

Forschungsbericht

Nr. 118

Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential

Verfasser:

Kühen, V.; Goldbach, H. E.

Institut für Pflanzenernährung

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Endenicher Allee 15, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2297; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, Mai 2004

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. H. E. Goldbach

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. agr. Volker Kühnen

Institut für Pflanzenernährung
Karlrobert-Kreiten Straße 13
53115 Bonn
Tel.: 02 28 / 73 28 51

Zitiervorschlag:

KÜHNEN, V. und GOLDBACH, H. E. (2004): Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 118, 213 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>III</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>VI</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>VII</i>
1 <i>Einleitung</i>	1
2 <i>Literaturübersicht - Schwermetalle in der Landwirtschaft</i>	2
2.1 <i>Pflanzliche Produktion</i>	4
2.1.1 <i>Böden</i>	4
2.1.2 <i>Betriebsmittel</i>	8
2.1.3 <i>Ernteprodukte</i>	18
2.2 <i>Tierische Produktion</i>	26
2.2.1 <i>Betriebsmittel</i>	26
2.2.2 <i>Tierische Erzeugnisse</i>	32
2.3 <i>Entwicklung – aktuelle Bestrebungen - gesetzliche Regelwerke</i>	34
2.4 <i>Schwermetalle in der Luft/Deposition</i>	37
2.5 <i>Schwermetallaustrag durch Sickerwasser</i>	38
3 <i>Fragestellung</i>	40
4 <i>Material und Methoden</i>	41
4.1 <i>Betriebsauswahl</i>	41
4.2 <i>Probenahme</i>	42
4.3 <i>Probenaufarbeitung und –aufschluß</i>	46
4.4 <i>Analytik</i>	47
4.5 <i>Überprüfung der Aufbereitungs- und Analysemethoden (Ringuntersuchung)</i>	48
4.6 <i>Ermittlung der Massen- und Schwermetallflüsse</i>	49
4.7 <i>Sonstige Untersuchungen</i>	51
4.8 <i>Bilanzierung</i>	53
4.8.1 <i>Pflanzliche Produktion (Schlagbilanzen)</i>	53
4.8.2 <i>Tierische Produktion (Stallbilanzen)</i>	54
4.9 <i>Statistische Auswertung</i>	55
5 <i>Ergebnisse und Diskussion</i>	57
5.1 <i>Landwirtschaftlicher Betrieb</i>	57

5.1.1 Pflanzliche Produktion	57
5.1.1.1 Schwermetallgehalte	57
5.1.1.1.1 Böden	57
5.1.1.1.2 Betriebsmittel	59
5.1.1.1.3 Pflanzliche Erzeugnisse	66
5.1.1.2 Schwermetalleinträge und –bilanzen für Ackerland	71
5.1.1.2.1 Futterbaubetriebe	71
5.1.1.2.2 Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung	80
5.1.1.2.3 Veredelungsbetrieb Putenmast	88
5.1.1.2.4 Marktfruchtbaubetrieb	90
5.1.1.2.5 Freilandgemüsebaubetrieb	94
5.1.1.3 Schwermetalleinträge und Bilanzen für Grünland	98
5.1.1.4 Abschließende Beurteilung Pflanzenproduktion	105
5.1.1.5 Optionen zur Senkung des Schwermetalleintrages in der Pflanzenproduktion	120
5.1.2 Tierische Produktion	123
5.1.2.1 Futterbaubetriebe mit Rindviehhaltung	123
5.1.2.1.1 Schwermetallgehalte	123
5.1.2.1.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung	128
5.1.2.1.3 Abschließende Diskussion	138
5.1.2.2 Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung	143
5.1.2.2.1 Schwermetallgehalte	143
5.1.2.2.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung	148
5.1.2.2.3 Abschließende Diskussion	155
5.1.2.3 Veredelungsbetrieb mit Putenmast	158
5.1.2.3.1 Schwermetallgehalte	158
5.1.2.3.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung	160
5.1.2.3.3 Abschließende Diskussion	163
5.1.2.4 Optionen zur Senkung des Schwermetalleintrages in der Tierproduktion	164
5.2 Deposition	171
6 Kontrolle der Handlungsoptionen	173
7 Zusammenfassung	177
8 Fazit und Ausblick	185
9 Literaturverzeichnis	188

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Gesamtschwermetallgehalte in landbaulich und gärtnerisch genutzten Böden	6
Tab. 2-2:	Vorsorgewerte für Schwermetalle in Böden lt. BBODSCHV (1999) im Feinboden	7
Tab. 2-3:	Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schwermetallen über alle Wirkungspfade [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$].....	7
Tab. 2-4:	Schwermetallgehalte in mineralischen Einnährstoffdüngern.....	9
Tab. 2-5:	Schwermetallgehalte in mineralischen Mehrnährstoffdüngern.....	10
Tab. 2-6:	Schwermetallgehalte von mineralischen Kalk- und Magnesiumdüngern.....	11
Tab. 2-7:	Schwermetallgehalte von mineralischen Spurenelementdüngern.....	11
Tab. 2-8:	Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern	12
Tab. 2-9:	Schwermetallgehalte in organischen Zukaufsdüngern.....	13
Tab. 2-10:	Angewandte Grenzwerte für Schwermetallgehalte in Klärschlamm und Kompost auf Bundesebene	14
Tab. 2-11:	Schwermetallkonzentrationen in Wasser.....	18
Tab. 2-12:	Transferfaktoren Boden/Pflanze in Abhängigkeit von Schwermetall und Pflanzenart (verzehrbare Teile), Medianwerte (LÜBBEN & SAUERBECK, 1991).....	22
Tab. 2-13:	Schwermetallgehalte in Getreide (einschließlich Körnermais) und Ölsaaten.....	23
Tab. 2-14:	Schwermetallgehalte in Stroh.....	24
Tab. 2-15:	Schwermetallgehalte in Wurzel- und Knollenfrüchten.....	24
Tab. 2-16:	Schwermetallgehalte in ausgewählten Gemüsearten (Ernteanteile)	24
Tab. 2-17:	Schwermetallgehalte in Grünlandaufwüchsen.....	25
Tab. 2-18:	Schwermetallgehalte in lagerfähigen Futtermitteln für die Rindviehfütterung.....	28
Tab. 2-19:	Schwermetallgehalte in Alleinfuttermitteln für die Schweine- und Geflügelhaltung	29
Tab. 2-20:	Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien.....	30
Tab. 2-21:	Schwermetallgehalte in Fleisch/Tierkörper	33
Tab. 2-22:	Schwermetallgehalte in Milch und Eiern.....	34
Tab. 2-23:	Schwermetallfrachten durch Staubbiederschläge	37
Tab. 2-24:	Schwermetallausträge durch Sickerwasser	38
Tab. 4-1:	Betriebsauswahl.....	41
Tab. 4-2:	Ergebnisse der Ringuntersuchung zur Überprüfung der Schwermetallanalytik; Mittelwert aller beteiligten Einrichtungen \pm Standardabweichung.....	48
Tab. 4-3:	Nachweisgrenzen für Schwermetalle.....	49
Tab. 4-4:	Schwermetallgehalte für Tierkörper, die in die Stallbilanzen einbezogen wurden (massengewichteter Mittelwert aus Literaturangaben und eigenen Analysen)	52
Tab. 5-1:	Schwermetallgehalte der Acker- und Grünlandböden [mg kg^{-1}]	58
Tab. 5-2:	Schwermetallgehalte in Saat- und Pflanzgut	59
Tab. 5-3:	Schwermetallgehalte von mineralischen Einnährstoffdüngern.....	60
Tab. 5-4:	Schwermetallgehalte von mineralischen Mehrnährstoffdüngern.....	61
Tab. 5-5:	Schwermetallgehalte von mineralischen Kalk- und Magnesiumdüngern.....	63
Tab. 5-6:	Schwermetallgehalte von mineralischen Spurenelementdüngern.....	63
Tab. 5-7:	Schwermetallgehalte in organischen Zukaufsdüngern.....	64

Tab. 5-8:	Schwermetallkonzentration in Beregnungswasser	65
Tab. 5-9:	Schwermetallkonzentrationen/-gehalte in Pflanzenschutzmitteln	65
Tab. 5-10:	Schwermetallgehalte in Getreide einschließlich Körnermais	67
Tab. 5-11:	Schwermetallgehalte in Stroh	68
Tab. 5-12:	Schwermetallgehalte in landwirtschaftlichen Wurzel- und Knollenfrüchten	69
Tab. 5-13:	Schwermetallgehalte in Blatt- und Sproßgemüse	70
Tab. 5-14:	Schwermetallgehalte in Grünland- und Kleeerasaufwüchsen	70
Tab. 5-15:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, Marktfruchtbau, 1,5 GV ha ⁻¹)	73
Tab. 5-16:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, Marktfruchtbau, biologisch-dynamisch, 0,9 GV ha ⁻¹)	75
Tab. 5-17:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 4 (Bullenmast, Marktfruchtbau, konventionell, 4,9 GV ha ⁻¹)	78
Tab. 5-18:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 6 (Ferkelerzeugung, Marktfruchtbau, 1,3 GV ha ⁻¹)	82
Tab. 5-19:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 7 (Ferkelerzeugung u. Mast im geschlossenen System, Markt, 1,3 GV ha ⁻¹)	84
Tab. 5-20:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 8 (Mastschweine, Marktfruchtbau, 1,1 GV ha ⁻¹)	87
Tab. 5-21:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 9 (Putenmast, Marktfruchtbau, 0,8 GV ha ⁻¹)	88
Tab. 5-22:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 10 a (Marktfruchtbau mit Geflügelmist)	92
Tab. 5-23:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 10b (Marktfruchtbau mit Klärschlammeinsatz)	93
Tab. 5-24:	Schlagbilanz, Acker, Betrieb 11 (Freilandgemüseanbau) ¹	96
Tab. 5-25:	Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, konventionell, 1,5 GV ha ⁻¹)	100
Tab. 5-26:	Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, biologisch dynamisch, 0,9 GV ha ⁻¹)	103
Tab. 5-27:	Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 3 (Milchviehhaltung, konventionell, 1,9 GV ha ⁻¹)	103
Tab. 5-28:	Schwermetallausträge der untersuchten Ackerflächen durch Ernteprodukte [g ha ⁻¹ a ⁻¹]	105
Tab. 5-29:	Schwermetallausträge der untersuchten Grünlandflächen durch Ernteprodukte [g ha ⁻¹ a ⁻¹]	106
Tab. 5-30:	Salden der Gesamtschlagbilanzen (Ackerflächen)	107
Tab. 5-31:	Salden der Schlagbilanzen (Grünland) der untersuchten Betriebe	108
Tab. 5-32:	Grenzwerte für bestimmte Elemente in Düngemitteln ¹ , Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten oder Pflanzenhilfsmitteln nach Entwurf zur DÜMV (2003)	109
Tab. 5-33:	Nach Bodenarten differenzierte Grenzwerte für Schwermetallgehalte von Düngemitteln [mg kg ⁻¹ TM] (BMVEL & BMU, 2002)	110
Tab. 5-34:	Vorschläge für praktikable spezifische Grenzwerte für Schwermetallgehalte ausgewählter Düngemittel [mg kg ⁻¹ TM] (VDLUFA, 2002); Alternativvorschlag zur BMVEL & BMU (2002)-Konzeption	112
Tab. 5-35:	Mittleres Schwermetall/Phosphat-Verhältnis [mg SM pro kg P ₂ O ₅] (um interne Stoffflüsse durch wirtschaftseigenes Futter bereinigt) der verschiedenen Düngestrategien auf den Acker- und Grünlandstandorten	115
Tab. 5-36:	Mittleres Schwermetall/Phosphat-Verhältnis [mg SM pro kg P ₂ O ₅] (um interne Stoffflüsse durch wirtschaftseigenes Futter bereinigt) der verschiedenen Düngestrategien auf den Acker- und Grünlandstandorten	119
Tab. 5-37:	Schwermetallgehalte wirtschaftseigener Futtermittel (Rinderhaltung)	124
Tab. 5-38:	Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien (Rinderhaltung)	125
Tab. 5-39:	Schwermetallgehalte in Zukauffuttermitteln zur Eiweiß- und/oder Energiesupplementierung (Rinderh.)	126
Tab. 5-40:	Schwermetallgehalte in Mineralfuttermitteln (Rinderhaltung)	126

Tab. 5-41:	Schwermetallgehalte in Wasser zur Tränke und Desinfektion (Rinderhaltung).....	127
Tab. 5-42:	Schwermetallgehalte in Kupfersulfat zur Klauenhygiene (Rinderhaltung).....	127
Tab. 5-43:	Schwermetallgehalte in Flüssigmist (Rinderhaltung).....	127
Tab. 5-44:	Schwermetallgehalte in Festmist (incl. Futterreste) und Jauche (Rinderhaltung).....	128
Tab. 5-45:	Schwermetallgehalte der Milch.....	128
Tab. 5-46:	Stallbilanz, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, Ackerfutterbau).....	132
Tab. 5-47:	Stallbilanz, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, Ackerfutterbau, biologisch-dynamisch).....	133
Tab. 5-48:	Stallbilanz, Betrieb 3 (Milchviehhaltung, Grünland).....	134
Tab. 5-49:	Stallbilanz, Betrieb 4 (Bullenmast).....	135
Tab. 5-50:	Schwermetallgehalte wirtschaftseigener Futtermittel und Stroh (Schweinehaltung).....	143
Tab. 5-51:	Schwermetallgehalte in zugekauften Einzelfuttermitteln, Mineralfuttermitteln und mineralisiertem Eiweißergänzer, Betrieb 7 (Schweinehaltung).....	144
Tab. 5-52:	Schwermetallgehalte in zugekauften (Betrieb 6) und selbstgemischten (Betrieb 7) Alleinfuttermitteln (Schweinehaltung).....	145
Tab. 5-53:	Schwermetallkonzentrationen in Wasser zur Tränke und Desinfektion (Schweinehaltung).....	146
Tab. 5-54:	Schwermetallgehalte von Flüssigmist (Schweinehaltung).....	146
Tab. 5-55:	Schwermetallgehalte in Festmist und Jauche (Schweinehaltung).....	147
Tab. 5-56:	Stallbilanz, Betrieb 6 (Ferkelerzeugung).....	150
Tab. 5-57:	Stallbilanz, Betrieb 7 (Ferkelerzeugung, Schweinemast).....	151
Tab. 5-58:	Stallbilanz, Betrieb 8 (Schweinemast).....	152
Tab. 5-59:	Kupfergehalte im Alleinfutter für Schweine, empfohlene Bedarfsmengen und nach FMV (2000) zulässige Höchstmengen [mg kg^{-1}] bei 88 % TM.....	156
Tab. 5-60:	Zinkgehalte im Alleinfutter für Schweine, empfohlene Bedarfsmengen und nach FMV (2000) zulässige Höchstmengen [mg kg^{-1}] bei 88 % TM.....	157
Tab. 5-61:	Schwermetallgehalte der eingesetzten Allein- und Einzelfuttermittel (Putenmast).....	159
Tab. 5-62:	Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien (Putenmast).....	159
Tab. 5-63:	Schwermetallgehalte im Brunnenwasser zur Tränke und Desinfektion (Putenmast).....	160
Tab. 5-64:	Schwermetallgehalte in Putenmist.....	160
Tab. 5-65:	Stallbilanz, Betrieb 9 (Putenmast).....	162
Tab. 5-66:	Höchstgehalte für Kupfer und Zink in Alleinfuttermitteln für Rinder, Schweine und Geflügel (88 % TM) nach (FMV, 2000) und nach VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 vom 25. Juli 2003 ..	166
Tab. 5-67:	Schwermetallfrachten durch Staubbiederschlag im Außenbereich untersuchter Betriebe.....	171
Tab. 5-68:	Schwermetallfrachten im Staubbiederschlag der Stallluft untersuchter Betriebe.....	172
Tab. 6-1:	Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Futterbaubetriebes 1.....	174
Tab. 6-2:	Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Grünlandflächen des Futterbaubetriebes 1.....	174
Tab. 6-3:	Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Veredelungsbetriebes 6.....	174
Tab. 6-4:	Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Veredelungsbetriebes 8.....	174

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Mögliche Schwermetalleinträge und -austräge auf landwirtschaftlichen Betrieben	3
Abb. 2-2:	Verteilung des Transferkoeffizienten von SM	21
Abb. 4-1:	Zusammensetzung der Schlagbilanz	54
Abb. 4-2:	Zusammensetzung der Stallbilanz.....	55
Abb. 5-1:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen der Futterbaubetriebe 1, 2 und 4 [%].....	72
Abb. 5-2:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe 6, 7 und 8 [%].....	80
Abb. 5-3:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Veredelungsbetriebes mit Putenmast 9 [%]	88
Abb. 5-4:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Marktfruchtbaubetriebes 10 a (Zukauf von Geflügelmist)/10 b (Klärschlamminsatz) [%].....	91
Abb. 5-5:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Freilandgemüsebaubetriebes 11 [%].....	95
Abb. 5-6:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Grünlandflächen der Futterbaubetriebe 1, 2 und 3 [%]	99
Abb. 5-7:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in die Gesamtställe der rindviehhaltenden Futterbaubetriebe [%].....	129
Abb. 5-8:	Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtställen der Milchviehbetriebe 1, 2 und 3.....	137
Abb. 5-9:	Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtstall des Bullenmastbetriebes 4.....	138
Abb. 5-10:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in die Gesamtställe der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe [%].....	148
Abb. 5-11:	Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtställen der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe (6-Ferkelerzeugung, 7-Ferkelerzeugung und Schweinemast, 8-Schweinemast)	154
Abb. 5-12:	Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in den Gesamtstall des Putenmastbetriebes [%].....	161
Abb. 5-13:	Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtstall des Putenmastbetriebes 9.....	163

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AAS	Atomabsorptionsspektrometer
Abb.	Abb.
AMK	Agrarministerkonferenz
A _p	Pflughorizont
AROMIS	EU Concerted Action: Assessment and reduction of heavy metal input into agroecosystems (www.ktbl.de/umwelt/aromis/)
As	Arsen
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	zirka
CAL	Calciumlaktat
cc.	carbon copy, Durchschlag
CCM	Korn-Cob-Mix
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DAP	Diammonphosphat (18/46)
d.h.	das heißt
DüMG	Düngemittelgesetz
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
EG	Europäische Gemeinschaft
einschl.	einschließlich
et al.	und andere
€	Euro
exkl.	Exklusive
Fa.	Firma
Freigem.	Freilandgemüseanbau
FMG	Futtermittelgesetz
Fut.	Futterbau
°C	Grad Celsius
GV	Großvieheinheit nach VDI RL 3474 (2000)
Hg	Quecksilber
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy
i.d.R.	in der Regel
incl.	inklusive
Kart.	Kartoffeln
KAS	Kalkammonsalpeter
kg	Kilogramm
KM	Körnermais
Konz.	Konzentration
LABO	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
Landh.	Landhandel
LF	Landwirtschaftlich genutzte Fläche (landwirtschaftliche Nutzfläche LN abzüglich der seit einem Jahr oder länger nicht beackerten und nicht bewirtschafteten Felder, des nicht genutzten Dauergrünlandes und der sonstigen nicht mehr genutzten ldw. Flächen) (ALSING ET AL., 1993)
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche (Ackerfläche einschl. Wechselgrünland, Dauer-

	grünland, Gartenland, Obstanlagen, Rebland, Hopfengärten, Baumschulen und Korbweidenanlagen, zu denen auch Pappelanlagen und Weihnachtsbaumkulturen gehören) (ALSING ET AL., 2003)
lt.	laut
LUFA	Lehr- und Forschungsanstalt
max.	maximal
mg	Milligramm
MLF	Milchleistungsfutter (Ergänzungsfuttermittel für Rindvieh)
MUNLV NRW	Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
µm	Mykrometer
n	Stichprobenumfang
NEQ	Nährstoff- bzw. Wertstoffäquivalent nach VDLUFA (2002)
Ni	Nickel
n.u.	nicht untersucht
n.ü.	nicht überprüfbar
O	Sauerstoff
P	Phosphor
Pb	Blei
Rinderh.	Rinderhaltung
RL	Richtlinie
S	Schwefel
SERO	Sekundärrohstoff(e)
SM	Schwermetall(e)
sog.	sogenannt(e)
Σ	Summe
t	Tonne
Tab.	Tab.
TA Luft	Technische Anleitung Luft
TM	Trockenmasse
TMR	Totalmischration
t	Tonne
u.	und
UBA	Umweltbundesamt, Berlin
UBA F+E-Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungsvorhabens des Umweltbundesamtes, Berlin „Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agraökosysteme“. Projektpartner: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, Institut für Pflanzenernährung der Uni Bonn, Uni Bayreuth, LUFA Oldenburg
U-Eisen	Eisenprofil in U-Form
UMK	Umweltministerkonferenz
u.U.	unter Umständen
v.a.	vor allem
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Lehr- und Forschungsanstalten
Ver.	Veredelung
vgl.	vergleiche
VO	Verordnung
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen
z. B.	zum Beispiel
ZEBS	Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien beim ehemaligen Bundesgesundheitsamt
zit.	zitiert
Zn	Zink

ZR	Zuckerrüben
z.T.	zum Teil
zzgl.	zuzüglich

1 Einleitung

Mit dem Inkrafttreten des BUNDESBODENSCHUTZGESETZES (BBODSCHG) im März 1998 und der BUNDESBODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (BODSCHV) im Juli 1999 wurde die Grundlage für den gesetzlichen Schutz unserer Böden und die Sanierung von Altlastflächen gelegt. Akkumulationen von Schadstoffen, hierunter fallen auch Schwermetalle, sind demnach zu vermeiden. Ebenfalls ist im BBODSCHG § 7 das Vorsorgeprinzip ausdrücklich festgeschrieben. Im Hinblick auf Schwermetalle ist dies mit der langen Verweildauer dieser Stoffe in Böden und der andererseits aufwendigen und manchmal völlig unmöglichen Sanierung von schwermetallbelasteten Standorten begründet (WELP, 1999; METZ & KLOKE, 1998). Es steht zu befürchten, daß aktuelle landwirtschaftliche Nutzung und atmosphärische Deposition in Zukunft zu einer weiteren Schwermetallanreicherung in Böden führen. Um geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen, müssen Schwermetallflüsse und deren Unsicherheiten in Agrarökosystemen ermittelt werden (KELLER ET AL., 2002). Der Schwermetalleintrag auf bewirtschaftete Flächen richtet sich nach Betriebstyp und -organisation. MOOLENAAR & LEXMOND (1998) fordern daher spezifische Bilanzierungen für unterschiedliche Bewirtschaftungssysteme. Nach WITTE ET AL. (1997) können ermittelte Schwermetallbilanzen nicht ohne weiteres auf andere Regionen übertragen werden. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, daß der jeweilige Standort über die Schwermetallaufnahme der Pflanzen den Schwermetallaustrag beeinflusst. Werden wirtschaftseigene Futtermittel eingesetzt, ist hierdurch auch ein Einfluß auf die Eintragungssituation zu erwarten.

