	6,2	1a	1	3	<2,5	1a	<0,5	1a	77	1a	<5,0	1a	<5	1a	353	1a
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	3,5	1a	1	3	<2,5	1a	<0,5	1a	202	1a	10,0	1a	11	1a	873	1a
B032MARK	Kalb-/Rinder-/Schweinegülle	0,9	1a	1	3	<2,5	1a	<0,5	1a	70	1a	<5,0	1a	<5,0	1a	560	1a
B032MARK	Rindergülle	10,0	2	1	3	0,4	4	0,4	5	49,5 +/-15	1c	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B032MARK	Hähnchenmist	35,9	1a			2,54	1a	<0,5	1a	198	1a	12,0	1a	<5	1a	549	1a
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	4,1	1a	1	3	2,95	1a	<0,5	1a	171	1a	14,0	1a	20	1a	736	1a
B032MARK	Rinder-/Schweinegülle	8,9	1a	1	3	2,99	1a	<0,5	1a	135	1a	6,0	1a	<5	1a	536	1a
B033DINK	Rinder-/Schweinegülle	9,8	1a	1	3	<2,5	1a	<0,5	1a	91	1a	<5,0	1a	<5	1a	199	1a
B033DINK	Rinder-/Schweinegülle	8,1	1a	1	3	<2,5	1b	<0,5	1b	148	1a	<5,0	1b	<5	1b	214	1b
B033DINK	Rinder-/Schweinegülle	9,6	1a	1	3	<2,5	1a	<0,5	1a	67	1a	<5,0	1a	<5,0	1a	228	1a
B033DINK	Schweinegülle	2,0	1a	1	3	<2,50	1a	<0,5	1a	770	1a	18,0	1a	6,0	1a	1280	1a

Tab. 32: (Fortsetzung).

BDF	Typ	TM [%]	TM [%] Referenz	Dichte [t/m³]	Dichte Referenz	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
B033DINK	Rindergülle	10,0	2	1	3	0,4	4	0,4	5	49,5 +/-15	1c	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B033DINK	Schweinegülle	7,7	1a	1	3	0,5	4	0,4	5	195	1a	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B033DINK	Schweinegülle	15,7	1a	1	3	0,5	4	0,4	5	134	1a	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B033DINK	Schweinegülle	12,6	1a	1	3	0,5	4	0,4	5	111	1a	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B033DINK	Schweinegülle	9,5 +/-6,0	1c	1	3	0,5	4	0,4	5	303 +/-314	1b	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B037SCHL	Hühnertrockenkot	58,6	1a			0,4	4	0,2	5	93,8	1a	8,2	5	2,4	5	383 +/-68	1c
B039HAND	Rinder-/ Schweinegülle	7,5	2	1	3	0,45	4 (50/50)	0,4	5 (50/50)	173 +/-103	1c	9,6	5 (50/50)	7,3	5 (50/50)	487 +/-259	1c
B039HAND	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	314 +/-216	1c	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B045RIDDD	Rindermist	22,0	2					0,3	5	25	5	4,1	5	5,2	5	122	5
B046RODE	Pferde-/ Schweinemist	22,0	2					0,3	MW (5, 6)	108	MW (5, 6)			3,45	MW (5, 6)	270	MW (5, 6)
B046RODE	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	314 +/-216	1c	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B049GLIS	Rindergülle	10,0	2	1	3	0,4	4	0,4	5	49,5 +/-15	1c	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B049GLIS	Rinder-/ Schweinegülle	17,4	1a	1	3	0,45	4 (50/50)	0,4	5 (50/50)	233	1a	9,6	5 (50/50)	7,3	5 (50/50)	498	1a
B049GLIS	Rinder-/ Schweinegülle	7,5	2	1	3	0,45	4 (50/50)	0,4	5 (50/50)	173 +/-103	1c	9,6	5 (50/50)	7,3	5 (50/50)	487 +/-259	1c
B051REIH	Rindermist	22,0	2					0,3	5	25	5	4,1	5	5,2	5	122	5
B052SUES	Rindergülle	10,0	2	1	3	0,4	4	0,4	5	49,5 +/-15	1c	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c

Tab. 32: (Fortsetzung).

BDF	Typ	TM [%]	TM [%] Referenz	Dichte [t/m ³]	Dichte Referenz	As [mg/kg]	As Referenz	Cd [mg/kg]	Cd Referenz	Cu [mg/kg]	Cu Referenz	Ni [mg/kg]	Ni Referenz	Pb [mg/kg]	Pb Referenz	Zn [mg/kg]	Zn Referenz
B052SUES	Rinder-/Schweinegülle	7,5	2	1	3	0,45	4 (50/50)	0,4	5 (50/50)	173 +/-103	1c	9,6	5 (50/50)	7,3	5 (50/50)	487 +/-259	1c
B052SUES	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	314 +/-216	1c	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B064HOHE	Gärsubstrat	6,4	6					0,5	5	54,6	5	13,2	5	15,4		287	5
B064HOHE	Rindergülle	7,3	1a	1	3	0,4	4	0,4	5	75,6	1a	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B064HOHE	Rindergülle	8,8	1a	1	3	0,4	4	0,4	5	42,4	1a	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B064HOHE	Rindergülle	12,4	1a	1	3	0,4	4	0,4	5	58,4	1a	7,7	5	8,9	5	230 +/-47	1c
B064HOHE	Rinder-/Schweinegülle	8,4	1a	1	3	0,45	4 (50/50)	0,4	5 (50/50)	173 +/-103	1c	9,6	5 (50/50)	7,3	5 (50/50)	487 +/-259	1c
B064HOHE	Schweinegülle	3,1	1a	1	3	0,5	4	0,4	5	260,6	1a	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c
B067LIST	Schweinegülle	5,0	2	1	3	0,5	4	0,4	5	314 +/-216	1c	8,1	5	5,7	5	1022 +/-379	1c

Referenzen: 1a: Einzelanalyse; 1b: Mittelwert aller Analysen der BDF; 1c: Mittelwert aller Analysen 2000–2006; 2: BAUMGÄRTEL & HÖPER (2000); 3: LUFA (1998); 4: UBA (2004) Mittelwerte Tab. 5–22 (OL); 5: KTBL (2005) (Gärsubstrat = Rindergülle/Mais); 6: UBA (2007).

Autoren

- Dörte Kamermann
ehemals
Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.
- Hubert Groh
Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie,
Referat L 3.4 „Boden- und
Grundwassermonitoring“,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.
- Dr. Heinrich Höper
Landesamt für Bergbau,
Energie und Geologie,
Referat L 3.4 „Boden- und
Grundwassermonitoring“,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.

ISSN 1864 – 7529