In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb 10 landwirtschaftliche Praxisbetriebe in Nordrhein-Westfalen hinsichtlich ihres Umsatzes an Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink untersucht und bilanziert. Dabei wurden jeweils standorttypische Betriebsformen ausgewählt. Der Aspekt einer möglichst großen naturräumlichen Verteilung der Betriebsstandorte wurde ebenfalls berücksichtigt.

Autoren wie MENZI & HALDEMANN (1993) oder WILCKE & DÖHLER (1995) konnten die mit Wirtschaftsdünger anfallenden Schwermetallfrachten auf landwirtschaftlich genutzte Flächen nicht abschließend klären. Es lag somit nahe, auch Schwermetallumsätze im Kompartiment „Tierproduktion“ zu beleuchten, um Ein- und Austragsquellen für die unterschiedlichen Betriebe möglichst genau zu lokalisieren. In Wirtschaftsdüngern wurden darüber hinaus stichprobenmäßig Arsen und Quecksilber bestimmt um ein evtl. Gefährdungspotential durch diese Stoffe abzuschätzen.

2 Literaturübersicht - Schwermetalle in der Landwirtschaft

Unter den Begriff „Schwermetall“ fallen laut Definition die Elemente, die eine Dichte größer als 5 g cm^{-3} aufweisen. Insofern wird auch Arsen (Dichte: $5,3 \text{ g cm}^{-3}$) häufig dieser Gruppe zugeordnet, obwohl es sich dabei eigentlich um ein Halbmetall handelt. Einige dieser Elemente sind für Pflanzen und/oder Tiere essentiell, weshalb auch von Spurennährelementen gesprochen wird. Von den hier im Blickfeld der Untersuchung stehenden Elementen sind Kupfer, Zink und Nickel essentiell für Pflanze und Tier, bei Chrom gilt dies lediglich für tierische Organismen. Jedes einzelne Schwermetall kann bei Überschreitung von element- und organismenspezifischen Schwellenkonzentrationen toxisch für Organismen sein.

Die besondere Problematik der Anreicherung von Schwermetallen in Böden liegt in der Persistenz dieser Stoffe und der damit zusammenhängenden möglichen Anreicherung in der Nahrungskette (einschließlich des Trinkwassers) begründet (TIMMERMANN, 1994). Nach Angaben des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (2003) wurden im Jahr 2001 53,5 % der Fläche Deutschlands landwirtschaftlich genutzt, so daß diesem Bereich eine besondere Beachtung hinsichtlich möglicher schadhafter Veränderungen des Bodens zukommt.

Um sich ein Bild über den gesamten Schwermetallumsatz in der Landwirtschaft bzw. konkret auf landwirtschaftlichen Betrieben zu machen, zeigt Abb. 2-1 mögliche Ein- und Austragswege von Schwermetallen im System „landwirtschaftlicher Betrieb“. Dabei stellt sich die Thematik als äußerst komplex dar: Neben bewirtschaftungsbedingten Ein- und Austrägen spielen auch nicht-bewirtschaftungsbedingte Ein- und Austräge von Schwermetallen eine Rolle, wobei eine Abgrenzung letzterer von den bewirtschaftungsbedingten Ein- bzw. Austrägen oft schwer fällt. Beispielsweise beeinflusst die Wahl des Anbauverfahrens auch die Verwitterungsprozesse im Boden oder die Erosionsgefährdung eines Standortes. In solchen Fällen sind die jeweiligen Positionen des „Nicht-bewirtschaftungsbedingten Ein- bzw. Austrages mit „*“ gekennzeichnet.

Daneben beeinflussen sich eine Reihe von Faktoren innerhalb der Gruppe der bewirtschaftungsbedingten Ein- und Austräge untereinander, dies z.T. sogar wechselseitig. Um die Komplexität des Schwermetallumsatzes im landwirtschaftlichen Betrieb ausreichend erschließen zu können, ist es unabdingbar, vorab einen Überblick über alle relevanten Faktoren in den unterschiedlichen Bereichen pflanzliche und tierische Produktion zu geben. Dies geschieht in den folgenden gleichnamigen Kapiteln. Dabei entspricht die Gliederung der Kapitel „Pflanzliche Produktion“ und „Tierische Produktion“ dem chronologischen Ablauf

der für die Erzeugung eingesetzten bzw. erzielten Faktoren incl. der Böden.

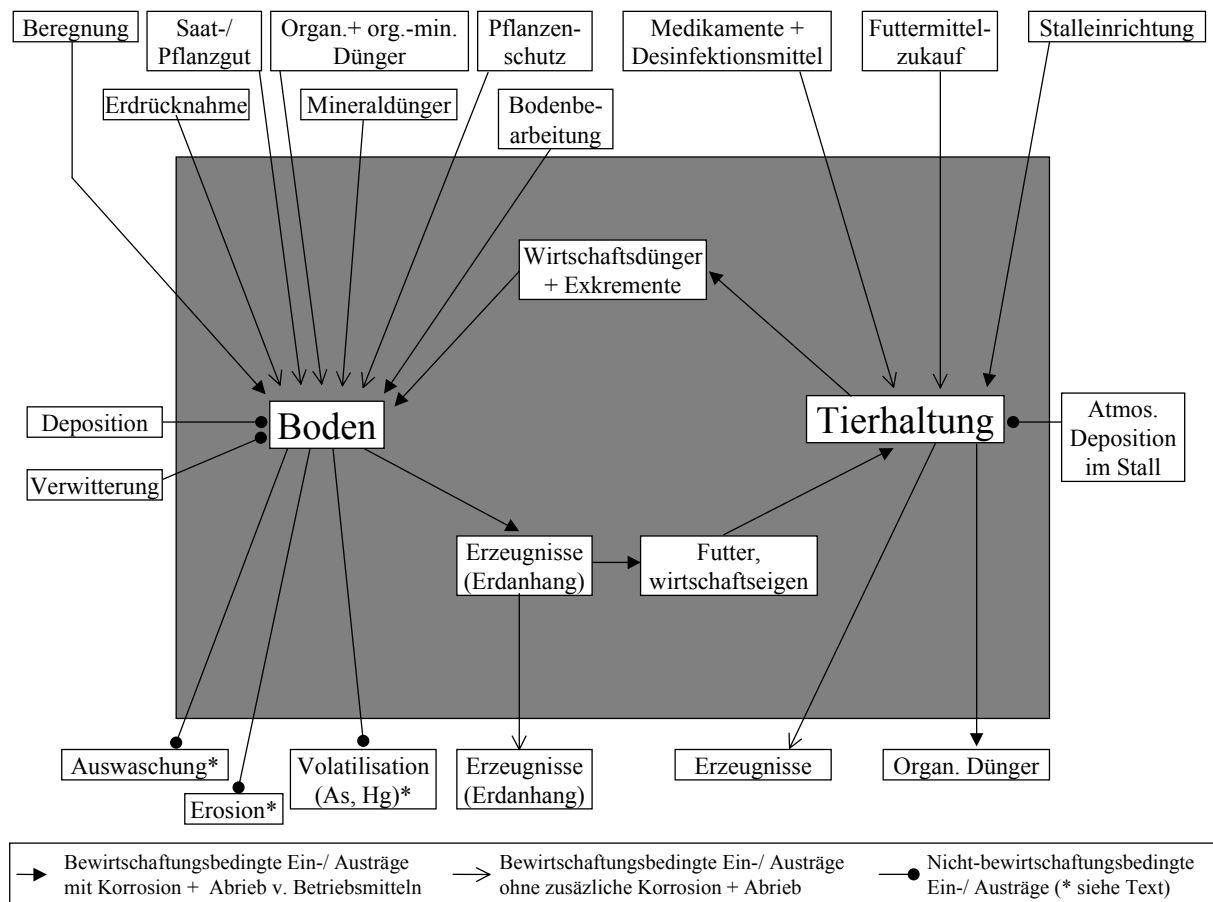


Abb. 2-1: Mögliche Schwermetalleinträge und -austräge auf landwirtschaftlichen Betrieben

Bisherige Untersuchungsergebnisse zu landwirtschaftlich relevanten Stoffen (Tabellen 2-4 bis 2-22) werden hierbei vorgestellt. Weil sich die zitierten Quellen öfter wiederholen, werden sie an dieser Stelle vorab angezeigt:

a Kerschberger et al. (2001); b LABO (2000); c Boysen (1992); d LUFA Oldenburg (2001); e BLT Grub (2002); f LUFA Oldenburg (1997-2000); g Uihlein (2001); h VFT (1996); i Meyer (2002); j LUFA Oldenburg (1998-2001); k Schultheiß et al. (2003); l Anonymus (2000); m KTBL (2000); n Schenkel & Breuer (2002); o Früchtenicht (2001); p Souci et al. (2000)

Hierzu ist anzumerken, daß es sich bei den Literaturstellen a, b und m um gesammelte Datenwerte unterschiedlicher Autoren handelt.

Sofern den Literaturquellen Spannweiten zu entnehmen waren, stehen diese klein kursiv gedruckt unter den Durchschnittsgehalten, die als arithmetische Mittelwerte angegeben sind.

2.1 *Pflanzliche Produktion*

2.1.1 Böden

Schwermetalle liegen im Boden in verschiedenen Fraktionen und unterschiedlichen Bindungsformen vor (HERMS, 1989; HORNBURG & BRÜMMER, 1989).

Diese sind im einzelnen:

- Austauschbare Bindungen an Tonminerale (REDDY & PERKINS, 1974; PLUQUET, 1983)
- Silikatische Bindungen (SCHACHTSCHABEL ET AL., 1998)
- Adsorption an Huminstoffe (STICHER & BOEHRINGER, 1983; HERMS & BRÜMMER, 1984)
- Organische und anorganische Komplexbildung (HINES & BARBER, 1957; STICHER ET AL., 1987; RÜTZEL ET AL., 1997)
- Okkludierung in Eisen-, Mangan- und Aluminiumoxiden (BRÜMMER ET AL., 1986; FISCHER ET AL., 1996)
- Definierte Verbindungen mit Carbonaten und Phosphaten (BRÜMMER ET AL., 1986)

Dabei sind die Bindungsformen zum einem unter dem **Aspekt der Mobilität** und damit dem Gefährdungspotential für den Transfer in Grundwasser und Nahrungspflanzen für Mensch und Tier zu sehen. Die Wertigkeitsstufen der Elemente (Arsen, Chrom) sind unter dem Aspekt ihrer Toxizität zu beurteilen. As^{3+} ist bedeutend toxischer als As^{5+} (LEONARD, 1991). Cr^{6+} ist bedeutend toxischer als Cr^{3+} (GAUGLHOFER & BIANCHI, 1991). Sofern die natürlichen Elementgehalte der Böden nicht überschritten werden und die wertigkeitsbeeinflussenden Faktoren wie pH-Wert und Redoxpotential sich, wie in Ackerböden zu erwarten, in günstigen Bereichen bewegen, ist davon auszugehen, daß die toxischeren Oxidationsstufen dieser Elemente in natürlichen Größenordnungen liegen, und damit nur in sehr geringen Mengen vorkommen (WIEGMANN, 1999). Nach LEINWEBER (1996) unterliegen Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit kurz- und langfristigen Veränderungen, die durch nicht konstante physikalische und chemische Bodenfaktoren, besonders dem pH-Wert, verändert werden.

Grundsätzlich sollte zwischen folgenden Schwermetallgehalten/-anteilen in Böden unterschieden werden (LABO, 1995; BRENK, 1998; WIEGMANN, 1999):

- Lithogener Ausgangsgehalt: Der Stoffbestand, der im Ausgangsgestein zu finden ist.

- Geogener Grundgehalt: Gehalt, der aus dem lithogenen Ausgangsgehalt durch alle Prozesse der Pedogenese entstanden ist.
- Anthropogener Anteil: Schwermetallanteil, der durch anthropogene Tätigkeit in den Boden eingetragen wurde.
- Hintergrundgehalt: Geogener Grundgehalt plus diffuse ubiquitäre Einträge (incl. großflächiger anthropogener Einträge)

Pedogenetische Veränderungen können durch Kalkauswaschung (BLUME, 1981), Lessivierung (SCHERER & SCHRÖDER, 1990), Podsolierung und Vergleyung (SCHIMMING, 1992) sowie durch die biologische „Pumpwirkung“ (SCHACHTSCHABEL ET AL., 1998) auftreten. Hinzu kommen noch äolisch bedingte Einträge, die von MENKE (1987) ermittelt wurden, aber i.d.R. von nur untergeordneter Bedeutung für den Schwermetallgehalt der Böden sind. Ausnahme sind äolisch eingetragene Sedimente wie die Lößdecken der Bördelandschaften. **Anthropogene Einträge** an Schwermetallen in Böden können aus bergbaulicher und industrieller Tätigkeit, Verkehr, Hausbrand und landwirtschaftlicher Tätigkeit resultieren. Momentane Schwermetallbelastungen von Böden durch Bergbau, Industrie, Verkehr und Hausbrand werden, sofern sie nicht aus Deponierung oder fluviatiler Deposition schwermetallreicherer Materialien resultieren, über das Aufkommen aus nasser, feuchter oder trockener Deposition erfaßt (siehe Kapitel 2.2). Anthropogene Schwermetallanreicherungen findet man daher verstärkt in Oberböden (FILIPINSKI & GRUPPE, 1990). Je nach Nutzungsart des Bodens schwanken die anthropogen bedingten Schwermetallgehalte (SPAETE ET AL., 1991; VAN SAAN ET AL., 1992A). Da anthropogene Einträge i.d.R. auf die Oberfläche des Bodenkörpers erfolgen, sind die Elemente besonders in der obersten Bodenschicht akkumuliert. Eine Durchmischung des Bodens, wie auf Ackerland durch Bodenbearbeitung, verwischt allerdings anthropogene Einträge. **Geogen bedingte Schwermetallanteile** sind im Boden weniger löslich und pflanzenverfügbar als zusätzlich anthropogen eingetragene Schwermetalle (KUNTZE ET AL., 1996). Dies gilt jedoch nicht generell für das ökotoxikologisch bedeutsame Element Cadmium (WILCKE & DÖHLER, 1995). Dennoch können auch geogen bedingte hohe Schwermetallgehalte im Boden zu z.T. sehr hohen Konzentrationen im Pflanzenmaterial führen (GRUPE & PLUQUET, 1992). Neben geogenen und anthropogenen Einflußgrößen für den Schwermetallgehalt können auch **biogene Einflußfaktoren** den Schwermetallgehalt von Böden beeinflussen. So berichtet PEREZ (1998) von signifikant erhöhten Cadmium-, Kupfer-, Zink- und Bleigehalten in den Brutgebieten einer Möwenart (*Larus cachinnans Pallas*) infolge von Möwenkot im

Nordwesten Spaniens. Diese Eintragsquelle dürfte allerdings für landwirtschaftlich genutzte Flächen allenfalls an Sammelstellen für Weidetiere, wie z.B. Tränken, von Relevanz sein. So berichten MENZI ET AL. (1998) von erhöhten Kupfer- und Zinkeinträgen bei der Freilandhaltung von Schweinen und schlagen deshalb vor, häufig frequentierte Bereiche wie die Suhle, nur einmalig auf der Fläche anzulegen (Reduktion der belasteten Flächen). Außerdem sollten solche Flächen nur jedes fünfte Jahr für die Freilandschweinehaltung genutzt werden.

Einen Überblick über ermittelte Schwermetallgesamtgehalte in land- und gartenbaulich genutzten Böden liefert Tab. 2-1.

Tab. 2-1: Gesamtschwermetallgehalte in landbaulich und gärtnerisch genutzten Böden

Land	Nutzung	Quelle	n	mg kg ⁻¹							
				As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Bayern	Acker	I ¹	17.000	k. A.	0,33	28,3	17,6	0,17	21,5	26,6	71,0
Brandenburg	Acker	II ¹	40	k. A.	0,15	6,9	5,9	k. A.	4,0	14	25
NRW	Acker	III ²	147	7,8	0,55	28	16	0,090	17	34	84
	Grünland		37	12	1,2	35	29	0,17	36	65	162
Rheinland	Klein-/Hausgärten	IV ¹	489	k. A.	1,26	49,6	67,6	k. A.	43	177	379
Österreich	Acker	V ¹	k. A.	k. A.	0,2	k. A.	k. A.	0,17	k. A.	16,3	69,8
	Grünland		k. A.	k. A.	0,28	k. A.	k. A.	0,21	k. A.	24,4	81,7

I DIEZ & KRAUSS (1992) II PECHER ET AL. (1995) III LIEBE (1999) IV RIEB ET AL. (1989) V JANBEN (2001)

¹ Mittelwert ² Median

BERGHOFER ET AL. (1997) untersuchten Schwermetallgehaltsveränderungen in slowakischen Böden innerhalb der letzten 25 Jahre. Dabei fanden sie heraus, daß für die Elemente Cadmium, Zink, Nickel und Kupfer eine Reduzierung der Bodengehalte stattfand, denen Anreicherungen für Chrom und Blei entgegenstanden. Dies wurde durch das Verhältnis Auswaschung/Deposition und die **Mobilitätsreihe der Elemente (Cd > Zn > Ni > Cu > Cr > Pb)** begründet.

Nach KLOKE (1984) werden in folgenden Regionen höhere Gehalte an Schwermetallen in Böden angetroffen:

- Nähere Umgebungen des Schwermetallerzbergbaues, der Schwermetallverhüttung und -verarbeitung (Cadmium, Kupfer, Blei und Zink usw.)
- Nähere Umgebung von Großkraftwerken, die fossile Brennstoffe einsetzen (alle Elemente)
- Gebiete des Wein- und Hopfenanbaus (Kupfer, Zink, Arsen)

- Alte Haus- und Kleingärten (alle Elemente)
- Nach langjährigem Einsatz von Klärschlämmen (Cadmium, Blei, Zink u.a.m.)
- 50 m beiderseits stark befahrener Verkehrswege (Blei)

HEYMANN & WIECHMANN (1991) stellen ebenfalls erhöhte Cadmiumgehalte in Hamburger Kleingärten fest. ASMUS (1993) berichtet über erhöhte Cadmium-, Zink- und Bleigehalte an einem Untersuchungsstandort in der Uckermark infolge langjähriger extremer Verregnung von Schweinegülle.

Um auch langfristig die vielfältige Nutzbarkeit von Böden zu gewährleisten und gegen zukünftige Einwirkungen zu schützen, sind im BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBodSchG, 1998) **Vorsorgewerte** vorgesehen, die in der BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ATLASTENVERORDNUNG (BBODSCHV, 1999) festgeschrieben sind (Tab. 2-2).

Tab. 2-2: Vorsorgewerte für Schwermetalle in Böden lt. BBODSCHV (1999) im Feinboden

Böden/Bodenart	Cd	Cr	Cu	Hg mg kg ⁻¹	Ni	Pb	Zn
T	1,5	100	60	1	70	100	200
L/U	1	60	40	0,5	50	70	150
S	0,4	30	20	0,1	15	40	60
Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten	+	+	+	+	+	+	+

+ unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nach § 9 Abs. 2 und 3 dieser Verordnung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen

Die Vorsorgewerte leiten sich aus Wirkungsschwellen in Boden und Nutzpflanzen ab und sind mit humantoxikologisch unbedenklichen Körperdosen sowie den repräsentativen Hintergrundgehalten der Böden abgeglichen (ITOX, 2003). Diese Vorsorgewerte werden als Gesamtgehalte angegeben. Dabei liegen die gesetzlichen Vorsorgewerte durchaus in Gehaltsbereichen, die in vielen Böden landwirtschaftlich genutzter Flächen zu finden sind. Für den Fall, daß die Vorsorgewerte überschritten werden, hat der Gesetzgeber ebenfalls in der BodSchV jährlich **zulässige Gesamthöchstfrachten** festgelegt (Tab. 2-3).

Tab. 2-3: Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schwermetallen über alle Wirkungspfade [g ha⁻¹ a⁻¹]

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Fracht [g ha ⁻¹ a ⁻¹]	6	300	360	1,5	100	400	1200

2.1.2 Betriebsmittel

Bodenbearbeitung

Schaare, Streichbleche und Zinken von Geräten zur Bodenbearbeitung sind immer aus sog. **Federstählen** gefertigt. Dabei werden die Materialeigenschaften wesentlich vom Chrom- und Vanadiumgehalt des Stahles beeinflusst (DAMEROW, 2001). Federstähle enthalten nach Produktformationen von HMC (2003) je nach Stahlsorte zwischen 0,3 und 1,05 % Chrom. Der Verschleiß dieser Materialien bei Verwendung zur Bodenbearbeitung hängt maßgeblich von der Bodenart ab. Für einen unterstellten Verschleiß (100 ha für 6 Schaare à 1 kg bei Bodenart sL) würde dies ein Eintragungspotential zwischen 0,3 und 0,6 g Chrom/ha a⁻¹ durch einmaliges Pflügen der Ackerfläche pro Jahr bedeuten.

Neben Bodenbearbeitungsgeräten finden Federstähle auch noch in anderen Bereichen der Landtechnik als Verschleißmaterialien wie z.B. in Form von Zinken an Heuwendern und Schwadern Verwendung. Allerdings ist der Abrieb in diesen Fällen nicht mit dem an Geräten zur Primär- oder Sekundärbodenbearbeitung zu vergleichen.

Saat- und Pflanzgut

Schwermetallgehalte in Saatgut entsprechen, sofern es nicht mit schwermetallhaltigen Pflanzenschutzmitteln behandelt wurde, den Gehalten der Ernteerzeugnisse der jeweiligen Kulturpflanzen. Ausnahme hierfür ist lediglich Rübensaatgut, das nicht am Ende der hier betrachteten Produktionsabläufe steht.

Der Einsatz arsen-, blei- und quecksilberhaltiger Pflanzenschutzmittel ist seit 1981 in den alten Bundesländern verboten. WILCKE & DÖHLER (1995) benennen Einträge vor diesem Verbot von 1,5-2 g ha⁻¹ a⁻¹ Quecksilber via Getreideaussaat. HOCK & ELSTNER (1984) berichten von 3-4 g Quecksilbereintrag ha⁻¹ a⁻¹.

Mineraldünger

Schwermetallgehalte von Mineraldüngern sind nach SEVERIN ET AL. (1991) abhängig von den verwendeten **Ausgangsprodukten und ihrem Herstellungsprozeß**.

Tab. 2-4 zeigt Schwermetallgehalte der am häufigsten eingesetzten Einnährstoffdünger. Autoren wie ISERMANN (1992) und BOYSEN (1992) verweisen darauf, daß **mineralische Stickstoff- und Kalidünger** kaum mit Schwermetallen belastet sind, wohingegen

mineralische Phosphordünger starke Verunreinigungen vor allem an Cadmium, aber auch an Chrom und Zink aufweisen können. Aus diesem Grund waren besonders seit den 80er Jahren Schwermetallgehalte in Phosphordüngern und der damit verbundene Eintrag auf landwirtschaftlich genutzte Flächen immer wieder Gegenstand von Untersuchungen. PODLESÁK ET AL. betonen 1990, daß eine regelmäßige unabhängige Kontrolle der Phosphatdünger auf ihre Schwermetallgehalte erfolgen müsse, um den Einsatz zu hoch belasteter Produkte auszuschließen. Bis 1989 kamen ebenfalls nach PODLESÁK ET AL. (1990) in der ehemaligen DDR hauptsächlich Phosphatdünger auf Basis von Kolaapatit aus der damaligen UdSSR zum Einsatz, die nur gering mit Cadmium belastet waren. Vulkanisch entstandene Phosphatlagerstätten enthalten sehr viel geringere Schwermetallgehalte als sedimentär entstandene (BOYSEN, 1992). DRIESSEN & WESTHOEK (1997) finden in Triplephosphaten hohe Cadmiumgehalte und in Thomasphosphaten hohe Chromgehalte.

Tab. 2-4: Schwermetallgehalte in mineralischen Einnährstoffdüngern

Type	Dünger	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
N	AHL	a	<0,1	1,3	6,3	k. A.	0,3	0,2	2,3
	Ammon-sulfatsalpeter	a	<0,1	4,0	2,5	k. A.	5,0	<1,0	2,1
	Harnstoff, geperlt	a	0,1 <0,1-0,2	0,8 0,2-1,2	0,5 0,2-0,8	k. A.	0,7 0,2-1,0	0,6 0,2-1,0	1,9 0,8-4
	KAS	a	0,2 <0,1-0,2	10,5 4,0-17,0	5,0 2,9-7,1	k. A.	4,8 2,7-6,8	24,6 11,0-38,2	55,0 46,0-64
	KAS	b	0,25	8,7	4,0	0,02	3,8	21,4	38,3
	Kalkstickstoff	a	<0,1 ≤0,1	10,6 9,1-12,0	9,4 7,8-11,0	k. A.	23,4 15,8-31,0	27,0 1,0-53	12,5 5,9-19
P	Rohphosphat, weicherdig	c	11,4 5,4-13,6	160 136-220	15,9 8,8-22,0	3,6 ²	15,5 8,0-20	1,6 <1,0-6	214 56,0-290
	Rophosphat, teil-aufgeschlossen	c	7,2 1,4-54	170 90-220	15,6 7,8-25,4		15,6 4,0-26	1,2 <1,0-4	195 72-1260
	Superphosphat	a	8,7 1,4-21,0	128 48-181	28,5 3,4-22,5	k. A.	25,7 12,2-43	10,2 <1,0-36	232 24,9-470
	Thomasphosphat	a	0,5 <0,1-2,0	1545 493-2200	23,5 3,1-45,0	k. A.	6,6 0,8-13	7,3 3,3-16	48,0 6,0-93
	Triphosphat	a	25,4 5,0-60,0	200 42-620	17,0 4,2-166	k. A.	26,6 4,0-62	1,6 <1,0-6	348 26,3-736
	Triphosphat	b	26,8	288	27,3	0,04	36,3	12,0	489
K	40er Kali	c	0,1 <0,1	2,3 2,0-10,0	3,8 1,0-8,8	0,06 ³	1,4 <1,0-2	0,3 <1,0	5,3 1,8-7,4
	40er Kali	b	0,08	3,5	2,9	0,02	1,5	0,5	3,7
	Patentkali	c	<0,1 <0,1	7,8 6,0-10,0	3,5 2,6-4,4	0,06 ³	3,4 2,0-6	<1,0 <1,0	3,1 2,0-9,0

¹ siehe Seite 3 ² Einzelanalysen teilaufgeschlossenes/weicherdiges Rohphosphat ³ Einzelanalysen Kaliumchlorid

Laut WILCKE & DÖHLER (1995) verweisen die meisten Untersuchungen auf sehr geringe Schwermetallgehalte in mineralischen Stickstoffdüngern, allerdings deuten Studien wie die von BOYSEN (1992) auf eine hohe Variabilität der Gehalte an Kupfer, Zink und Blei bei Kalkammonsalpetern. Dies ist laut den hier gelisteten Spannweiten von KERSCHBERGER ET AL. (2001) bei Kalkammonsalpeter v.a. für das Element Blei der Fall und gilt insbesondere auch für die Nickel- und Bleigehalte in Kalkstickstoff. Laut SEVERIN ET AL. (1991) liegen bei AHL und Harnstoff nur sehr geringe Schwermetallgehalte vor.

Neben Einnährstoffdüngern werden im landwirtschaftlichen Betrieb und besonders im Gartenbau auch **Mehrnährstoffdünger** eingesetzt, über deren Schwermetallgehalte Tab. 2-5 informiert.

Tab. 2-5: Schwermetallgehalte in mineralischen Mehrnährstoffdüngern

Type	Dünger	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
mg kg ⁻¹ TM									
NP	Diammonphosphat 18/46	a	8,2 <i>6,8-9,6</i>	91 <i>63-119</i>	5,2	k. A.	16,0	1,3	57,0
	Mineral. NP-Dünger 20/20/0 u. a.	b	9,15	91,4	21,5	0,02	18,0	5,5	151
NPK	Mineral. NPK-Dünger 15/15/15 u. a.	b	3,78	45,8	11,3	0,06	10,9	14,8	116
	Mineral. NPK-Dünger	c	4,9 <i><0,1-17,6</i>	55 <i>12-138</i>	13,4 <i>2,6-76</i>	<0,01 ²	10,9 <i><1-36</i>	2,1 <i><1-8,0</i>	100 <i>2,4-318</i>
PK	Thomaskali	a	<0,3 <i><0,001-7,9</i>	928 <i>679-1379</i>	19,0 <i>14,0-131</i>	k. a.	3,0 <i>1,0-29</i>	4,0 <i>2,0-17</i>	9,0 <i>6,0-320</i>

¹ siehe Seite 3 ² Einzelanalysen

HONSEL ET AL. (1995) stellen fest, daß lediglich Düngemittel, in denen Rohphosphate oder aufgeschlossene Phosphate zur Herstellung genutzt werden, Cadmiumgehalte $\geq 1 \text{ mg kg}^{-1}$ auftreten. BOYSEN (1992) schließt aus höheren Cadmiumgehalten auf die Verarbeitung cadmiumreicher Rohphosphate in Mehrnährstoffdüngern. HONSEL ET AL. (1995) berichten auch von höheren Chromgehalten zwischen 2000 und 3000 mg kg⁻¹ in organisch-mineralischen NPK-Düngern, was sie auf den geogenen Ursprung und/oder den Einsatz von Ledermehlen zurückführen. Aber auch in mineralischen NP- und PK-Düngern finden sich nach SAUERBECK ZIT. IN RIEB (1992) zum Teil hohe Chromgehalte. Einige NPK-Dünger, v.a. „Nitrophoska blau“ und „Nitrophoska perfekt“ enthalten auch Zink lt. Deklaration (FERTIVA, 2003).

Einen Überblick über Schwermetallgehalte in land- und gartenbaulich genutzten **Kalk- und Magnesiumdüngern** vermittelt Tab. 2-6. HONSEL ET AL. (1995) berichten über erhöhte

Chromgehalte zwischen 2000 und 3000 mg kg⁻¹ in einigen, allerdings ungenannten Kalkdüngern. Diese findet man in Konverterkalk, dem P-ärmeren Pendant zum Thomasphosphat. Allerdings ist für die ökotoxikologische Beurteilung von Relevanz, wie hoch die Anteile an Chrom-(VI) sind. Mit Ausnahme von wasserlöslichen Chrom-(III)-Salzen stellt jedoch nur dieser Anteil einen Gefahrenherd in biologischen Systemen dar (MUNK, 1990). In Konverterschlacken (Thomaskalk und Thomasphosphat) ist Chrom-(VI) nicht nachweisbar und das 3-wertige Chrom liegt zudem in der stabilen, schwer löslichen Spinellphase vor (SEVERIN ET AL., 2002). HOTSMA (1999) stellt Schwermetallgehalte der in den Niederlanden am meisten verwendeten Kalkdünger vor und berechnet ihre Schwermetallgehalte in Bezug auf ihren basisch wirkenden Anteil.

Tab. 2-6: Schwermetallgehalte von mineralischen Kalk- und Magnesiumdüngern

Type	Dünger	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Ca	Branntkalk	a	<0,1	19,2	11,1	k. A.	6,0	2,8	8,8
	Carbokalk	a	0,5	6,0	20,0	k. A.	1,0	<5,0	80,0
	Hüttenkalk	a	<0,1 <01-0,35	50,6 22-206	4,2 2,0-10	k. A.	2,5 <0,5-4	7,0 <1,0-29	8,8 3,0-166
	Konverterkalk	a	<0,1 <01-0,35	1924 727-2630	18,0 11,0-36	k. A.	3,0 0,5-21	9,0 2,0-41	17,0 5,8-26,4
	Rückstandskalk	a	<0,1	590 280-900	8,6 6,2-11	k. A.	15,0 12,0-18	1,0 1,0-29	7,5 3,0-166
Mg	Bittersalz	a	<0,1	6,9	3,0	k. A.	<1,0	<1,0	9,5

¹ siehe Seite 3

Neben den zuvor gezeigten Hauptnährstoffen kommen in der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Pflanzenproduktion auch vereinzelt **Spurenelementdünger** zum Einsatz, die im Falle von Kupfer und Zink heute zumeist in Verbindung mit Pflanzenschutzmaßnahmen appliziert werden. Bei den in Tab. 2-7 gezeigten Düngern fallen für den von BOYSEN (1992) untersuchten Kupferdünger auch hohe Verunreinigungen an nicht-essentiellen Schwermetallen, beispielsweise Blei, auf.

Tab. 2-7: Schwermetallgehalte von mineralischen Spurenelementdüngern

Type	Dünger	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Cu	Kupferdünger	c	11,8 1,0-26	267 8-600	270000- 500000	0,07-0,21 ²	841 32-3200	2354 196-5880	20400 32,5-43800
B	Bordünger	c	<0,1	<1	15 9,6-25	k. A.	<1	<1	8,4 2,4-20

¹ siehe Seite 3 ² Einzelanalysen von Kupferdüngern (2,7 % und 5 %)

In einer Stichprobenuntersuchung der gleichen Studie findet der Autor in Kupferdünger (5 %) einen durchschnittlichen Arsengehalt von 411 mg kg⁻¹. Hierfür macht BOYSEN (1992) die

Wahl des Rohstoffes verantwortlich.

Wirtschaftsdünger

An dieser Stelle befindet sich ein wichtiger Verzahnungspunkt zwischen Tier- und Pflanzenproduktion, da tierhalterische Maßnahmen unmittelbaren Einfluß auf Nähr- und Schadstoffgehalte in den in der Pflanzenproduktion eingesetzten Wirtschaftsdüngern haben. (vgl. Abb. 1). Einen Überblick über Schwermetallgehalte in tierischen Wirtschaftsdüngern gibt Tab. 2-8. Die Ausscheidungen tierischer Organismen stellen Senken für Schadstoffe dar (GUTSER, 1996). Nach ROTH ET AL. (2002) enthalten besonders Wirtschaftsdünger aus der Schweinehaltung erhöhte Gehalte an Kupfer und Zink. Die darin vorkommenden Schwermetallgehalte sind mit solchen aus der Geflügelhaltung vergleichbar (DÖHLER ET AL., 2001). KÜHNEN ET AL. (2002) konstatieren besonders für Ferkelgülle erhöhte Kupfer- und Zinkgehalte.

Tab. 2-8: Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern

Dünger		Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Form	Tierart								
mg kg ⁻¹ TM									
Festmist	Rind	a	0,4	20,0	39,0	k. A.	10,0	7,0	213
	Rind	b	0,29	12,9	39,0	0,03	5,2	5,8	190
	Schwein	a	0,4	11,0	740	k. A.	13,0	k. A.	1220
	Schwein	b	0,33	10,3	450	0,04	9,5	5,1	1068
	Geflügel	b	0,25	4,4	52,6	0,02	8,1	7,2	336
	Hühner	a	k. A.	k. A.	65,3	k. A.	k. A.	k. A.	246
	Puten	d	0,2	25,0	130	k. A.	12,2	2,3	558
Gülle	Rind	a	0,4 <i>0,3-0,5</i>	5,5 <i>3,4-8,0</i>	49,6 <i>8-70</i>	k. A.	5,3 <i>3,8-6,0</i>	8,5 <i>6,9-10,9</i>	234 <i>217-230</i>
	Rind	b	0,28	7,3	44,5	0,06	5,9	7,7	270
	Schwein	a	0,8 <i>0,5-1,8</i>	9,5 <i>2,2-14,0</i>	452 <i>250-760</i>	k. A.	18,7 <i>11,0-32,5</i>	10,7 <i>7,4-18,0</i>	895 <i>540-1187</i>
	Schwein	b	0,40	9,4	309	0,02	10,3	6,2	858
	Hühner	a	0,3 <i>0,2-0,3</i>	4,4 <i><1,0-7,7</i>	60,3 <i>48-78</i>	k. A.	8,1 <i>7,1-9,0</i>	7,2 <i>6,0-8,4</i>	396 <i>330-456</i>

¹ siehe Seite 3

Darüber hinaus können Wirtschaftsdünger durch örtliche Standortbestimmungen gekennzeichnet sein (WITTE ET AL., 1997). Dies gilt dementsprechend verstärkt für Gülle von Rauhfutterfressern, die fast immer auf der Grundlage wirtschaftseigener Futterproduktion gehalten werden. Die Gehalte der einzelnen Wirtschaftsdünger an Cadmium, Nickel, Blei und besonders Chrom weisen hohe Schwankungen auf (ROTH ET AL., 2002). Über Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern aus dem ökologischen Landbau liegen bisher nur

wenige Untersuchungen vor (ROTH ET AL., 2002). Untersuchungen von GRÄPER (1995) deuten aber nicht auf zwingend niedrigere Schwermetallgehalte in Rindergülle aus ökologischer Wirtschaftsweise.

Über Schwermetallgehalte in Jauche wird in der Literatur nicht berichtet. Aus Untersuchungen über menschliche Ausscheidungen ist aber bekannt, daß über Urin im Vergleich zu Kot (incl. Toilettenpapier) nur ein geringer Anteil an Schwermetallen ausgeschieden wird (VINNERÅS ET AL., 2002).

Organische Zukaufsdünger

Die am häufigsten eingesetzten Düngemittel, die unter diese Rubrik fallen, sind Klärschlamm und Kompost. In der gesamten Arbeit wird auf die Ansprache dieser Düngemittel als Sekundärrohstoffdünger verzichtet, weil hierunter z.B. auch die nicht in der Düngemitteltypenliste eingetragenen mineralischen Rückstandskalke fallen. Diese werden aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechend ihrem Einsatz als mineralische Kalkdünger geführt. Dagegen dient die Düngung mit organischen Düngemitteln wie Klärschlamm und Kompost auch zur Humusreproduktion von Ackerböden. Ackerbaubetriebe, die diese Produkte einsetzen, verwenden aber auch in zunehmendem Maße organische Dünger aus der spezialisierten Tierhaltung. Diese Dünger werden im Falle der betriebsinternen Verwertung definitionsgemäß als Wirtschaftsdünger angesprochen. Im Falle der Abgabe aus dem Entstehungsbetrieb zu Düngezwecken auf einem anderen Betrieb werden sie im weiteren Verlauf der Arbeit wie Klärschlamm und Kompost als organische Zukaufsdünger angesprochen.

Tab. 2-9 zeigt eine Übersicht der Schwermetallgehalte in organischen Zukaufsdüngern.

Tab. 2-9: Schwermetallgehalte in organischen Zukaufsdüngern

Organischer Zukaufsdünger	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Klärschlamm	a	2,9 <i>1,2-8,0</i>	71,0 <i>28,0-150</i>	309 <i>219-450</i>	k. A.	34,0 <i>19,0-50,0</i>	140 <i>63,0-230</i>	1229 <i>829-1800</i>
Klärschlamm	b	1,4	46	274	1	23	63	809
Bioabfallkompost	a	0,7 <i>0,4-1,2</i>	33,2 <i>15,0-57,7</i>	47,1 <i>29-70,7</i>	k. A.	18,5 <i>8,2-40,2</i>	78,0 <i>39,7-260</i>	214 <i>93-291</i>
Kompost	b	0,51	25,6	49,6	0,16	15,9	52,7	195

¹ siehe Seite 3

Im Vergleich zu den derzeit bestehenden Grenzwerten (Tab. 2-10) läßt sich feststellen, daß

die zulässigen Höchstgehalte für diese Düngemittel in den zugrundeliegenden Untersuchungen nicht erreicht werden.

Tab. 2-10: Angewandte Grenzwerte für Schwermetallgehalte in Klärschlamm und Kompost auf Bundesebene

Organischer Zukaufsdünger	Gesetzliches Regelwerk	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Klärschlamm	ABFKLÄRV (1992)	10	900	800	8	200	900	2500
Kompost	BIOABFV (1998)	1	70	70	0,7	35	100	300

SCHAAF & JANBEN (2000) berichten, daß 90 % der hessischen **Klärschlämme** unterhalb von Schwermetallgrenzwerten liegen, die im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes aufgestellt wurden. Diese Grenzwerte orientieren sich an den Schwermetallgrenzwerten der ABFKLÄRV (1992). Nach MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL. (2001) konnte in den letzten Jahren eine deutliche Reduktion der Schwermetallkonzentrationen in Klärschlämmen auf ca. 15 % der Grenzwerte nach Klärschlammverordnung (AbfKlärV) festgestellt werden. Dabei ist der Rückgang für Kupfer und Zink am geringsten. Als Gründe für den geringeren Rückgang an Kupfer im Klärschlamm nennen diese Autoren die Kupferkonzentrationen im Trinkwasser, die in den letzten Jahren durch die Installation von Kupferrohren in den Haushalten stark zugenommen haben. Auch ist der Einsatz von Kupfer als Baustoff im Außenbereich ansteigend. BÖHM ET AL. (2001) stellen neben einem Rückgang der Gesamtemissionen in Abwässer einen deutlichen Anstieg der diffusen Einträge fest. Technische Lösungen, wie z.B. der Einsatz einer Trinkwasserenthärtung oder der Einbau einer mechanischen Stufe in den Klärprozeß können zur Reduzierung der Schwermetallgehalte genutzt werden - grundsätzlich könnte auch eine stärkere Trennung der Abwasserteilströme zu einer deutlichen Verringerung der Schadstoffbelastung des Klärschlammes führen (MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2001). Konzepte, wie etwa die separate Verwertung von Urin und Schwarzwasser, werden z.Zt. von CLEMENS & SIMONS (2003) am Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn untersucht.

In einem 40-jährigem Dauerversuch mit Klärschlammapplikation stellen TRIMBORN ET AL. (2000) lediglich bei 4-facher Aufwandmenge (gegenüber nach ABFKLÄRV 1992) zulässigen Höchstfracht) nachweisbare Cadmium-, Chrom-, Kupfer-, Blei- und Zinkgehaltsanstiege im Ackerboden fest. Dieser Anstieg resultiert gemäß der Autoren aus früheren Düngergaben. Während der letzten 10 Jahre kann dagegen mit Ausnahme von Cadmium auch bei 4-facher Aufwandmenge kein Schwermetallanstieg im Boden festgestellt werden. Da der

Cadmiumanstieg bei nahezu allen Varianten parallel verlief, werden von TRIMBORN ET AL. (2000) hierfür andere, nicht erfaßte Quellen verantwortlich gemacht. Dagegen stellen MACHELETT ET AL. (1992) z.T. signifikante Anstiege der Schwermetallgehalte der Versuchsböden und -pflanzen nach wiederholten Klärschlammapplikationen in einem neunjährigen Feldversuch fest. Bei dem verwendeten Boden handelte es sich allerdings um eine saure Sandrosterde mit pH 5. Dieser Standort wäre nach den Bestimmungen der AbfKlärV auch nicht zu einer Klärschlammdüngung zugelassen.

Nach Ansicht von GÄTH & SCHUG (2000) sind im Hinblick auf den vorsorgenden Boden- und Gewässerschutz Konzepte, nach denen beim landwirtschaftlichen Klärschlammeinsatz vorgegangen werden sollte, erforderlich, die über die Bestimmungen der ABFKLÄRV (1992) hinausgehen. Diese sollten die Sorptionsverhältnisse der Böden und die Sorptionscharakteristika der Elemente einbeziehen und als Prognoseinstrument dienen können. TOWERS & PATTERSON (1997) fordern ebenfalls, auch die Empfindlichkeit von Böden gegenüber einem Schwermetalleintrag bei Klärschlammdüngung zu berücksichtigen. Die Autoren bieten hierzu ein Vorgehensmodell an. OVER (2003) erstellte ein Flächenkataster zur umweltverträglichen Verwertung von Klärschlamm, das bereits im Landkreis Uckermark (Brandenburg) eingesetzt wird.

KEHRES konstatiert 1997, ein Jahr vor Inkrafttreten der für Kompost maßgeblichen Bioabfallverordnung BIOABFV (auch Kompostverordnung genannt), daß die mittleren Gehalte der untersuchten **Komposte** die Grenzwerte der zu diesem Zeitpunkt geplanten BioAbfV nur zu ca. 50 % ausschöpfen. Gleichzeitig wird aber auch eine regionalbedingte Abweichung der Schwermetallgehalte vom Bundesdurchschnitt um den Faktor 2-6 erwähnt. Höhere Cadmiumgehalte in Komposten stehen nach GENEVINI ET AL. (1997) in enger Korrelation zu den Cadmiumgehalten der Ausgangsstoffe. Neben der Herkunft des Ausgangsmaterials haben auch die technische Verarbeitungsschritte Einfluß auf die Schwermetallgehalte des Kompostes, denn Schwermetalle können nach HÖGL ET AL. (1995) durch den Metallabrieb von schlagenden Werkzeugen (etwa beim Schreddern) in das Material gelangen. Diese Eintragsquelle hat nach ULKEN (1987) und POLETSCHNY (1992) die Erhöhung der Chrom- und Nickelbelastung der Komposte zur Folge. Ebenfalls benennen sie die Verwendung von Straßenrandschnitten in der Kompostierung als eine wesentliche Bleiquelle. Bei Kompostierung von Bioabfällen mit Papier erhöhen sich nach WILCKE & DÖHLER (1995) dagegen die Kupfer- und Zinkgehalte.

Nach HACKENBERG & WEGENER (1998) bestehen für die Herstellung schwermetallärmerer

Komposte folgende Möglichkeiten:

- Störstoffanteil durch Öffentlichkeitsarbeit verringern.
- Sammelgebiete mit starker Vermüllung des Biokompostes (z.B. Ballungsräume, Hochhäuser) verstärkt aufzuklären, notfalls die Biotonne aus dem Einzugsgebiet abzuziehen und den Bioabfall wieder über die Restmülltonne zu entsorgen (OHLEN & WIEGEL, 1992).
- Biotonnen nicht an Straßenrändern oder in der Nähe öffentlicher Plätze (z.B. Bushaltestellen und Ämter) aufstellen, da hier Passanten leicht ihren Müll „entsorgen“ können.
- Zusätzliche Belastungen mit Schwermetallen über Sammel- und Aufarbeitungssysteme sind weitgehend auszuschließen.
- Organische Abfälle aus stark emissionsbelasteten Gebieten (Industrie, Ballungsgebieten, Autobahnen) oder aus geogen hoch belasteten Regionen sollten nicht zur Kompostierung gelangen.
- Elution von Schwermetallen durch schwache organische Säuren, die allerdings kaum erforscht und sehr kostspielig ist (BÖDEKER ET AL., 1994)

Zwar ist der Saldo aus Schwermetallzufuhr durch Komposte und dem Schwermetallentzug durch die Ernteprodukte stets eindeutig positiv, dennoch gehen die mobilen Gehalte an Cadmium, Blei, Nickel und Zink nach Komposteinsatz anfangs zurück (KLUGE ET AL., 1997). Auch DIANATI & PRZEMECK (1992) kommen für die Verfügbarkeit von Cadmium und Zink nach Müllkompost- und Strohdüngung zu ähnlichen Ergebnissen für die ersten drei Nachwirkungsjahre. Auch SCHERER ET AL. (1997) bestätigen diese Ergebnisse für Cadmium und Blei, kommen aber für Zink zu keinem eindeutigen Ergebnis. TRIMBORN ET AL. (2000) berichten lediglich über signifikante höhere Zinkgehalte bei 40-jähriger Kompostanwendung gegenüber Kontrollvarianten mit Mineraldüngeranwendung.

SCHAAF (2002) prognostiziert, daß aufgrund der beschränkt zur Verfügung stehenden Ackerflächen, in Zukunft nur noch qualitativ hochwertige Komposte und Klärschlämme verwendet werden können. Der Einsatz qualitativ hochwertigen Klärschlammes und Kompostes wird in diesem Falle durch die Nährstoff- und nicht durch die Schadstofffracht begrenzt (GUTSER, 1996). Zur Zeit konkurriert die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung stark mit der thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen.

Pflanzenschutzmittel

Pflanzenschutzmittel, die Schwermetalle bzw. Schwermetallverbindungen als Wirkstoff enthalten, werden überwiegend in Sonderkulturen wie Wein-, Obst- und Hopfenanbau eingesetzt (LBP,1997; ROTH, 2001;POETSCH, 2001). Dies geschieht fast ausschließlich wegen der fungiziden Wirkung von Kupfer und Zink (ROTH, 2001). Nach MÄKELÄ-KURTTO & J. SIPPOLIA. (2001) werden durch den Einsatz eines Fungizides mit dem Wirkstoff Kupferoxychlorid im Kartoffelanbau bei sachgemäßer Anwendung zwischen 1028 und 1645 g Kupfer ha⁻¹ a⁻¹ eingetragen. Nach HINDORF (1999) werden in Deutschland kupferhaltige Fungizide in engen Kartoffel Fruchtfolgen eingesetzt. Der Anteil der kupferhaltigen Fungizide ist rückläufig, weil verstärkt organische Wirkstoffe eingesetzt werden (DAUMER, 2001). In Italien belief sich der durchschnittliche Eintrag an Kupfer im Jahre 1997 auf rechnerisch rund 375 g ha⁻¹ a⁻¹, wobei dieser Betrag mit Sicherheit noch überschritten wird (MANTOVI, 2001). Bei Verwendung kupfer- und zinkhaltiger Präparate im Hopfen- und Weinanbau können die Flächen regelrecht kontaminiert werden, was sich beim Versuch, auf andere Kulturen umzustellen, negativ bemerkbar macht (KLOKE, 1985; SAUERBECK, 1986).

Cadmium, arsen-, blei- und quecksilberhaltige Pflanzenschutzmittel sind in der Bundesrepublik verboten (BLUME, 1992). Quecksilber wurde früher als Beizmittel für Saatgut eingesetzt. Enthalten Pflanzenschutzmittel Schwermetalle nur als Verunreinigungen, ist nach KLOKE (1985) der Eintrag über diese Präparate meist vernachlässigbar gering.

Beregnungswasser

Für Beregnungs- und Bewässerungsmaßnahmen wird in der hiesigen Landwirtschaft fast ausschließlich betriebseigenes Brunnenwasser verwendet. Bei niedrigen Grundwasserständen besteht auch die Möglichkeit, direkt Wasser aus industriell unbelasteten Vorflutern zu entnehmen. Die Verwendung von Trinkwasser der öffentlichen Wasserversorger verbietet sich aus betriebswirtschaftlichen Gründen. Dies gilt auch für den später zu beleuchtenden Bereich Tierproduktion, wo allerdings ausschließlich Brunnenwasser aber kein Oberflächenwasser aus Vorflutern zur Tränke und Reinigung eingesetzt wird. Da Wasser zumeist unter dem Aspekt Trinkwasser oder Gewinnung desselben betrachtet wird, fokussieren auch die meisten Untersuchungen diesen Aspekt.

Tab. 2-11 informiert über Schwermetallgehalte in Wasser, sowie über Empfehlungs- und Grenzwerte für Trinkwasser.

Tab. 2-11: Schwermetallkonzentrationen in Wasser

Herkunft/Regelwerk	Quelle	Cd	Cr	Cu	Hg $\mu\text{g l}^{-1}$	Ni	Pb	Zn
TRINKWV (2001) ¹ Grenzwerte	1	5	50	2000	1	20	10	5000 ²
WHO-Empfehlung für Trinkwasser	1	k. A.	k. A.	2	k. A.	k. A.	10	k. A.
Trinkwasser in der ehemaligen DDR	2	0,53 <i>0,06-17,40</i>	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	3,34 <i>0,11-34,25</i>	k. A.
Hintergrundkonzentrationen Grundwasser NRW	3	<5	<50	8	<1	10	<10	80
Grundwasser Thüringen	4	0,5	1,9	2,5	k. A.	3,8	4,9	103,6

1 IFAU (2003)

2 MÜLLER ET AL. (1992)

3 CREMER (2002)

4 KRAUSE ET AL. (1994)

¹ Zusätzlich Grenzwert für Arsen: $10\mu\text{g l}^{-1}$ ² Richtwert

Bei der Verwendung von Oberflächenwasser zur Beregnung oder Bewässerung ist der Schwermetalleintrag in der Regel deutlich höher als bei Verwendung von Brunnenwasser. Allerdings muß auch bei Verwendung von Wasser mit Trinkqualität mit Schwermetallbefrachtung gerechnet werden (WILCKE & DÖHLER, 1995). Durch die Beregnung von Kulturen werden an der Oberfläche haftende Niederschlagsdepositionen von den Pflanzen abgewaschen, was einerseits zu geringeren Schwermetallkonzentrationen im Erntegut, andererseits aber zu zusätzlichen Bodenbelastungen führt (FRÜCHTENICHT & VETTER, 1983). Allerdings können andererseits gerade durch Beregnungsverfahren untere Pflanzenteile mit Erdpartikeln verschmutzt werden, was gerade bei Blattgemüse stärkere Schwermetallbefrachtungen des Erntegutes bewirken kann. Bewässerungs- und Beregnungsverfahren werden fast ausschließlich nur noch zu Kulturen mit höheren Deckungsbeiträgen durchgeführt. In solchen ist aber, v.a. beim Anbau von Gemüsekulturen, in den letzten Jahren ein eindeutiger Trend von Beregnungsverfahren hin zur Tröpfchenbewässerung festzustellen. Hierdurch werden die notwendigen Wassergaben bedeutend reduziert, was auch einen verminderten Schwermetalleintrag durch diese Position bedeutet. Allerdings gelangen Schwermetalle dadurch punktförmig in den Boden, zumal in solchen Systemen meistens eine begleitende N-, oft auch K-Düngung vorgenommen wird. Darüber, wieweit sich diese Schwermetallfrachten mit dem Wasserstrom bzw. mit späterer Bodenbearbeitung im Boden verteilen, wird im Augenblick keine Aussage gemacht.

2.1.3 Ernteprodukte

Die Aufnahme von Schwermetallen durch Pflanzen kann sowohl über den Pfad Boden–Wurzel–Pflanze, aber - je nach Element - auch direkt aus der Luft erfolgen

(ALLOWAY, 1999). Daneben besteht die Möglichkeit, daß durch mit Erde verschmutzte Ernteprodukte eine Schwermetallabfuhr von der landwirtschaftlichen Nutzfläche stattfindet.

Der Schwermetalltransfer Boden-Pflanze via Wurzel ist von folgenden Faktoren abhängig:

Schwermetall, d. h. Element, Bindungsformen, Synergismen (METZ ET AL., 2001)

Bodenfaktoren (GRÜN ET AL., 1994): Schwermetallausgangsgehalt

Korngrößenzusammensetzung

Organische Substanz

Kationenaustauschkapazität

Gründigkeit

geologische Herkunft des Ausgangsmaterials

pH-Wert, CaCO₃-Gehalt

Bodenart/Bodentyp

Staunässe/Grundwassereinfluß

Pflanzenfaktoren (GRÜN ET AL., 1994): Art

Organ

Alter

Sorte

Die **Absorption von Metallen durch Pflanzenwurzeln** beinhaltet passive und aktive Aufnahmemechanismen (ALLOWAY, 1999). So ist die Aufnahme von Blei vermutlich passiv, die Aufnahme von Kupfer und Zink hingegen entweder aktiv metabolisch oder eine Kombination von aktiver und passiver Aufnahme (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992). Nach ALLOWAY (1999) ist anzunehmen, daß Ionen, die aufgrund derselben Mechanismen absorbiert werden in Konkurrenz zueinander stehen. So wird die Absorption von Zn²⁺ durch Cu²⁺ und H⁺ inhibiert, umgekehrt wird die Aufnahme von Cu²⁺ durch Zn²⁺, NH₄⁺, Ca²⁺ und K⁺ zurückgedrängt (GRAHAM, 1981; BARBER, 1984). HORAK & PUSCHENREITER (1999) folgern aus ihren Versuchen mit Weizen und Spinat, daß bei mäßig mit Cadmium belasteten Böden durch eine Steigerung der Kupfer- und Zinkversorgung eine Verringerung der Cadmiumakkumulation in Nutzpflanzen erreicht werden kann.

GRAHAM (1981) und BARBER (1984) stellen fest, daß die Aufnahme von Metallen aus Böden bei Topfpflanzen in Treibhäusern größer ist als die Aufnahme der gleichen Pflanzen aus

denselben Böden im Freiland. LÜBBEN & SAUERBECK (1991) bemerken aber, daß dieses nicht grundsätzlich der Fall ist. ALLOWAY (1999) vermutet als Gründe für auftretende Differenzen zwischen Topf- und Freilandpflanzen Unterschiede im Mikroklima und der Bodenfeuchtigkeit und daß Topfpflanzen ausschließlich im verunreinigten Oberboden wurzeln. Die Wurzeln von Freilandpflanzen dagegen reichen auch in weniger verunreinigte Bodenpartien hinein.

Wurzeln verfügen über ein vielfach höheres Akkumulationsvermögen für Metalle als der Sproß (WILCKE & METZ, 1992). Zunehmende Pflanzenverfügbarkeit der Metalle (steigende Bodengehalte, niedrigerer pH-Wert) führt zudem in den Wurzeln zu einer stärkeren Zunahme der Metallkonzentrationen als im Sproß (RIETZ & KÜCKE, 1992). Unterschiede der Aufnahmearten an Schwermetallen, die zwischen Pflanzenarten und -züchtungen bestehen, sind genetisch bestimmt und lassen sich nach ALLOWAY (1999) auf folgende Faktoren zurückführen:

Wurzeloberfläche

Kationenaustauschkapazität der Wurzeln

Wurzelexsudate

Evapo-Transpirationsrate

HELAL ET AL. (1998) weisen auch einen Einfluß von Wurzelmykorrhiza auf die Schwermetallaufnahme von *Leucaena leucocephala* nach. PADEKEN & HELAL (1995) berichten von erhöhten Cadmium- und Zinkgehalten in Weizen und Raps bei Steigerung der N-Düngung, während gesteigerte P- und S-Gaben die Cadmium- und Zinkkonzentrationen in den Ernteprodukten verringern.

Die Schwermetallaufnahme von Pflanzen aus dem Boden (via Wurzeln) wird durch den Transferfaktor charakterisiert. Dieser ist nach LÜBBEN & SAUERBECK (1991) definiert als:

$$T = \frac{\text{SM-Konzentration der Pflanze}}{\text{SM-Konzentration des Bodens}}$$

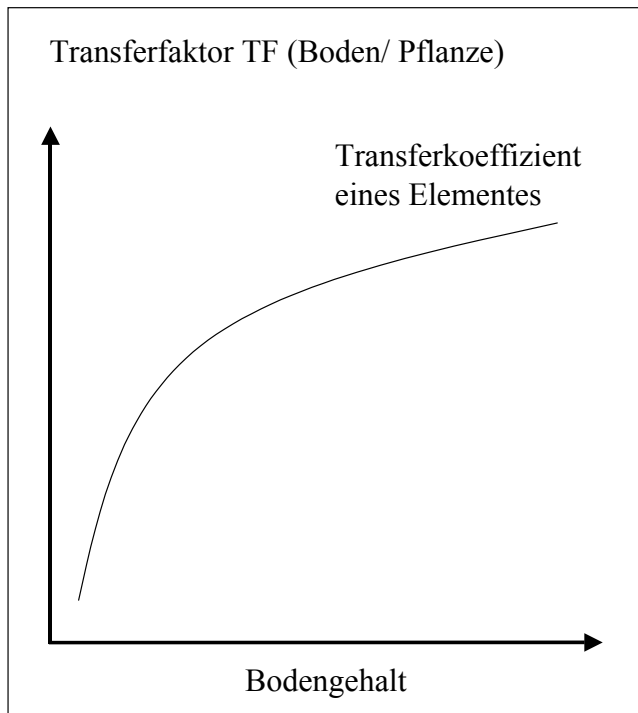


Abb. 2-2: Verteilung des Transferkoeffizienten von SM

Der Transferkoeffizient dagegen gibt die Veränderung der Schwermetallkonzentration in der Pflanze in Bezug zum Anstieg der Bodengehalte an (Abb. 2-2). Die Verteilung des Transferkoeffizienten eines Elementes ist hyperbelförmig, wenn die Schwermetallgehalte des Bodens auf der X-Achse und die jeweiligen Transferfaktoren auf der Y-Achse abgetragen werden (WILCKE & DÖHLER, 1995). Daraus folgt, daß Pflanzen bei niedrigen Bodengehalten übermäßig viel Schwermetalle enthalten.

Einen Überblick über das Aneignungsvermögen für Schwermetalle einiger Nutzpflanzen vermittelt Tab. 2-12. Die Werte sind als Richtwerte zu betrachten, die im konkreten Fall in starkem Maße auch vom Pflanzenteil und den Bodeneigenschaften abhängen. Dabei zeigen die Transferfaktoren die feste Bindung von Chrom, Quecksilber und Blei im Boden. Kupfer und Nickel werden dagegen weniger festgelegt, für Cadmium und Zink muß mit einer hohen Mobilität und damit Pflanzenverfügbarkeit gerechnet werden (GRÜN ET AL., 1994).

Die unterschiedliche Reaktion der Pflanzenarten, aber auch einzelner Pflanzenorgane, ermöglicht eine Einteilung in Exkluder- (geringe), Indikator- (mittlere) und Akkumulatorpflanzen mit hoher Schwermetallaufnahme (METZ ET AL., 2001). Solche Akkumulatorpflanzen, auch Supersammler genannt, wie einige von Natur aus auf serpenithaltigen Böden angepaßte Alyssum-Arten, die in ihrem Gewebe mehr als 2 % Nickel anreichern können, eignen sich zur In-situ-Regenerierung metallverunreinigter Böden (ALLOWAY, 1999). Für garten- und ackerbauliche Nutzpflanzen, die in Tab. 2-12 gezeigt werden, stellen SAUERBECK & HARMS (1993) fest, daß allenfalls für Cadmium und Zink eine Anreicherung in den Pflanzen über die im Boden herrschende Konzentration hinaus zu befürchten ist. Für Kupfer und Nickel ist dies nach Aussage der Autoren hingegen kaum möglich und für Chrom und Blei praktisch gänzlich auszuschließen.

Ein weiterer Weg der **Absorption von Schwermetallen durch Pflanzen ist der durch die Oberfläche von Blättern** (ALLOWAY, 1999). Diesen Weg nutzt man auch bei der

Blattdüngung mit verschiedenen Mikronährstoffen. Sowohl die Wirkung von Kupfer- als

Tab. 2-12: Transferfaktoren Boden/Pflanze in Abhängigkeit von Schwermetall und Pflanzenart (verzehrbare Teile), Medianwerte (LÜBBEN & SAUERBECK, 1991)

Cd	Zn	Ni	Cu	Pb	Zn
0,01-0,1	0,1-0,5	0,01-0,051	0,05-0,1	0,001-0,005	0,001-0,005
Mais	Möhren	Mais	Mais	Mais	Erbsen
	Mais	Weizen		Hafer	Mais
0,1-0,5	Hafer		0,1-0,2	Weizen	Weizen
Erbsen		0,05-0,1	Möhren		
Hafer		Porree	Blattsellerie	0,005-0,01	0,005-0,01
Weizen		Möhren	Hafer	Erbsen	Möhren
Buschbohnen		Pflücksalat			
Porree			0,2-0,3	0,01-0,05	0,01-0,05
	0,5-1,0	0,1-0,2	Porree	Porree	Buschbohnen
0,5-1,0	Erbsen	Erbsen	Weizen	Blattsellerie	Spinat
Möhren	Weizen	Spinat	Erbsen	Buschbohnen	Blattsellerie
	Buschbohnen	Feldsalat	Radies	Feldsalat	Feldsalat
	Blattsellerie				Pflücksalat
	Pflücksalat	0,2-0,4	0,3-0,5	0,05-0,1	Radies
1,0-3,0		Hafer	Pflücksalat	Pflücksalat	Hafer
Porree	1,0-4,0	Radies	Buschbohnen	Spinat	
Radies	Feldsalat	Buschbohnen	Spinat	Radies	
	Radies		Feldsalat		
3,0-6,0	Spinat				
Pflücksalat					
Blattsellerie					
Spinat					

auch Zinkdüngemitteln, die zumeist in Verbindung mit Pflanzenschutzmaßnahmen ausgebracht werden, beruht zu einem erheblichen Anteil auf dem Aufnahmeweg über das Blatt. Allerdings kann dieser Weg auch einen bedeutenden Anteil an der direkten Aufnahme atmosphärischer Schadstoffe, wie Cadmium darstellen (HOVMAND ET AL., 1983). Insbesondere in Immissionsgebieten mit Buntmetallveredelung sowie in Straßennähe kann die Aufnahme über oberirdische Pflanzenteile überwiegen, oft werden sie aber auch nur auf der Pflanzenoberfläche abgelagert (GRÜN ET AL., 1994). Der Umfang der Absorption gelöster Stoffe durch die Blätter hängt von den Faktoren Pflanzenart, Ernährungszustand, Dicke der Cuticula, Alter der Blätter, Stomata, Feuchtigkeitsgrad der Blattoberfläche und der Art der gelösten Stoffe ab. Umfangreiche aktuelle Studien hierzu unternahm EICHERT (2001) und AYDOGAN (2003).

Tab. 2-13 zeigt Schwermetallgehalte in **Körnerfrüchten**, bei denen sich in der Regel die geringsten Schwermetallaufnahmen finden (SAUERBECK, 1995). Auf den Cadmiumgehalt von

Getreidekörnern hat der Spelzenanteil wesentlichen Einfluß (METZ & KLOKE, 1998).

Tab. 2-13: Schwermetallgehalte in Getreide (einschließlich Körnermais) und Ölsaat

Frucht	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Winterweizen	a	0,04 <i>0,04-0,05</i>	0,03	5,88 <i>4,50-7,26</i>	1,03 <i>0,20-3,78</i>	0,32 <i>0,04-1,33</i>	41,1 <i>35,0-47,3</i>
Triticale	a	0,03	k. A.	k. A.	0,44	0,11	k. A.
Roggen	a	0,02	0,29	5,79	0,32 <i>0,14-0,67</i>	0,18 <i>0,04-0,93</i>	15,1
Gerste	a	0,02 <i>0,02-0,03</i>	0,28 <i>0,15-0,45</i>	4,25 <i>3,40-5,10</i>	0,46 <i>0,25-0,85</i>	0,40 <i>0,05-0,93</i>	35,1
Hafer	a	0,03	0,31 <i>0,15-0,46</i>	5,40	1,36 <i>0,71-2,41</i>	0,51 <i>0,15-0,87</i>	51,7
Körnermais	a	0,02 <i>0,01-0,02</i>	0,67 <i>0,20-1,49</i>	2,10	0,97 <i>0,25-1,68</i>	1,05 <i>0,10-2,08</i>	24,3 <i>20,0-28,6</i>
Winterraps	a	0,05	k. A.	k. A.	0,94	0,61	k. A.

¹ siehe Seite 3

Das Monitoring der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung für Schwermetallgehalte in Brotgetreide ergibt, daß die Cadmiumgehalte seit Beginn 1975 konstant geblieben sind (BRÜGGEMANN ET AL., 1996). Aus dem gleichen Monitoringprogramm berichten OCKER ET AL. (1995), daß ein Teil der Weizenproben aus Sachsen und Nordrhein-Westfalen höhere Cadmiumgehalte aufweisen und schließen deshalb auf z.T. überdurchschnittlich belastete Flächen in diesen Bundesländern. Roggen weist nach diesen sehr umfangreichen Untersuchungen nur rund ein Drittel bis ein Viertel der Cadmiumgehalte von Weizen auf. Hafer akkumuliert Cadmium in ähnlicher Weise wie Weizen, Raps ist in dieser Hinsicht vergleichbar zu Getreide (MÖNICKE & BRAUN, 1997). Bei Mais ist die Einlagerung von Schwermetallen in das Korn sehr gering, Haferkörner weisen im Vergleich zu generativen Organen anderer Pflanzen eine hohe Nickelaneignung auf (LÜBBEN & SAUERBECK, 1991). SPÄTE ET AL. (1992) stellen ein hohes Cadmiumaneignungsvermögen für Leinsamen fest. Generative Pflanzenteile sind zudem meist schwermetallärmer als vegetative Teile - dies gilt insbesondere für die Elemente Cadmium, Blei und Quecksilber (GRÜN ET AL., 1994). Diese Regel wird auch durch Tab. 2-14 belegt, die Schwermetallgehalte in **Stroh** darstellt. Nickel dagegen wird innerhalb der Pflanze ohne Schwierigkeiten verlagert, so daß sich die Gehalte in Weizenstroh, -spreu und Korn gleichmäßig in Abhängigkeit von der Nickelkonzentration des Bodens verändern. Auch für Kupfer und Zink ist die Transportbarriere zwischen vegetativen und generativen Pflanzenteilen weniger ausgeprägt (GRÜN ET AL., 1994).

Tab. 2-14: Schwermetallgehalte in Stroh

Stroh von	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Winterweizen	A	0,07	k. A.	8,10	0,68	0,34	15,0
Triticale	A	0,17	k. A.	k. A.	0,65	0,38	k. A.
Sommergerste	A	0,11	k. A.	k. A.	1,04	0,56	k. A.
Wintergerste	A	0,07 <i>0,06-0,11</i>	0,40	2,80	0,52 <i>0,10-1,04</i>	0,35 <i>0,17-0,56</i>	8,2

¹ siehe Seite 3

Tab. 2-15 demonstriert Schwermetallgehalte in landwirtschaftlich genutzten **Wurzel- und Knollenfrüchten**. STENZ ET AL. (1997) berichten über hohe Anreicherungsraten von Cadmium, Chrom, Blei und Zink in Betarübenblättern und Kartoffelkraut auf stark belasteten Versuchsböden. Rübenkörper und Kartoffelknollen wiesen dagegen geringere Konzentrationen auf. Ausnahme waren die Nickelgehalte im Rübenkörper.

Tab. 2-15: Schwermetallgehalte in Wurzel- und Knollenfrüchten

Kultur	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Kartoffel	a	0,21 <i>0,04-0,30</i>	1,58 <i>1,49-1,56</i>	6,92 <i>6,76-7,08</i>	1,53 <i>0,56-2,48</i>	1,76	10,0 <i>7,3-12,7</i>
Zuckerrübe	a	0,11	k. A.	k. A.	2,20	0,28	k. A.

¹ siehe Seite 3

Auch über den **Erdanhang**, der bei der Ernte von Hackfrüchten am höchsten ist, treten Schwermetallfrachten auf. AUERSWALD & SCHMIDT (1986) geben den Bodenabtrag durch Schmutzanhang von Zuckerrüben im Durchschnitt der gesamten Ackerfläche Bayerns mit 0,16 t ha⁻¹ a⁻¹ an. In Zuckerrübenanbaugebieten liegt der Anteil indes höher. Zu bedenken ist allerdings, daß mittlerweile in intensiven Anbaugebieten wie dem Rheinland eine Vorreinigung am Feldrand stattfindet. Der durchschnittliche Erdanhang so vorgereinigter Rüben lag laut SCHMITZ (2003) bei Zuckerrüben aus der Region Köln in den Jahren 2000-2003 bei 8 bis 12 % der Frischmasse.

Der Tab. 2-16 sind Schwermetallgehalte ausgewählter **Gemüsearten** zu entnehmen.

Tab. 2-16: Schwermetallgehalte in ausgewählten Gemüsearten (Ernteanteile)

Gemüse (verzehrbar Anteil)	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Blumenkohl	a	k. A.	0,24	16,7	3,57	k. A.	27,4
Knollensellerie	a	0,35	0,04	0,18	0,44	k. A.	2,72
Kopfsalat	a	k. A.	2,80	10,8	2,30	5,45	44,0
Spinat	a	k. A.	0,60	14,3	0,23	11,1	59,5

¹ siehe Seite 3

In Wurzelgemüse treten, außer für Cadmium, die geringsten Schwermetallkonzentrationen auf (HACKENBERG & WEGENER, 1998). Blattgemüse und ganz besonders Spinat weisen hohe Transferfaktoren auf, dabei ist Spinat mit Ausnahme von Nickel ein regelrechter Schwermetallakkumulator (WILCKE & DÖHLER, 1995; VENTER, 1993).

Tab. 2-17 veranschaulicht vorzufindende Schwermetallgehalte in Aufwüchsen von **Grünland**. Bei mehrschnittigen Futterpflanzen ermitteln KRÄHMER & SATTELMACHER (1998) mit jedem folgenden Aufwuchs höhere Kupferkonzentrationen im Sproß. Nach KESSLER ET AL. (1999) verändern sich die Kupfer- und Zinkgehalte von Kurzrasenweiden (= intensive Standweiden) während der Vegetationsperiode allerdings nur gering. MÖNICKE & BRAUN (1997) stellen im zweiten Grasaufwuchs für Cadmium höhere Gehalte als im ersten Schnitt fest. Für die Bleibelastung von Grünlandaufwüchsen in Immissionsgebieten wie dem Raum Stollwerk und Mechernich gilt indes das Gegenteil: Hier bereitet v.a. die Erstschnittnutzung bzw. Beweidung gesundheitliche Probleme beim Vieh (LK RHEINLAND, 1999).

Tab. 2-17: Schwermetallgehalte in Grünlandaufwüchsen

Aufwuchs	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		mg kg ⁻¹ TM					
Gras	d	0,2	1,1	11,1	1,7	3,1	58
Gras	e	k. A.	k. A.	8,2 <i>5,2-14</i>	k. A.	k. A.	43 <i>6,3-75</i>
Grünfütter (Wiese und Weide)	a	0,09 <i>0,05-0,15</i>	0,42	k. A.	1,29 <i>1,00-1,58</i>	2,65 <i>2,60-2,69</i>	k. A.
Grünland 1. Schnitt	a	0,15	k. A.	k. A.	3,06	0,74	k. A.
Grünland 2. Schnitt	a	0,16	k. A.	k. A.	0,79	0,76	k. A.

¹ siehe Seite 3

LÜBBEN & SAUERBECK (1991) machen für Gehalte an Chrom und Blei an oder in pflanzlichem Material überwiegend den Eintrag über die Luft verantwortlich. Nach ihren Untersuchungen nehmen Stroh und Gras relativ viel Nickel auf. Pflanzenmaterialien, die über längere Zeiträume der nassen und/oder trockenen Deposition unterliegen, weisen höhere Schwermetallgehalte auf (HACKENBERG & WEGENER, 1998). Während Zeiten höherer Pflanzenzuwächse tritt dagegen ein Verdünnungseffekt für Schadstoffkonzentrationen im pflanzlichen Material auf (HECHT, 2000).

2.2 Tierische Produktion

2.2.1 Betriebsmittel

Futtermittel

Futtermittel stellen die wesentliche Eintragsquelle für Spurenelemente in die Wirtschaftsdünger dar (SCHENKEL, 2002A). Blei, Cadmium und Quecksilber haben bei landwirtschaftlichen Nutztieren keinerlei physiologischen Nutzen (HAPKE, 2002). Während die klassischen Spurenelemente Kupfer und Zink häufig im Futter ergänzt werden müssen, sind essentielle Ultraspurenelemente meist in ausreichenden Mengen im Futter enthalten (FLACHOWSKY, 2002). Für die hier angesprochenen Schwermetalle gelten nach PETERSEN (2002) folgende Regelungen im Futtermittelrecht:

Für die essentiellen Spurenelemente Kupfer und Zink gelten EU-einheitliche Höchstgehalte in Alleinfuttermitteln, die tierart- und haltungsgruppenspezifisch gelten. Diese Höchstgehalte sind auch für die Tagesration maßgeblich, falls ein Betrieb mit Spurenelementen supplementierte Ergänzungsfuttermittel einsetzt. Ergänzungsfuttermittel dürfen dementsprechend höhere Gehalte an Spurenelementen haben als Alleinfuttermittel. Die Zumischung von Spurenelementverbindungen zu Einzelfuttermitteln ist generell nicht zulässig. Im Futtermittelrecht werden die zugelassenen Kupfer- und Zinkverbindungen für die Verwendung in Mineralfuttermischungen genannt. Für die einzelnen Verbindungen bestehen darüber hinaus einzelne Sonderregelungen und Verwendungsvorschriften.

Blei und Cadmium sind unerwünschte Stoffe in Futtermitteln. Für sie bestehen ebenfalls EU-einheitliche Höchstwerte, die für die jeweiligen Futtermittel gelten.

Chrom nimmt einen Sonderfall ein: Lediglich mit Gerbstoffen behandelte Häute einschließlich deren Abfälle sind aufgrund ihrer hohen Chromgehalte als Futtermittel verboten. Ansonsten besteht keine spezifische Regelung für den Gehalt dieses Elementes in Futtermitteln.

Nickel unterliegt im Futtermittelrecht keiner expliziten Regelung.

Bereits im Kapitel "2.1.3 Ernteprodukte" wurden Einflußfaktoren auf Schwermetallgehalte in pflanzlichen Materialien gezeigt, die natürlich auch pflanzlichen Futtermitteln zugrunde liegen. Außerdem können Sekundärkontaminationen bei Ernte, Lagerung oder Verfütterung auftreten (HECHT, 2000). Hinzu kommen Schwermetallanreicherungen aus der ebenfalls bereits erwähnten Supplementierung von Spurenelementen.

Da viele Futtermittel tierartübergreifend eingesetzt werden, erfolgt mit Ausnahme von Alleinfuttermitteln keine tierartspezifische Gliederung bei der Vorstellung ihrer Schwermetallgehalte.

In Deutschland werden heute lediglich in der Wiederkäuerfütterung nicht-konservierte bzw. nicht-eingelagerte Futtermittel noch in größerem Umfang eingesetzt. Allerdings sind diese Futtermittel in Folge gesteigerter Leistungsanforderungen, v.a. an die Milchleistung von Rindvieh und den Möglichkeiten moderner Fütterungstechnik rückläufig. Die Verfütterung solcher Erzeugnisse beschränkt sich zunehmend auf Grasprodukte. Diese stammen für die Milchviehfütterung vorrangig aus intensiver Standweidenutzung. Für Jungvieh ist noch häufig die Koppelweide anzutreffen. Eine Übersicht über Schwermetallgehalte in Grünlandaufwüchsen vermittelt Tab. 2-17 im vorigen Kapitel. Erdige und staubige Verunreinigungen von Futterpflanzen, insbesondere Gras, können unter ungünstigen Bedingungen durchaus 5 % der Futtertrockenmasseaufnahme von Wiederkäuern erreichen (SCHENKEL, 2002A). Auch hierin ist eine entscheidende Größe für die Schwermetallgehalte von pflanzlichen Futtermitteln zu sehen. Unter dem für die Tierernährung entscheidenden Aspekt der Spurenelementversorgung mit Kupfer und Zink stellen KESSLER ET AL. (1999) fest, daß aus den Gehalten in Aufwüchsen von Kurzrasenweiden der Bedarf von Milchvieh in keinem Fall gedeckt wird.

Die meisten Untersuchungen zu Schwermetallgehalten in Futtermitteln werden unter dem Aspekt der Spurenelementversorgung von Nutztieren unternommen. Daher existieren nur sehr vereinzelt Daten über die Gehalte anderer Elemente als Kupfer und Zink.

Tab. 2-18 gibt einen Überblick über lagerfähige Futtermittel, die ausschließlich oder vorwiegend in der **Rindviehfütterung** eingesetzt werden.

Maissilagen enthalten durchschnittlich weniger Kupfer und Zink als Grassilagen, so daß maisbetonte Rationen einer stärkeren Supplementierung bedürfen als grasbetonte (LÜPPING, 2002). Eine Möglichkeit zur Erklärung hoher Zinkgehalte von mehr als 500 mg kg⁻¹ TM in Futtermitteln sieht der Autor in Zinkspänen von Probestechern. Neben den wirtschaftseigenen Futtermitteln nehmen **Handelsfuttermittel** einen großen Raum in der Fütterung ein. Viele Handelsfuttermittel werden ebenfalls aus landwirtschaftlich erzeugten Rohstoffen hergestellt, für die natürlich die gleichen Kontaminationsursachen gelten, wie für die zuvor angesprochenen wirtschaftseigenen Futtermittel. Da viele dieser Rohstoffe Importprodukte aus Ländern sind, die andere Qualitäts- und Umweltstandards haben, können diese Produkte auch stärker mit Schwermetallen belastet sein. HECHT (2000) nennt in diesem Zusammenhang

Extraktionsschrote, die z.B. Cadmium enthalten können.

Tab. 2-18: Schwermetallgehalte in lagerfähigen Futtermitteln für die Rindviehfütterung

Futtermittel	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Heu	e	k. A.	k. A.	7,8 <i>3,6-12,1</i>	k. A.	k. A.	48 <i>23,5-128</i>
Grassilage	f	k. A.	k. A.	8,1 <i>3,1-17,1</i>	k. A.	k. A.	38 <i>18-110</i>
Grassilage	g	0,1	0,9	12,0	3,9	1,4	29
Maissilage	e	k. A.	k. A.	4,6 <i>1,4-19,3</i>	k. A.	k. A.	57 <i>10,7-680</i>
Maissilage	g	0,1	0,6	6,7	2,7	0,8	31
Milchleistungsfutter	h	k. A.	k. A.	14,2 <i>4,2-48,8</i>	k. A.	k. A.	87 <i>37-514</i>
Rindermastfutter	h	k. A.	k. A.	17,2 <i>6,8-50</i>	k. A.	k. A.	113 <i>46-643</i>
Trockenschnitzel	a	0,13	3,99	k. A.	1,98	1,38	k. A.
Sojaextraktionsschrot ²	l	k. A.	k. A.	16,8	k. A.	k. A.	61,6
Ackerbohnen ²	l	k. A.	k. A.	10,8	k. A.	k. A.	40,5
Rapsölkuchen, -schrot	a	0,10	0,45	k. A.	1,96	1,79	k. A.
Biertreber*	a	0,04	k. A.	k. A.	k. A.	1,00	k. A.

¹ siehe Seite 3 ² keine Präferenz hinsichtlich Fütterung Wiederkäuer/Monogastrier

Auch können durch Zumischung von Natur aus höher belasteter Stoffe (z.B. Phosphatträger) Cadmiumfrachten in das Futter gelangen (HECHT, 2000). Ebenfalls kann die Kontamination während der Aufarbeitung durch Abrieb oder eingesetzte Hilfsstoffe eine Rolle für den Schwermetalleintrag spielen (SCHENKEL & ECKSTEIN, 2001). Dies gilt z.B. für Bleicherden, mit denen u. a. Pflanzenöle gereinigt werden. Das Nebenprodukt wird dann in gewissen Mengen den Extraktionsschroten zugeschlagen. Bleicherden können z.B. erhöhte Nickelgehalte aufweisen, die dann im Handelsfuttermittel auftauchen (HECHT, 2003). Mühlennachprodukte wie Kleie und Futtermehl enthalten hohe Gehalte an Mineralstoffen wie Phosphor und Zink (ALSING ET AL., 1993). In Mischfuttern für Geflügel kann Sonnenblumenextraktionsschrot einen deutlichen Einfluß auf den Kupfergehalt haben (RICHTER, 2002). Fischmehl enthält signifikant mehr Quecksilber als andere Futtermittel (SAGER ET AL., 1997).

WEINREICH (2002) informiert über Gehalte an Cadmium, Arsen, Blei und Quecksilber in **mineralischen Einzelfuttermitteln** im Vergleich zu den futtermittelrechtlichen Vorschriften: In allen Fällen ist demnach eine Cadmiumgrundbelastung festzustellen. Der festgestellte Maximumwert von Blei liegt bei Mono-Dicalciumphosphat 30 mg kg⁻¹ über dem futtermittelrechtlichen Grenzwert. Die Quecksilbergehalte in mineralischen Futterkomponenten sind als problemlos zu bezeichnen. Lediglich Einzelproben von Magnesiumoxid

überschreiten den vorgegebenen Höchstgehalt für Arsen.

Tab. 2-19 zeigt Schwermetallgehalte in Alleinfuttermitteln für Schweine und Geflügel.

Tab. 2-19: Schwermetallgehalte in Alleinfuttermitteln für die Schweine- und Geflügelhaltung

Futtermittel	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Ferkelaufzuchtfutter	i	k. A.	k. A.	152 <i>39-195</i>	k. A.	k. A.	211 <i>132-281</i>
Ferkelaufzuchtfutter	j	k. A.	k. A.	129 <i>7-210</i>	k. A.	k. A.	225 <i>16-389</i>
Mastschweinefutter	i	k. A.	k. A.	27,5 <i>21-35</i>	k. A.	k. A.	143 <i>100-206</i>
Schweinefutter (exkl. Ferkelaufzucht)	j	k. A.	k. A.	30 <i>7-67</i>	k. A.	k. A.	146 <i>99-209</i>
Ergänzungsfutter Saugferkel	d	0,06	2,9	117	3,1	0,5	210
Endmastfutter Schweine	d	0,04	1,7	31,5	1,7	0,3	189
Legehennen	d	0,1	3,8	14,6	3,5	0,7	119
Putenmastfutter, P6	d	0,1	0,9	34,7	1,2	0,7	80
Broilermast	d	0,03	0,9	40,2	1,1	<0,2	123

¹ siehe Seite 3

Die Gehalte der unerwünschten Elemente Cadmium und Blei liegen bei allen gezeigten Alleinfuttermitteln weit unter den futtermittelrechtlichen Höchstwerten. Hohe Kupfergehalte in Alleinfuttermitteln für die Schweinehaltung finden sich v.a. in Ferkelaufzuchtfuttern (KÜHNEN ET AL., 2001), die auf Wachstumsverbesserung oder Reduzierung der Durchfallhäufigkeit bzw. Stabilisierung der Gesundheit abzielen (MEYER, 2002). In den USA und Skandinavien werden aus dem gleichen Grund auch hohe Zinkdosen von 2000-3000 mg kg⁻¹ Futter verabreicht (KAMPHUES, 1997). Ergotrope Effekte durch erhöhte Kupferzulagen werden auch bei Mastgeflügel beschrieben (SCHENKEL, 2002 B). Bei der Fütterung von Puten benötigen Jungtiere bis zum Alter von 5 Wochen eine Kupferergänzung im Futter (RICHTER, 2002). Die Familie der Fabaceen, zu der auch die Sojabohne gehört, ist für die Einlagerung von Nickel in die Samenkörner bekannt (HORAK, 1985 A/B).

Tränke

In den Bereich der Fütterung von Nutztieren fällt auch die Tränkung derselben. Hierfür und für das Reinigen der Ställe wird fast ausschließlich Wasser aus betriebseigenen Brunnen verwendet. Daher sei an dieser Stelle auf die in Tab. 2-11 gezeigten Schwermetallkonzentrationen in Wasser verwiesen. Nur in Ausnahmefällen ist mit einer beträchtlichen Schwermetallexposition durch das Tränkewasser zu rechnen (GRÜN ET AL., 1994). In der

Geflügelhaltung erfolgt eine Spurenelementzulage auch häufig über das Tränkewasser.

Einstreu

Neben der Einstreu mit Stroh ist heute sowohl in der Rinder- als auch in der Geflügelhaltung die Einstreu mit Nebenprodukten aus der Holzverarbeitung üblich (siehe Tab. 2-20).

Tab. 2-20: Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien

Einstreumaterial	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Sägemehl	k	0,2	1,0	3,0	2,4	1,9	21,3
Holzspäne	m	k. A.	k. A.	8,35	k. A.	5,2	k. A.
Mineralische Einstreumittel ²	n	0,11- 15,7	6,9- 136	17- 5361	7- 31	5- 7	18- 169

¹ siehe Seite 3 ² als solche vom Handel vertrieben exkl. Kalke

Die Datenlage zu Holz- oder Hobelspänen ist dabei als sehr gering anzusehen. Dieses Material dient ausschließlich in der Geflügelhaltung als Einstreu.

Daneben spielen aber auch mineralische Einstreumittel eine Rolle für das Trockenhalten und Hygienisieren von Stallungen. Der Einsatzbereich erstreckt sich über alle Nutztierarten einschließlich Rindern (meist Milchvieh). Zum einen werden hierfür Kalke eingesetzt (meist kohlen saure Kalke), die sonst zu Düngezwecken verwendet werden. Zum anderen werden am Markt aber auch mineralische Produkte eigens für diesen Zweck angeboten. SCHENKEL & BREUER (2002) konstatieren, daß es durch die Anwendung nach Herstellerangaben eines der von ihnen untersuchten, mineralischen Einstreumittel zur Verdoppelung des Kupfereintrages in das System Stall und damit in den Wirtschaftsdünger kommt.

Tierarznei- und Desinfektionsmittel

Bei der Verabreichung von Tierarzneimitteln ist die curative Einzelbehandlung von der meist prophylaktischen Behandlung ganzer Tiergruppen zu unterscheiden. Schwermetalleinträge in den Stall infolge des erst genannten Behandlungsverfahrens sind nur in begrenztem Umfang zu erwarten. Dabei können Wundsalben, Pudergrundmittel und Adstringentien hohe Konzentrationen an Zink aufweisen (LUTZ, 1999). Diese sind jedoch hinsichtlich eines merklichen Eintrages von Spurenelementen in Wirtschaftsdünger von geringer Bedeutung. Vielmehr können durch die gruppenweise Behandlung mit Fütterungsarzneimitteln erhebliche Elementfrachten zustande kommen (SCHENKEL & BREUER, 2002). So wird Zinkoxid in einigen Mitteln wie Tylosin-, Oxytetracyclin- oder Colistinpräparaten als Adjuvans bzw. Trägermaterial zugegeben, die dementsprechend zwischen 600 und 800 mg Zinkoxid kg⁻¹

enthalten. Der Einsatz solcher Medikamente erfolgt zur Einstellungsprophylaxe bei Ferkeln während der ersten 3 bis 28 Tage nach Stallbelegung (SCHENKEL & BREUER, 2002).

Die Verwendung von kupfer- und zinkhaltigen Klauenbädern kann zu erheblichen Einträgen in Wirtschaftsdüngern führen, besonders dann, wenn diese über die Wirtschaftsdünger entsorgt werden (MC BRIDE & SPIERS, 2001). Nach CRÖBMANN (1999) fließen hierdurch jährlich ca. 250 t Kupfer in die deutsche Landwirtschaft.

Andere Desinfektionsmittel enthalten nur sehr selten Schwermetalle als Wirkstoffe, allerdings können sich auch hinter den allgemeinen Ausdrücken wie organische Säuren derartige Anteile verbergen (LUTZ, 1999).

Güllezusätze

Diese werden verwendet, um die Fließfähigkeit und/oder Pflanzenverträglichkeit zu verbessern (KUNZ, 1994). Die Konzentrationen an Chrom, Nickel und einigen anderen Elementen liegen durchaus im Bereich der Gehalte der zuvor gezeigten mineralischen Einstreumittel (Tab. 2-20) (SCHENKEL & BREUER, 2002). Entscheidend für das aus diesen Produkten resultierende Eintragungspotential ist die Dosierungsempfehlung, die je nach Präparat sehr stark schwankt.

Stalleinrichtung

Korrosion und Abrieb aus Stalleinrichtungen werden von WILCKE & DÖHLER (1995) als mögliche Eintragsquellen für Schwermetalle gesehen. Dabei wird die Verwitterungsbeständigkeit oder Korrosion der Stalleinrichtung maßgeblich vom Stallklima und ihrer Exposition beeinflusst. DE BELIE ET AL. (2000) berechnen für verzinkte Oberflächen im Stallbereich maximale Korrosionsraten von $200 \mu\text{m a}^{-1}$ an. In der nationalen Zinkbilanz von CRÖBMANN (1999) werden die Korrosionsabträge von Zink im Stall auf ca. 200 t a^{-1} beziffert. Der Zinkabtrag aus Korrosion und Abrieb trug nach Berechnungen von UIHLEIN (2001) in vier Milchviehhaltungsbetrieben zwischen 4 und 13 % zum Gesamteintrag an Zink bei. Bekannt wurden Vergiftungsfälle mit Zink bei Verwendung sauren Flüssigfutters (LANTZSCH & SCHENKEL, 1978).

Neben metallischen Oberflächen bestehen die Oberflächen der baulichen Einrichtungen in Stallungen aus Zementprodukten (Betonböden/Betonspalten/Zementwandputz). Nach Informationen des Bundesverbandes der deutschen Zementindustrie sind die

Schwermetallgehalte von Beton mit denen von Kulturböden vergleichbar (DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON, 1996). Nach PUNTKE UND SCHNEIDER (2001) sind die Elemente sehr fest in der Betonmatrix gebunden und können nur zu einem sehr geringen Umfang herausgelöst werden. Nach Meinung des BUNDESVERBANDES DER DEUTSCHEN ZEMENTINDUSTRIE (2001) ist in Nutztierställen nicht mit einem nennenswerten Abrieb von Betonbauteilen und somit signifikanten Einflüssen auf den Schwermetallgehalt von Wirtschaftsdüngern zu rechnen.

UIHLEIN (2001) errechnet den Schwermetalleintrag durch Anstrichfarbe in einem Güllebehälter. Zwar wies die Farbe erhöhte Gehalte an Blei und Zink auf, ihre Rolle für den Schwermetalleintrag war jedoch gering. BRAUN ET AL. (2000) berichten von Bleivergiftungen an Kälbern nach Belegen einer Wand mit bleihaltigem Anstrich.

Auch in Holzschutzmitteln können Chrom-, Kupfer- und Zinkverbindungen enthalten sein (DEUTSCHE BAUCHEMIE, 1998). Aufgrund der geringen Einsatzmengen im Stallbereich ist aber nur mit sehr geringen Schwermetallfrachten zu rechnen (SCHULTHEIB ET AL., 2003).

2.2.2 Tierische Erzeugnisse

Seit 2001 gilt für die Gehalte der Schwermetalle Blei und Cadmium in Lebensmitteln (zusätzlich Quecksilber in Fisch) die HÖCHSTMENGENVERORDNUNG (2001) der Europäischen Union, die damit die seit 1976 existierenden ZEBS-Richtwerte als Rechtsgrundlage abgelöst hat.

Neben den bereits in Kapitel 2.2.2 behandelten Wirtschaftsdüngern stellen die tierischen Erzeugnisse einen weiteren Austragsweg für Schwermetalle aus der Tierproduktion dar. Eine bedarfsgerechte Versorgung landwirtschaftlicher Nutztiere mit Energie, Eiweiß, Mineralstoffen und Vitaminen vermindert die Einlagerung in den Organismus und damit den Eintrag in die Nahrungskette (GRÜN ET AL., 1994).

Fleisch/Tierkörper

Tab. 2-21 gibt Auskunft über Schwermetallgehalte in Fleisch, Leber und Niere. Die Resorptionsrate für die toxikologisch besonders relevanten Schwermetalle Cadmium, Blei und Quecksilber beträgt für erwachsene Tiere in der Regel weniger als 10 %. Dabei werden die resorbierten Schwermetalle unterschiedlich im Organismus verteilt: Cadmium und Blei reichern sich besonders in Nieren und Lebern an, während sich Quecksilber auch in

beachtlichen Mengen in die Muskulatur einlagert.

Tab. 2-21: Schwermetallgehalte in Fleisch/Tierkörper

Erzeugnis/Körperteil	Quelle ¹	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ FM			
				Cu	Ni	Pb	Zn
Schweinefleisch ²	a	0,01	0,15	0,50	0,24	0,04	19,0
Rindfleisch ²	a	0,01	0,14	0,65	0,07	0,05	31,7
Leber (Schwein, Rind, Kalb)	a	0,38 <i>0,03-0,92</i>	<0,01	34,0 <i>13,2-55</i>	0,21	0,11 <i>0,06-0,18</i>	61,0 <i>45,4-84,0</i>
Niere (Schwein, Rind, Kalb)	a	0,41 <i>0,13-0,74</i>	0,03	3,54 <i>0,0-7,7</i>	0,38 <i>0,29-0,46</i>	0,17 <i>0,07-0,28</i>	17,6 <i>3,7-27,2</i>
Geflügel (verzehrbar)	p	k. A.	<0,01- 0,05	0,42- 0,69	<0,04	k. A.	9,9- 24

¹ siehe Seite 3 ² Ganze Hälften, mittelfett bzw. reines Muskelfleisch (außer bei Cd)

Auch Kupfer und Zink werden stärker in Leber als in Muskelfleisch (HONIKEL, 1995) aber auch stärker als in den Nieren eingelagert (SAGER ET AL., 1998). Blei akkumuliert, außer in den erwähnten Organen, auch in starkem Umfang in den Knochen (BELLOF ET AL., 1999). Dies gilt auch für Zink, wobei es bei diesem Spurenelement unter Mangelbedingungen auch zu Auslagerungen aus dem Knochen kommen kann (SCHWARZ & KIRCHGESSNER, 1975 A). Innereien von Rindern enthalten deutlich mehr Cadmium und Blei als jene von Schweinen und Geflügel, was auf die Altersunterschiede bei der Schlachtung zurückgeführt werden kann (SAGER ET AL., 1998). Aufgrund der Schwermetallanreicherung dürfen Lebern und Nieren von Zuchtschweinen und Pferden nicht zur Gewinnung von Lebensmitteln genutzt werden. Gleiches gilt für Nieren von über 24 Monate alten Rindern.

Insgesamt kann aber die Belastung von Fleisch und Fleischerzeugnissen mit Schwermetallen als gering bezeichnet werden und ist weiterhin rückläufig (HONIKEL & HECHT, 1999). Quecksilber besitzt als Rückstand im Fleisch heute keinerlei Bedeutung mehr (HECHT, 1997). Hinsichtlich der Kontamination nimmt zwar die Bedeutung der unerwünschten Elemente ab, allerdings sind die Gehalte der essentiellen Elemente in dieser Hinsicht verstärkt in der Diskussion (HECHT, 1997).

Außerdem ist es möglich, durch Futterzusatzstoffe die Schwermetallakkumulation im Tierkörper zu vermindern. So berichten GRÜN ET AL. (1994) von einer verminderten Cadmiumeinlagerung in die Leber von Kälbern und Schafen nach Zugabe eines Antidots zu den nutritiven Dosen.

Milch und Eier

Tab. 2-22 zeigt zu erwartende Schwermetallgehalte in den tierischen Sekundärprodukten

Milch und Eiern.

Dabei spiegelt sich die Zinkzufuhr der Milchkuh im Zinkgehalt der Milch wieder. Dieser Zusammenhang besteht allerdings nur bis zu einem bestimmten Plateau, ab dem höhere Zinkzulagen zu keiner weiteren Steigerung der Gehalte in der Milch führen (SCHWARZ & KIRCHGESSNER, 1975 B). Milch akkumuliert weder Cadmium noch Blei, sofern dennoch erhöhte Cadmiumgehalte in Milch oder Milchprodukten auftreten, sind hierfür Sekundärkontaminationen während des Melk- oder Verarbeitungsprozesses als Ursache anzusehen (MÜLLER ET AL., 1993). Nach WENK ET AL. (1995) läßt sich diese Ursache allerdings nicht signifikant absichern. Ebenfalls ist nicht mit Unterschieden der Cadmium-, Blei- und Zinkgehalte in Milch während der Winter- bzw. Sommerfütterung zu rechnen. Dennoch bestehen Korrelationen zwischen den Bleigehalten im Blut und der Bleiaufnahme der Tiere, die aber erst im toxikologischen Bereich für das Tier zu Überschreitungen der Richtwerte für Blei in der Milch führen (THIEMANN ET AL., 1998).

Tab. 2-22: Schwermetallgehalte in Milch und Eiern

Erzeugnis/Körperteil	Quelle ¹	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Eier	a	0,01	0,01-0,50	0,5-2,3	0,24	k. A.	13,5
Milch	a	<0,01	<0,03	k. A.	<0,03	<0,01	3,8
Milch	o	<0,01	<0,03	<0,16	<0,02	<0,01	4,29

¹ siehe Seite 3

Der Spurenelementgehalt von Eiern ist relativ konstant und läßt sich kaum durch äußere Faktoren wie Haltung und Fütterung beeinflussen (KRIEG, 1966). Dabei liegen die Konzentrationen an Kupfer, Zink und Nickel im Dotter wesentlich höher als im Eiklar. Bezogen auf die Trockenmasse sind Eier hinsichtlich ihres Kupfergehaltes Milch und Fleisch gleichzusetzen und hinsichtlich des Zinkgehaltes mit Milch zu vergleichen (ROTH-MAIER ET AL., 1985). Allerdings beziehen sich die Autoren immer auf das Ei ohne Schale.

Die Schwermetallgehalte in Milch und Eiern können in der Regel als sehr gering eingestuft werden (WEIGERT, 1989).

2.3 Entwicklung – aktuelle Bestrebungen - gesetzliche Regelwerke

Mit dem Aufkommen des öffentlichen Interesses für Umweltfragen in den 70er und zu Beginn der 80er Jahre gerieten auch Auswirkungen landwirtschaftlicher Tätigkeiten in den Fokus der Nachforschungen. Ein Bereich dieser Betrachtungen ist seither die

Schwermetallforschung, die zuvor lediglich unter dem Aspekt der Versorgung von Mensch, Tier und Pflanze mit den essentiellen Spurenelementen betrieben wurde. Alarmiert durch Umweltkatastrophen wie der Itai-Itai-Krankheit in Japan, Mitte der 50er bis Mitte der 60er Jahre, begann man damit, zuerst die auffälligsten Eintragsquellen für Schwermetalle in landwirtschaftlich genutzte Böden zu lokalisieren. In Folge dessen nahm sich der Gesetzgeber des Problems an. Er ergriff Maßnahmen wie das Verbot zuerst cadmium- dann quecksilber- und arsenhaltiger Pflanzenschutzmittel 1972/1981 und definierte 1982 die gesetzlichen Anforderungen für den landwirtschaftlichen Klärschlammesatz in der Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 1992). Parallel hierzu wurden Kataster über Schwermetallgehalte in Böden angelegt wie die FisStobu Datenbank für Nordrhein-Westfalen.

Um neben dem Schwermetallmonitoring von Böden genauere Erkenntnisse über **Schwermetallumsätze in der Landwirtschaft** zu gewinnen, wurden seit Beginn der 90er Jahre verstärkt Berechnungen über Schwermetalleinträge auf landwirtschaftliche Nutzflächen angestellt (SEVERIN ET AL., 1991; BOYSEN, 1992; VAN SAAN ET AL., 1992B). Autoren wie ISERMANN (1992), OBRIST ET AL. (1993), WILCKE & DÖHLER (1995), LEINWEBER (1996), WESTHOEK & DRIESSEN (1997), WITTE ET AL. (1997), CRÖBMANN (1999) und BRENK (1998) bilanzierten sowohl Ein- als auch Austräge von Schwermetalle in/auf landwirtschaftliche Flächen auf unterschiedlichen Ebenen (Nationale Bilanzen, Hof- und Schlagbilanzen). Stoffbilanzen sind nach CRÖBMANN (1999) ein geeignetes Instrument zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit eines Verfahrens; nationale Bilanzen stellen allerdings allenfalls eine Orientierungshilfe dar. Die genannten Studien wurden aber nicht als Hofbilanzen von Praxisbetrieben angefertigt und erfassen daher keine betriebsinternen Flüsse, wie solche durch wirtschaftseigene Futter- und Düngemittel oder tun dies nur unter theoretischen Annahmen über die Schwermetallgehalte dieser Stoffe. Andere Autoren wie HORAK ET AL. (1994), REINER ET AL. (1996) und MOOLENAAR & LEXMOND (1998) unternahmen Untersuchungen auf einzelbetrieblicher Ebene, deren Ergebnisse mit denen der vorliegenden Arbeit verglichen und diskutiert werden.

Nach POETSCH (2001) sollten landwirtschaftliche Schwermetallbilanzen sowohl für unterschiedliche Betriebstypen als auch unterschiedliche Standorte angefertigt werden und die Variationsbreite der zugrundeliegenden Daten berücksichtigt werden. LINGG ET AL. (1996) greifen das „Proterra-Kalkulationsprogramm“ zur Früherkennung von regionalen Schwermetallbelastungen auf, um es auch auf der Stufe „Parzelle“ in die regionale Schwermetallbilanzierung einzubeziehen. LEINWEBER (1996) und MOOLENAAR ET AL. (1997) beziehen in ihre Kalkulationen auch zu erwartende Austräge an Schwermetallen über das

Sickerwasser in ihre Berechnungen mit ein, die sie mit dem sogenannten Freundlich-Modell kalkulieren. Dabei werden mögliche Anreicherungen auf den Bearbeitungshorizont bezogen.

WILCKE & DÖHLER (1995) stellen in ihrer Studie fest, daß je nach Element zum Teil erhebliche Anteile der Schwermetalleinträge in Agrarökosysteme auf die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zurückzuführen sind. Weiterhin kommen sie zu dem Urteil, daß die Einträge über Futtermittel in die Tierhaltung die Austräge durch Wirtschaftsdünger nicht allein erklären können.

Die zuvor genannte Arbeit von WILCKE UND DÖHLER (1995) war Ausgangspunkt für eine Klärung dieser Frage im Rahmen des UBA-Verbundprojektes „Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme“, in welche die Forschungen zur vorliegenden Arbeit integriert waren.

Von den Umweltminister- und Agrarministerkonferenzen (UMK/AMK) wurde die Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) beauftragt, Konzepte zur **einheitlichen Bewertung von Düngemitteln** zu erstellen. Infolge dessen wurde die **neue Düngemittelverordnung (DüMV, 2003)** in diesem Jahr auf den Weg gebracht, die seit dem 4. Dezember rechtskräftig ist. Sie enthält u.a. Grenzwerte für Arsen, Blei, Chrom, Nickel, Quecksilber, Thallium, Kupfer und Zink in Düngemitteln (Wirtschaftsdünger, Klärschlämme und Bioabfälle sind ausgenommen), Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Höchstgehalte für Cadmium sieht die Verordnung derzeit nicht vor. Die europäische Kommission wird hierzu aber in absehbarer Zeit eine gesetzliche Regelung treffen (EMBERT, 2003).

Zur Zeit wird in Deutschland das gemeinsame Konzept des BMU und BMVEL (BMVEL & BMU, 2002) „Gute Qualität und sichere Erträge – Vorschlag zur Begrenzung des Eintrages von Schadstoffen bei der Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen“ diskutiert. In dieser Konzeption, die auf BANNICK ET AL. (2001) zurückgeht, werden von den Vorsorgewerten des Bundesbodenschutzgesetzes Höchstwerte für flüssige Wirtschaftsdünger, Klärschlamm und Bioabfall hergeleitet. Dabei differieren die genannten Höchstgehalte nach den Böden, auf die diese Dünger ausgebracht werden sollen.

Derzeit sind **folgende gesetzliche Regelwerke und Verordnungen** bundesweit in Kraft, die Einfluß auf den bewirtschaftungsbedingten Eintrag von Schwermetallen in Agrarökosysteme haben:

- DÜNGEMITTELGESETZ (DÜMG), 1994
- DÜNGEVERORDNUNG (DÜV), 1996
- DÜNGEMITTELVERORDNUNG (DÜMV), 2003
- KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG (ABFKLÄRV), 1992
- KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ (KRW/ABFG), 1994
- BIOABFALLVERORDNUNG (BIOABFV), 1998
- BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBODSCHG), 1998
- BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (BBODSCHV), 1999
- FUTTERMITTELGESETZ (FMG), 2000
- FUTTERMITTELVERODNUNG (FMV), 2000 ab dem 26. Januar 2004 gilt
- VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003, diese wird demnächst mit der 24. Änderung der FMV (2000) in nationales Recht umgesetzt
- TIERHYGIENEVERORDNUNG, 2002

Darüber hinaus liegen für die landwirtschaftliche Klärschlammverwendung auch noch rechtliche Rahmenbedingungen auf Länderebene vor.

2.4 Schwermetalle in der Luft/Deposition

Einen Überblick über depositionsbedingte Einträge vermittelt Tab. 2-23.

Tab. 2-23: Schwermetallfrachten durch Staubniederschläge

Referenz	Quelle	As	Cd	Cr	g ha ⁻¹ a ⁻¹			
					Cu	Ni	Pb	Zn
NRW 1993	Ia/Ib	3,0	2,0	3,5	k. A.	7,2	31	k. a.
Plauen, Erzgebirge	II	k. A.	5,8	k. A.	117,2	45,1	83,7	1950,3
Bayern (1998)	III	k. A.	0,3	5	k. A.	4	9	68
Niedersachsen (1998)	IV	k. A.	0,3	k. A.	k. A.	k. A.	8	k. A.
Saarland (1998/99)	V	1,6	0,4	24	k. A.	19	29	184

Ia SCHULTE & GEHRMANN (1996) Ib SCHULTE ET AL. (1996) II BERGER ET AL. (2003)
 III BAYR. LA F. ÖKOL. (1999) IV NIEDERS. LA. F. ÖKOL. (1999) V MU SAARL. (1999)

Dabei war für den Zeitraum von 1984-1993 eine Abnahme für alle Elemente mit Ausnahme von Nickel zu beobachten (SCHULTE & GEHRMANN, 1996). Dies gilt besonders für Bleiimmissionen, die durch das Verbot bleihaltigen Benzins 1988 in Verbindung mit der Einführung von Katalysatorfahrzeugen sehr stark abgenommen haben (UBA, 1992).

Aufgrund des gestiegenen Nickelverbrauches (Legierungsmaterial, Batterieherstellung,

Katalysatoren) und der hohen Löslichkeit dieses Elementes im Boden postulieren diese beiden Autoren verstärkte Maßnahmen zur Emissionsminderung. Diesen Forderungen kommt die Novellierung der TA LUFT (2002) nach. Nach GLADTKE (2003) sind die Angaben dieser Autoren nach wie vor aktuell. Laut LUA NRW (2003) werden in Nordrhein-Westfalen lediglich für Nickel im Staubbiederschlag die Immissionswerte der TA Luft in größerem Ausmaß überschritten. Die nach BBODSCHV (1999) zusätzliche jährliche Höchstfracht von $6 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wurde 1999 in Brandenburg zu mehr als der Hälfte durch Deposition ausgeschöpft. Der Trend für Arsenimmissionen ist dort dagegen in den letzten Jahren rückläufig (LUA BRANDENBURG, 2002).

2.5 Schwermetallaustrag durch Sickerwasser

Für die Mobilisierung von Schwermetallen aus Böden und den Übergang in das Sickerwasser ist grundsätzlich die bereits im Kapitel „Boden“ erwähnte **Löslichkeitsreihe = Mobilitätsreihe der Elemente (Cd > Zn > Ni > Cu > Cr > Pb)** maßgeblich. Im Sickerwasser gelöste Schwermetalle können in tiefere Profildbereiche des Bodens und in das Grundwasser verlagert werden. Einen Überblick über anzunehmende Auswaschungsraten durch Sickerwasser aus Böden gibt Tab. 2-24.

Tab. 2-24: Schwermetallausträge durch Sickerwasser

Bodenart/-nutzung	Quelle	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
					$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$			
Unbestimmt	I	k. A.	1,2	3,5	21,3	5,5	5,9	240
Sand/Acker	II	k. A.	1,0	2,0	k. A.	25,8	17,3	k. A.
Lehm/Acker	II	k. A.	0,5	1,6	k. A.	19,3	4,0	k. A.
Löß/Acker	II	k. A.	0,7	1,4	k. A.	18,2	3,5	k. A.
Ton/Acker	II	k. A.	1,1	2,0	k. A.	21	6,9	k. A.

I WILCKE & DÖHLER (1995)

II ENDER (1986)

Dabei weist Sand aufgrund des geringen Sorptionsvermögens die höchsten Schwermetallverluste auf, gefolgt von Ton, Lehm und Löß mit vergleichbaren Raten (ENDER, 1986). Dies gilt, sofern die Verlagerungssituation nicht durch bodenbürtige Grundgehalte überlagert wird. Nach WELP (2003) ist aber der pH-Wert die maßgebliche Einflußgröße auf die Löslichkeit der Schwermetalle. Da die pH-Zielwerte nach guter fachlicher Praxis auf leichteren Standorten niedriger eingestellt werden als auf schwereren Standorten, erklären sich höhere Schwermetallausträge auf leichteren Standorten hieraus.

Nach den Untersuchungen von ENDER (1986) ist ein Einfluß der Mineraldüngung auf die

Konzentrationen im Sickerwasser nachweisbar, wobei sich die Höhe der Düngergabe nur geringfügig auswirkt. Eine von der Klärschlammdüngung abhängige Veränderung des Gehaltes an Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink im Sickerwasser in 60 und 110 cm Tiefe während des Probenahmezeitraumes stellt BOTSCHKE (1995) dagegen nicht fest.

3 Fragestellung

Die Reduktion des Schwermetalleintrages auf landwirtschaftlich genutzte Flächen ist ein erklärtes Ziel des Bodenschutzes.

Inwieweit die Landwirtschaft selber Anteil am Schwermetalleintrag auf ihre Flächen hat und welche Möglichkeiten hinsichtlich der Senkung der bewirtschaftungsbedingten Einträge bestehen, sind Kernfragen der vorliegenden Arbeit.

Im einzelnen sind in den Bereichen Pflanzen- und Tierproduktion hierfür folgende Fragestellungen zu beantworten:

Pflanzenproduktion

Wie hoch liegt der bewirtschaftungsbedingte Schwermetalleintrag und -austrag bzw. das Schwermetallsaldo bei verschiedenen Betriebstypen und damit unterschiedlichen Bewirtschaftungsweisen?

Wie groß sind die Schwankungsbreiten der Schwermetalleinträge und –austräge?

Woraus resultieren die Schwermetalleinträge? – Wo liegen die Hauptquellen?

Wie sind unterschiedliche Düngesysteme zu bewerten?

Welche Möglichkeiten bestehen hinsichtlich der Reduktion des Schwermetallsaldos durch Bewirtschaftungsmaßnahmen?

b) Tierproduktion

Wie hoch liegt der bewirtschaftungsbedingte Schwermetalleintrag und -austrag und damit das Schwermetallsaldo bei unterschiedlichen Tierhaltungsformen?

Wie groß sind die Schwankungsbreiten der Schwermetalleinträge und -austräge?

Woraus resultieren die Schwermetalleinträge?

Wie sind unterschiedliche Tierhaltungssysteme zu beurteilen?

Welche Möglichkeiten bestehen hinsichtlich der Reduktion des Schwermetallsaldos durch Haltungmaßnahmen?

4 Material und Methoden

4.1 Betriebsauswahl

Tab. 4-1 zeigt eine Übersicht der zu Bilanzierungen ausgewählten Betriebe. Dabei erfolgte die Auswahl nach folgenden Kriterien:

Repräsentative Betriebsformen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Standortgegebenheiten in Nordrhein-Westfalen

Breiter Überblick über landwirtschaftliche Nutzungssysteme

Betriebsführung nach den Grundzügen der guten fachlichen Praxis als zukunftsfähiger Vollerwerbsbetrieb

Kooperationsbereitschaft des Landwirts

Tab. 4-1: Betriebsauswahl

Betriebsnr. und -typ	LN [ha]	Kulturen	Tierbesatz [GV/ha]	Tierbestand	Futtergrundlage (hpts.)
1 Fut./Markt.	136,5	Kartoffeln, Zuckerrüben, Mais, Feldgras, Grünland	1,5	Milchkühe (184) mit Nachzucht	Ackerfutter
2 ¹ Fut./Markt.	57	Kartoffeln, Getreide, Futterleguminosen, Grünland	0,9	Milchkühe (34) mit Nachzucht	Ackerfutter
3 Fut.	41,5	Grünland	1,9	Milchkühe (54) mit Nachzucht	Grünland
4 Fut./Markt.	55	Kartoffeln, Mais, Wintergetreide	4,9	Mastbullen (270)	Ackerfutter
5 Fut./Markt.	97	Zuckerrüben, Raps, Mais, Wintergetreide, Grünland	1,8	Mutterkühe (100)	Grünland
6 Ver./Markt.	43	Zuckerrüben, Wintergetreide	1,3	Sauen (133) + Ferkel, Mastschweine (20)	Mischfutter
7 Ver./Markt.	60	Zuckerrüben, Mais, Getreide	1,3	Sauen (72), Mastschweine (360)	Eigenes Getreide
8 Ver./Markt.	56,25	Kartoffeln, Zuckerrüben, Getreide	1,1	Mastschweine (450)	Mischfutter
9 Ver./Markt.	39,5	Mais, Wintergetreide	0,8 ²	Mastputen (56000)	Mischfutter
10 (a/b) ³ Markt.	112,4	Zuckerrüben, Wintergetreide, Grassamenvermehrung	-	-	-
11 Freigem.	100	Salat, Kohlarten, Sellerie	-	-	-

hpts.: hauptsächlich
Ver.: Veredelung
Putenmist
Freigem.: Freilandgemüseanbau
¹ Produktion nach Bioland-Richtlinie
² feste Abnahmeverträge für anfallenden
³ (Düngung mit: a Klärschlamm Düngung; b Geflügelmist)

Grau unterlegt: Betrieb wurde nicht bilanziert, Einzelanalysen liegen vor

Betrieb 5 wurde im Wirtschaftsjahr 2000/2001 aufgrund einer unvorhergesehen Erbschaftsangelegenheit aufgegeben. Daraus ergab sich eine nur unvollständige und unsichere Datengrundlage, weshalb keine Bilanzen erstellt wurden. Es liegen allerdings umfangreiche Analysen vor, die im Anhang aufgeführt sind. Ebenfalls sind dem Anhang die Betriebsspiegel einschließlich der naturräumlichen Lage der Untersuchungsbetriebe zu entnehmen.

4.2 Probenahme

Die Probenahme auf den Betrieben erfolgte in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Betriebsleiter und richtete sich nach der jeweiligen Verfügbarkeit der einzelnen Betriebsmittel und Erzeugnisse. Die Probenahmemenge sowie die Anzahl der genommenen Proben waren abhängig von der Homogenität der einzelnen Betriebsmittel. Die einzelnen Probenahmeterminale sind dem Anhang C zu entnehmen. Im folgenden wird die Probenahme der einzelnen Stoffgruppen detailliert geschildert.

Böden

Die Beprobung der Betriebsflächen erfolgte mit einem Pürkhauer-Bohrstock über die Fläche verteilt. Ackerflächen wurden mit 25 Einstichen bis zur Bearbeitungstiefe beprobt. Auf Grünlandflächen wurden je 40 Einstiche pro Parzelle mit 10-12 cm Probennahmetiefe gezogen. Bei Acker- und Grünlandschlägen von über drei Hektar wurden die Probenahmeflächen entsprechend geteilt und die Teilflächen einzeln beprobt.

Mineraldünger

Von Einzelfällen abgesehen, wurden diese Proben bei unterschiedlichen Landhandelsunternehmen gezogen. Dadurch konnten Fehler, die in der Probenahme durch Fremdpersonen begründet sind, minimiert werden. Da mineralische Haupt- und Mikronährstoffdünger überregional vertrieben werden, konnte zudem die Probenahme gebündelt werden.

Grundsätzlich ließen sich dabei folgende Arten der Probenahme unterscheiden:

Beprobung von geschütteten Mineraldüngern (z.B. zwischengelagerte erdfeuchte Kalke, Mineraldünger in Schüttabteilen beim Landhandel) und in Gebinden gelagerten Mineraldüngern: Die Probenahme erfolgte möglichst weiträumig verteilt an mindestens 10

Stellen ca. 10-20 cm unter der anstehenden Oberfläche. Anschließend wurden mindestens je fünf so gewonnene Einzelproben zu einer Mischprobe von mindestens 1 kg vereinigt.

Beprobung von Siloware (z.B. gemahlener Branntkalk, Thomasmehl): Diese Proben wurden aus dem Ausfall des jeweiligen Produktes nach Öffnen des Fallschiebers genommen. Auch hier betrug die Mindestprobenmenge 1 kg.

Pflanzenschutzmittel

Da auch diese Produkte überregional vertrieben werden, konnte auch hier die Probenahme auf einzelne Betriebe eingeschränkt werden. Je nach Konsistenz erfolgte eine Probenahme von ca. 10 g bei Granulaten und Pulvern und 50 ml bei flüssig formulierten Präparaten.

Pflanzliche Erzeugnisse (Verkaufsprodukte, trocken konservierte Futtermittel und Stroh)

Je nach Lagerungsart (Schüttgut, Sackware oder Ballengebinde) wurden die Proben aus einer möglichst großen räumlichen Verteilung unterhalb der anstehenden Oberfläche gezogen. Diese wurden dann zu je mindestens einer Mischprobe vereinigt. Für die Beprobungen der wirtschaftseigenen Futtermittel und der Zukauffuttermittel betrug die Probennahmemenge etwa 0,5 bis 1 kg. Bei einigen Erzeugnissen wie Hackfrüchten und Gemüse betrug die Probenahmegewichte aufgrund der räumlichen Variabilität der Einzelstandorte der Pflanzen und den hohen Einzelpflanzengewichten z.T. bis 25 kg pro Probe.

Gärfuttermittel

Über die Anschnittflächen der Behelfs- oder Fahrsilos wurden zwei fiktive Diagonalen gelegt. Entlang dieser beiden Diagonalen (ausgenommen Randbereiche) wurden je sechs bis acht Proben aus ca. 10 cm Tiefe gezogen und zu je mindestens zwei Mischproben von je mindestens 1 kg vereinigt. Das Material wurde während des Transportes zur folgenden Trocknung in einer Kühlbox aufgehoben, so daß Trockensubstanzverluste durch Nachgärung ausgeschlossen werden konnten.

Mineralfutter-/Desinfektionsmittel

Sofern diese Produkte lose in Gebinden gelagert waren (Sackware oder Big Bag), wurden mehrere Proben mit möglichst hoher räumlicher Verteilung unterhalb der anstehenden

Oberfläche gezogen. Diese Einzelproben wurden dann zu je mindestens einer Mischprobe vereinigt. Wurden die Mineralfuttermittel als Leckstein oder Leckmasse in Schüsseln vorgefunden, wurden davon zwei Stücke an unterschiedlichen Stellen ab- bzw. herausgebrochen.

Von dem als Desinfektionsmittel verwendeten Kupfersulfat wurden die Proben nach gleicher Vorgehensweise wie bei den losen Mineralfuttermitteln gezogen.

Die Probenahmemenge betrug bei diesen Materialien ca. 300 g.

Wasser

Wasser wurde aus Wasserhähnen im Stallbereich entnommen. Bei Wasser, das zur Beregnung von pflanzlichen Kulturen verwendet wurde, geschah dies an verwendeten Wasseranschlüssen, z.B. an Hydranten. Dabei wurde der Vorlauf immer verworfen. Für die Wasserproben wurden für jede Probe mindestens 250 ml entnommen.

Milch

Die Milch wurde im Milchtank gerührt und der Vorlauf am Auslasshahn verworfen. Anschließend wurden mindestens zwei Proben a 0,5-1 l genommen und gekühlt aufbewahrt.

Gülle und Jauche

Die Proben wurden entweder direkt aus dem Lagerraum oder dem Tankwagen gezogen. Gülle wurde zuvor homogenisiert. Dabei wurden mindestens fünf Einzelproben zu je einer Mischprobe vereinigt. Bis zur Probenaufarbeitung wurden die Proben gekühlt und dunkel gelagert. Gülle- und Jaucheproben hatten ein Volumen von jeweils 1-1,5 l.

Festmist

Bei Stapelmisthaufen wurden an mindestens 15 verschiedenen Stellen Proben aus einer Tiefe von ca. 20 bis 30 cm unter der Oberfläche entnommen und zu je 3 Mischproben zusammengefasst.

Sofern Mistproben direkt aus dem Stall gezogen wurden, geschah dies an je fünf Stellen pro Stallabteil (einzelne Haltungsguppen). Diese wurden anschließend zu jeweils einer

Mischprobe vereinigt. Bei Tiefstreuställen erfolgte die Probenahme aus einer Tiefe von 10 bis 20 cm. In Tretmistställen wurden die Proben von der Bodenfläche entnommen.

Bis zur Probenaufarbeitung wurden auch die Mistproben gekühlt und dunkel gelagert, so daß auch hier eine Nachrotte auszuschließen war. Die Probenahmemenge betrug jeweils mindestens 1-1,5 kg.

Zementprodukte

Hierunter fällt eine Probe von Spaltenbodenbeton sowie eine Probe von Estrich aus der Mistrinne (beide Materialien entstammen Betrieb 3) à 50 g. Es erfolgte keine systematische Probenahme, vielmehr diente die Untersuchung nur der stichprobenhaften Evaluierung der Literaturangaben.

Klärschlamm

Diese Proben wurden vom Landwirt selber gezogen. Nach Absprache wurden dabei von der Oberfläche des auf dem Streufahrzeug lagernden Materials jeweils 10 Einzelproben zu einer Mischprobe vereinigt. Auch hier erfolgte bis zur Aufarbeitung eine kühle und dunkle Aufbewahrung derselben. Die Menge der so gewonnenen Mischproben belief sich auf ca. 1,5 kg.

Deposition

Um genaue Daten über die Schwermetallbelastung durch Schwebstaub am jeweiligen Betriebsstandort zu erzielen, wurden auf einigen Betrieben (2, 3, 4, 6 und 11) Depositionsmesser nach VDI-RL 2119 (1996) aufgestellt. Allerdings mußte aus praktischen Gründen darauf verzichtet werden, ein sog. Meßraster um den jeweiligen Untersuchungsstandort zu legen, so daß pro Betrieb lediglich 1 Probensammler aufgestellt wurde. Das Wechseln der Bergerhoff-Gefäße erfolgte durch die Landwirte. Über einen Zeitraum von vier Monaten wurden die Sammelgefäße in einem Abstand von 30 Tagen ausgetauscht. Bis zur Messung wurden die so gewonnenen Proben bei Dunkelheit und Temperaturen <4 °C gelagert.

4.3 Probenaufarbeitung und -aufschluß

Sofern die Proben gemahlen wurden, geschah dies mit einer Scheibenschwingmühle der Firma SIEB-TECHNIK mit schwermetallabriebfreiem Vidia-Stahl.

Je Probe erfolgte eine doppelter Aufschluß.

Sämtliche Probenaufschlüsse wurden filtriert. Hierfür wurden aschefreie Rundfilter für mittelfeine Niederschläge (Macherey-Nagel 640 M) verwendet.

Die so gewonnenen Filtrate wurden für den Zeitraum bis zur Messung in konditionierten Polyethylenflaschen bei 4 °C gelagert.

Böden

Diese wurden zuerst im Trockenschrank bei 45 °C getrocknet und anschließend mittels eines Plastiksieves mit 2 mm Siebdurchgang gesiebt. Ein Teil des Siebdurchlasses wurde dann der pH-Wert-Bestimmung zugeführt. Der andere Teil wurde für die Schwermetallanalytik verwendet und deshalb zusätzlich gemahlen.

Der Aufschluß zur Schwermetallanalyse erfolgte mit Königswasser. Ausnahme waren die Bodenproben der Betriebe 6, 7 und 11: Hier erfolgte der Aufschluß mit HNO₃ unter Druck. Vergleichende Untersuchungen dieser beiden Methoden ergaben, daß sie zu sehr ähnlichen Analyseergebnissen führen, wobei die Gehalte nach Druckaufschluß mit Salpetersäure in der Tendenz etwas höher liegen (GOLDBACH, 2001).

Betriebsmittel und Erzeugnisse

Die Proben wurden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und die Trockensubstanz gravimetrisch ermittelt (auch Zementprodukte Estrich und Beton). Anschließend wurden die Proben ebenfalls gemahlen und mit HNO₃ unter Druck aufgeschlossen.

Proben von Hackfrüchten wurden vor ihrer Trocknung gewaschen, um Gehaltsverfälschungen durch mit untersuchten Erdanhang auszuschließen.

Die Wasser- und Milchproben wurden nicht getrocknet, sondern lediglich mit Salpetersäure versetzt und anschließend aufgeschlossen.

Flüssige Pflanzenschutzmittel wurden direkt aus der vorliegenden Probenmatrix ohne vorheriges Aufschlußverfahren analysiert.

Deposition

Die Aufarbeitung der genommenen Depositionsproben erfolgte nach VDI RL 2119 (1996) (Bestimmung des Staubniederschlages). Der Staubniederschlag wurde mit HNO_3 und H_2O_2 in der Mikrowelle aufgeschlossen. Diese Arbeiten wurden am Landesumweltamt NRW, Essen durchgeführt.

4.4 Analytik

Böden

Diese wurden auf die Elemente Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink untersucht. Cadmium wurde dabei am Graphitrohr-AAS (Perkin-Elmer/3030 Zeemann Untergrundkompensation) nach Standardadditionsverfahren gemessen. Die Gehalte der anderen Elemente wurden mit Hilfe eines Flammen-AAS (Perkin-Elmer/1100 B) aus der sauren Lösung bestimmt.

Die pH-Wert-Bestimmung der Böden erfolgte in CaCl_2 -Lösung mit Hilfe eines pH-Meters (WTW, p-MX 2000).

Betriebsmittel und Erzeugnisse

Grundsätzlich wurden diese Proben auf Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink untersucht. Dabei wurden Cadmium, Chrom, Nickel und Blei an AAS mit Graphitrohrtechnik, Perkin-Elmer/3030 und Unicam-Solaar/M-series, beide mit Zeemann-Untergrundkompensation und Standardadditionsverfahren, gemessen. Kupfer und Zink wurden mit dem Gerät Perkin-Elmer/1100 B in der Flamme gemessen.

Darüber hinaus wurde eine ausgewählte Anzahl von Wirtschaftsdüngern hinsichtlich ihrer Arsen- und Quecksilbergehalte analysiert. Diese Analysen wurden am Institut für Bodenkunde der Universität Bonn mit Hilfe eines AAS mit Hydridsystem (Perkin-Elmer, A-Analyst 300) durchgeführt.

Um ebenfalls das P-Düngeniveau der untersuchten Betriebe zu ermitteln, wurden die Phosphorgehalte in den Aufschlüssen der Wirtschaftsdünger nach der Vanadat-gelb-Methode mit einem Eppendorf-Digitalphotometer 6114 bestimmt.

Deposition

Die Messungen hierzu wurden ausnahmslos am LUA NRW, Essen durchgeführt. Dabei wurde für die Messung von Cadmium, Chrom, Nickel, Blei und Zink ein ICP-OES (Perkin-Elmer/Optima 4300 DV) verwendet. Zur Bestimmung von Arsen kam ein AAS mit Hydridtechnik (Unicam, 989 QZ) zum Einsatz.

4.5 Überprüfung der Aufbereitungs- und Analysemethoden (Ringuntersuchung)

Um die Güte und Vergleichbarkeit der Schwermetallanalytik zwischen den am UBA-Gesamtprojekt beteiligten Instituten (LUFA Oldenburg, IPE Bonn, Uni Bayreuth) zu prüfen, wurde eine Ringuntersuchung durchgeführt. Alle Projektpartner schlossen fünf bereits gemahlene Proben (Futtermittel, Gülle) der Universität Bonn mit der gleichen Methodik auf und bestimmten anschließend die Schwermetallgehalte wie beschrieben. Die gemessenen Schwermetallgehalte wurden verglichen. Die Variationskoeffizienten zwischen den Messwiederholungen betrugen 2-7 %. Tab. 4-2 zeigt die Mittelwerte, die Einzelergebnisse sind Anhang E zu entnehmen. Dabei wurden keine systematischen Abweichungen festgestellt (SCHULTHEISS ET AL., 2003).

Tab. 4-2: Ergebnisse der Ringuntersuchung zur Überprüfung der Schwermetallanalytik; Mittelwert aller beteiligten Einrichtungen \pm Standardabweichung

Probe	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹ TM					
Kälbermist 1/37	0,27 \pm 0,03	2,7 \pm 0,75	24 \pm 13	2,8 \pm 0,80	2,8 \pm 0,27	86 \pm 13
Kälbermist 2	0,20 \pm 0,03	1,4 \pm 0,24	19 \pm 6,0	2,2 \pm 0,75	1,6 \pm 0,15	89 \pm 15
Bullengülle 17	0,35 \pm 0,04	4,0 \pm 0,62	78 \pm 11	5,8 \pm 3,4	5,0 \pm 1,0	390 \pm 49
Rübe	0,19 \pm 0,02	0,55 \pm 0,23	4,5 \pm 0,14	1,5 \pm 1,1	0,48 \pm 0,13	23 \pm 3,2
Kraftfutter 18/3	0,04 \pm 0,01	1,5 \pm 0,29	25 \pm 6,0	1,8 \pm 0,67	0,52 \pm 0,07	120 \pm 7,8

Darüber hinaus wurden zur Kontrolle der Messungen wiederholt Referenzproben aufgeschlossen und gemessen (Reference sample Soil 6, Commission of the European communities/Tea, GBW 07605).

Die Nachweisgrenzen der Schwermetalluntersuchungen sind der Tab. 4-3 zu entnehmen.

Tab. 4-3: Nachweisgrenzen für Schwermetalle

Probematerial	Bezugsgröße	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Boden	mg kg ⁻¹ TM	-	0,001	0,06	0,02	-	0,2	0,2	0,02
Feststoffe incl. flüssige Wirtschaftsdünger	mg kg ⁻¹ TM	0,005	0,05	0,025	1	0,030	0,15	0,075	4,1
Wasser/Milch	mg l ⁻¹	-	0,001	0,0005	0,02	-	0,03	0,0015	0,082
Pflanzenschutzmittel	mg l ⁻¹	-	0,002	0,003	0,001	-	0,01	0,01	0,001

Grua unterlegt: Flammen-AAS Weiß unterlegt: Graphitrohr-AAS - keine Messungen

4.6 Ermittlung der Massen- und Schwermetallflüsse

Die Ermittlung der Massenflüsse wurde den in den einzelnen Betrieben vorliegenden Bedingungen angepaßt, die auch bei der Ergebnisdarstellung erläutert werden. Bei den zugekauften Produktionsmitteln konnte auf im Betrieb vorhandene Belege (Daten) zurückgegriffen werden, andere wurden direkt vor Ort erhoben. Somit beruhen die Ergebnisse auf Buchführungsergebnissen, Arbeitskreisauswertungen, Düngebilanzen und Mitteilungen des Betriebsleiters sowie eigenen Mengenermittlungen.

Alle Massenflüsse wurden mit den entsprechenden ermittelten bzw. eingesetzten Schwermetallgehalten fakturiert. Die so ermittelten Schwermetallflüsse wurden anschließend in Relation zu den jeweiligen Referenzgrößen Fläche [ha] (Schlagbilanz) und Großvieheinheit [GV] (Stallbilanz) gebracht. Dadurch ist es in folgender Betrachtung möglich, die untersuchten Betriebe aus unterschiedlichen Perspektiven miteinander zu vergleichen.

Die Umrechnung für die GV-Einteilung der Einzeltiermassen erfolgte nach VDI RL 3474 (2000). Im folgenden wird auf die Bestimmung der Massenflüsse explizit eingegangen.

Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Saatgut und Beregnungswasser

Die eingesetzten Mengen dieser Betriebsmittel konnten der Düngebilanzierung nach Düngeverordnung sowie vorliegenden Ackerschlagkarteien entnommen werden. Die Daten zu den eingesetzten Wassermengen zur Beregnung beruhen auf Angaben der Landwirte. Diese Angaben wurden mit Faustzahlen zur Beregnung (BRAMM ET AL., 1993) verglichen bzw. auf Plausibilität geprüft.

Selbsterzeugte pflanzliche Produkte incl. wirtschaftseigene Futtermittel

Sofern es sich um Marktfrüchte handelte, konnten die Ernteerträge den Ackerschlagdateien bzw. den Buchführungsergebnissen (gemeinsam mit dem Landwirt) entnommen werden.

Der Ermittlung der wirtschaftseigenen Futtermengen basieren auf Ertragsschätzungen, in die Parameter wie Standort, Düngungsniveau, Artenzusammensetzung und Narbendichte einfließen. Diese wurden in Zusammenarbeit mit der LK Rheinland durchgeführt. Zum anderen wurden vergleichend Aufmaße der wirtschaftseigenen Futtermittel genommen und diese mit Lagerungsdichten (DOHNE, 1993; SPIEKERS, 2002) fakturiert. Für die Stallbilanzierung wurden Unterschiede der Gärfuttermengen zum Ab-Feld-Ertrag infolge von Silierverlusten nach SPIEKERS (2002) berücksichtigt. Zudem wurden anhand der Futtermittelverwertung bzw. des Futterbedarfs unter Einbeziehung der zugekauften Futtermittel, der tierischen Leistungen und des Viehbestandes Plausibilitätskontrollen durchgeführt.

Zukaufsfuttermittel

Angaben hierüber konnten der Hoftorbilanzierung zur Düngeverordnung, Buchführungsergebnissen oder Arbeitskreisbewertungen entnommen werden.

Desinfektions-/Tierarzneimittel

Die Massenflußbestimmung dieser Positionen erfolgte aufgrund Betriebsleiterangaben. Hier wurden lediglich Präparate aufgenommen, die relevante Frachten erwarten ließen, wie beispielsweise Fütterungsarzneimittel. Die Angaben der Landwirte konnten teilweise durch Information der zuliefernden Handelsunternehmen ergänzt werden.

Wirtschaftsdünger

Die Ermittlung der Massenflüsse bei den Wirtschaftsdünger beruht auf Zählungen der gefahrenen Frachten und Fakturierung derselben mit den jeweiligen durchschnittlichen Beladungen der Ausbringungsfahrzeuge (Miststreuer und Gülletankwagen). Die daraus gewonnenen Ergebnisse wurden Plausibilitätskontrollen unterzogen. So wurden auf der Eintragsseite die ermittelten Futtermengen mit dem Bedarf laut Futterrationsberechnung verglichen. Auf der Austragsseite wurden die ermittelten Wirtschaftsdüngermengen mit Modellberechnungen (LUFA OLDENBURG, 1992; FRÜCHTENICHT ET AL., 1993 A/B/C; RUPPERT

ET AL., 1985) verglichen. Zudem wurde der Faßinhalt der Ausbringungsfahrzeuge (Gülle) stichprobenweise durch Wägung ermittelt. Bei absätziger Stallmistlagerung wurden die gewonnenen Daten zusätzlich überprüft: Die Dungstätten wurden aufgemessen und mit Raumgewichten (GEISNER & HUBER, 1976) fakturiert.

Tränke und Desinfektion

Die eingesetzten Wassermengen zur Tränke wurden nach PALLAUF (1993) geschätzt. Die hinzukommenden Wassermengen zur Desinfektion wurden gemeinsam mit dem Betriebsleiter abgeschätzt.

Tierzu-/abgänge

Die Tierzugänge und -abgänge wurden bei den viehhaltenden Betrieben anhand folgender Informationen festgelegt: Hoftorbilanz lt. Düngemittelverordnung, Arbeitskreisauswertung, Buchführungsangaben einschl. Betriebsleiterangaben (Tierverluste).

Für die Mastbetriebe (Bullen, Schweine, Puten) basieren die Verkaufsgewichte auf exakten Wägungen. Die Einstellungsgewichte basieren entweder auf exakten Wägungen oder auf stichprobenartigen Wägungen, die hochgerechnet wurden.

4.7 Sonstige Untersuchungen

Schwermetallgehalte der Tierkörper

Die in die Stallbilanzen eingehenden Schwermetallgehalte für die Tierkörper von Rindvieh und Schweinen (Tab. 4-4) wurden gemeinsam im UBA-Verbundprojekt aus Literaturangaben (VEMMER & PETERSEN, 1977/1979/1980; SCHEUNERT & TRAUTMANN, 1987; FIEDLER & RÖSLER, 1993; HECHT & KUMPULAINEN, 1995; HONIKEL, 1995/2000; HECHT, 1997; KIRCHGESSNER, 1997; BELLOF ET AL., 1999; ALONSO ET AL., 2000; SOUCI ET AL., 2000) und eigenen Analysen ermittelt.

Die in der Literatur vorhandenen Schwermetallgehalte von Milchkühen und Mastschweinen bezogen sich auf unterschiedliche Körperteile. Den Berechnungen wurde daher in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Fleischforschung, Kulmbach, eine durchschnittliche prozentuale Massenverteilung zugrunde gelegt (AUGUSTINI, 2000; FISCHER, 2002). Sofern für

einzelne Körperteile mehrere Literaturangaben für ein Schwermetall vorlagen, wurde aus diesen ein Mittelwert gebildet und aus den verschiedenen Mittelwerten die Gesamtgehalte an Schwermetallen im Tierkörper massengewichtet extrapoliert.

Tab. 4-4: Schwermetallgehalte für Tierkörper, die in die Stallbilanzen einbezogen wurden (massengewichteter Mittelwert aus Literaturangaben und eigenen Analysen)

Tier	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹ TM					
Milchkuh/Mastrind	0,03	0,3	6,0	0,9	0,4	81
Mastschwein	0,04	0,2	3,7	0,7	0,4	56
Mastputen ¹	0,04	0,1	5,5	0,2	0,2	71 ²

¹ Berechnung anhand der Retention² SCHENKEL (2003)

Bei der Ermittlung von eigenen Daten für die Schlachtkörper wurden direkt auf dem Schlachthof von drei Mastschweinen des Betriebes 7 sowie von einer Milchkuh und zwei Mastbullen eines Betriebes aus dem Teilprojekt Bayreuth (UBA-Projekt) Proben genommen. Dabei wurden die Proben von verschiedenen Körperanteilen genommen und unter sich (dem jeweiligen Körperanteil), je nach Probenaufkommen, zu einer bis vier Mischproben vereinigt. Die Proben wurden in flüssigem Stickstoff gefriergetrocknet und anschließend mit einem Mörser vermahlen. Aufschluß und Analytik erfolgten wie bei den Betriebsmitteln. Die Ergebnisse sind im Anhang E dargestellt.

Eine Ausnahme bei der Ermittlung der Schwermetallgehalte im Tierkörper war die Vorgehensweise bei Mastputen. Hier wurden Retentionsraten nach FRÜCHTENICHT (2003) aus den aufgenommenen Futter- und Tränkemengen zugrunde gelegt. Die eingesetzten Zinkgehalte wurden von SCHENKEL (2003) übernommen. Die kalkulierten Gehalte sind Tab. 4-4 zu entnehmen.

Korrosion und Abrieb der Stalleinrichtung (Verzinkte Stahlbauelemente)

Um den Beitrag von Korrosion und Abrieb an verzinkten Stalleinrichtungen am Schwermetalleintrag in Wirtschaftsdünger zu erfassen, wurden auf Betrieb 3 in Kooperation mit dem KTBL, Darmstadt, der Initiative Zink in der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Düsseldorf und dem Institut Feuerverzinken, Düsseldorf hierzu Untersuchungen unternommen. Dies erfolgte mittels magnetisch-induktiver Messungen und ergab eine durchschnittliche Abtragsrate von 1,6 µm a⁻¹ bzw. 11,4 g m⁻²·a⁻¹. Als Vergleichsgröße dienten nicht in den Stall eingebaute Aufstallungen, die der Landwirt trocken gelagert hatte. Ebenfalls wurden die verzinkten Oberflächen der sich im Stall befindenden Stahlrohre ausgemessen und

mit der ermittelten Abtragsrate fakturiert.

Aus Angaben des INDUSTRIEVERBANDES FEUERVERZINKEN (2002), belaufen sich für verzinkte Oberflächen der Zinkgehalt auf 96 %, der Bleigehalt auf 0,5 % und der Cadmiumanteil auf 15 mg kg⁻¹. Für Betrieb 3 konnten somit für die genannten Elemente Eintragsraten in die Gülle errechnet werden.

4.8 Bilanzierung

Zur Berechnung von Schlag- und Stallbilanzen wurden die Einträge an Schwermetallen über die einzelnen Eintragswege summiert und von den jeweiligen, ebenfalls summierten Austrägen subtrahiert. Die sich so ergebende Differenz spiegelt das Saldo der Bilanz wieder. Eintragsüberhänge erscheinen demnach als positiver Betrag. Überhänge beim Austrag konträr negativ.

4.8.1 Pflanzliche Produktion (Schlagbilanzen)

Der Bereich pflanzliche Produktion wurde auf Gesamtschlagbasis bilanziert. Einzelne Kulturen gingen gemäß ihres Anteils an der Fruchtfolge und ihres jeweils speziellen Schwermetallumsatzes in die Bilanzierung dieses rechnerischen Gesamtschlages ein. Dies ist auch vor dem Hintergrund sinnvoll, daß die Grunddüngung und Kalkung in den meisten Fällen zur tragenden Frucht erfolgt, aber für die gesamte Rotation oder zumindest eines Teiles derselben gedüngt wird. Diese Art der Schlagbilanz wurde auch für Grünland durchgeführt. Einen Überblick über berücksichtigte Positionen vermittelt Abb. 4-1 auf der folgenden Seite. Bei den Schlagbilanzen wurde bewußt auf Austräge durch erodiertes oder angefahrenes Erdmaterial verzichtet. Ausnahme stellten lediglich wirtschaftseigene Futtermittel dar (hier ließ sich diese Austragsgröße nicht vermeiden bzw. war sie für die spätere Stallbilanzierung auch unabdingbar). Solche Bewegungen stellen innerhalb der Bilanz einen z.T. nicht unerheblichen Ein- bzw. Austragsfaktor dar. Im Falle eines Aus-/Eintrages von Erdmaterial liegt aber nur dann eine relevante Veränderung vor, wenn das ausgetragene oder eingebrachte Material bedeutend andere Schwermetallgehalte aufweist als der zu betrachtende Boden. Ist dies nicht der Fall, liegt zwar eine zusätzliche/geringere Schwermetallmenge auf der Fläche vor, die Schwermetallkonzentration in der Pedosphäre wird aber hierdurch nicht erhöht bzw. verringert. Zudem sind solche Einträge vorrangig punktförmig begrenzt (z.B. Erosionsrillen oder Bodenschüttungen). Sie sind deshalb nicht auf die gesamte Fläche zu beziehen.

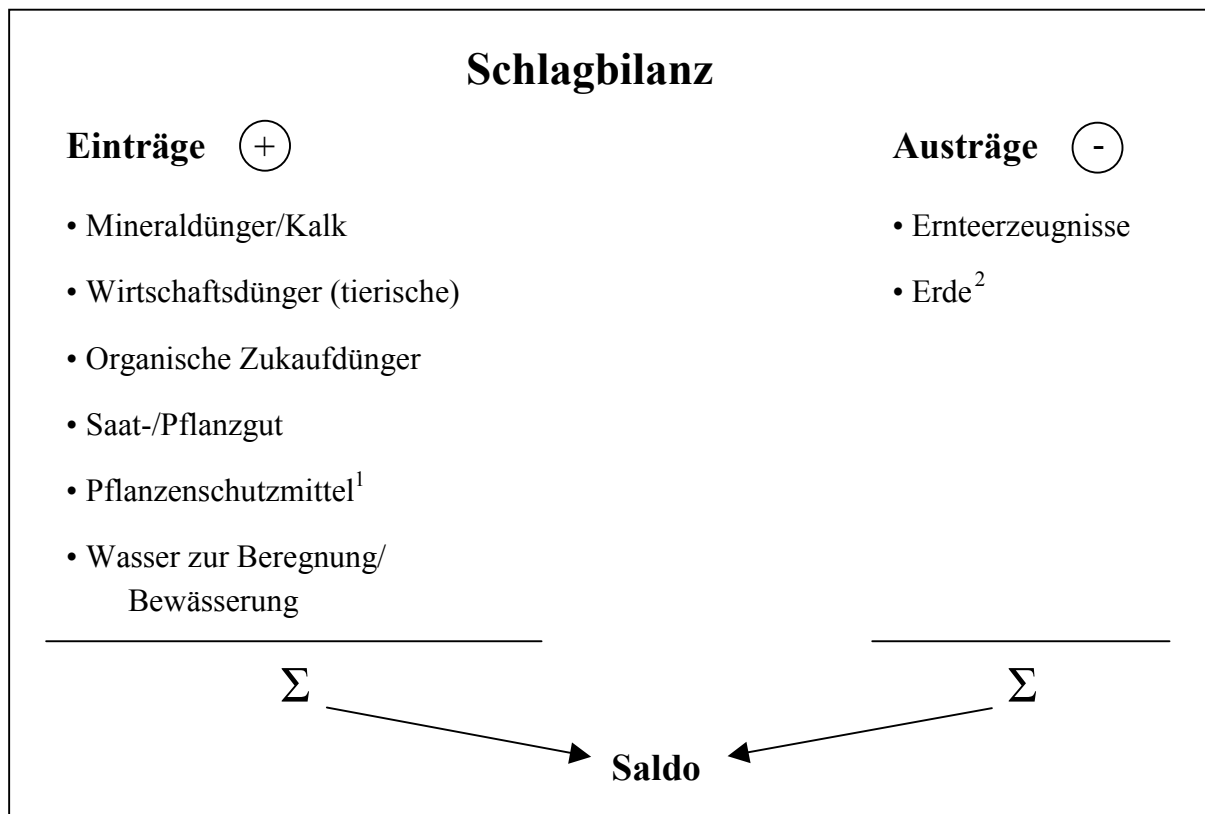


Abb. 4-1: Zusammensetzung der Schlagbilanz

¹ Pflanzenschutzmittel nach Evaluierung nicht weiter berücksichtigt

² Erdanhang bei Hackfrüchten zur Vermarktung unberücksichtigt, ebenfalls Erosionsausträge

Nach Analyse der untersuchten Pflanzenschutzmittelprouben wurde auf die Berücksichtigung dieser Eintragsposition verzichtet, weil die daraus resultierenden Frachten gegen Null gingen.

Einträge durch Deposition auf die landwirtschaftliche Nutzfläche und in den Stall werden nicht in den Bilanzen aufgeführt, sondern dienen bei den hierauf untersuchten Betrieben zur Abschätzung der Relevanz des bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrages am Gesamtschwermetalleintrag.

4.8.2 Tierische Produktion (Stallbilanzen)

Der Bereich Viehhaltung der untersuchten Futterbau- und Veredelungsbetriebe wurde mit Hilfe von Stallbilanzen beleuchtet. Auskunft über die dabei berücksichtigten Ein- und Austragsgrößen vermittelt Abb. 4-2.

Dabei sind die Stoffbilanzen als Gesamtstallbilanzen zu verstehen. Das bedeutet, daß in der Tierhaltung nicht zwischen unterschiedlichen Betriebszweigen der Tierhaltung auf den einzelnen Betrieben unterschieden wurde und eine gemeinsame Bilanzierung erfolgte. Beispielsweise wurden bei Betrieb 7 Ferkelproduktion, -aufzucht und Mast im geschlossenen

System auch gemeinschaftlich bilanziert. Ähnliches gilt für die Futterbaubetriebe, bei denen z.B. Kälber- und Jungviehaufzucht mit in die Bilanzierung einfließen. Sofern das Milchvieh neben der Stallfütterung auch Weidegang zugeteilt bekam, wurden auch die daraus resultierenden Schwermetallumsätze in der Bilanz erfaßt. Jungvieh, das zeitweise ausschließlich auf der Weide war, wurde für diese Zeiträume nicht berücksichtigt. Im einzelnen wird hierauf im Kapitel 5.1.1.3 betriebsindividuell eingegangen. Die ermittelten Schwermetallbewegungen sowie die Bilanz wurden in Relation zur Großvieheinheit (VDI RL 3474) gesetzt (vgl. Kap. Berechnung der Massenflüsse).

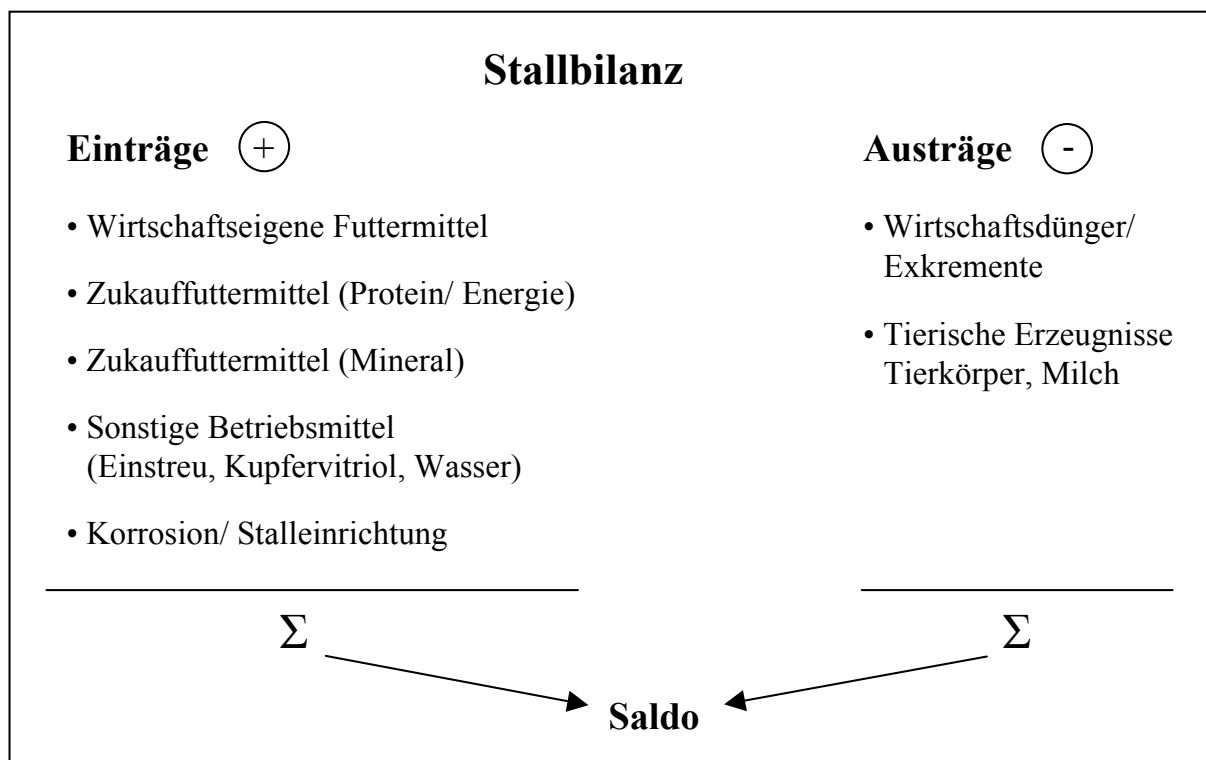


Abb. 4-2: Zusammensetzung der Stallbilanz

4.9 Statistische Auswertung

Bei der Bilanzierung der Schwermetallflüsse wurde für jedes Betriebsmittel mit einer Probenanzahl $n > 1$ der Fehler des Mittelwertes der gemessenen Schwermetallgehalte, der Fehler der Trockensubstanz, sowie der geschätzte Fehler der Massenflußbestimmung berücksichtigt. Der mittlere Fehler kennzeichnet dabei die Verlässlichkeit der gewonnenen Daten.

Die Berechnung von Mittelwerten erfolgte über das arithmetische Mittel, der Fehler des

Mittelwerts s^* nach KÖHLER ET AL.(1996). Bei der Multiplikation von zwei Werten wurde das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz verwendet. Dieses zeigt an, wie sich Meßfehler durch eine Rechnung bis hin zum Endresultat fortpflanzen (HARTUNG, 1989). Bei der Bildung einer Summe aus zwei oder mehreren Werten wurden die Fehler addiert. Dabei variiert der geschätzte Fehler des Massenflusses je nach Betrieb und Stoffstrom und wird in Anhang D angeführt. Grund hierfür sind unterschiedliche Sicherheiten mit der der jeweilige Stoffstrom angenommen werden kann. Als Beispiel: Die zugekauften Mengen an Sojaschrot sind dokumentiert. Die hierzu noch einzuplanende Fehlerquelle liegt lediglich darin, binnen welchen Zeitraumes die Menge verfüttert wurde. Dagegen ist die Ermittlung der gefressenen und damit ins System eingehenden Menge an Weideaufwuchs mit bedeutend höheren Unsicherheiten belegt.

In den Fällen, wo **Schwermetallgehalte aus der Literatur in die Bilanzierung eingesetzt wurden (Kennzeichnung:Ψ)**, zu denen keine Standardabweichungen vorlagen oder nicht mehr als $n=1$ zugrunde lag, wurden 20 % des Mittelwertes als mittlerer Fehler des Gehaltes angenommen. Diese Standardabweichung wurde gewählt, weil aus Erfahrungen mit Ringuntersuchungen von Spurenelementen Standardabweichungen zwischen <10 % bis über 50 % der Mittelwerte auftraten (SAUERBECK & LÜBBEN, 1991).

In den Kapiteln „Schwermetallgehalte“ werden in den Tabellen zu den Mittelwerten die jeweiligen Standardabweichungen angegeben. In den Kapiteln „Schlagbilanzen“ und „Stallbilanzen“ wird der errechnete Gesamtfehler der Ein- und Austräge angezeigt.

Ein signifikantes Saldo zwischen Eintrag und Austrag lag vor, wenn die Fehlerbereiche (Fehler der Mittelwerte) sich nicht überschneiden. **Signifikante Salden sind sowohl in den Tabellen als auch in den Abbildungen mit * gekennzeichnet.** Signifikante Salden sind demnach als statistisch abgesicherte Eintrags- bzw. Austragsüberhänge zu deuten.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 *Landwirtschaftlicher Betrieb*

5.1.1 Pflanzliche Produktion

Die vorab im Kapitel "Schwermetallgehalte" gezeigten und zur späteren Bilanzierung verwendeten Schwermetallgehalte der Böden, Betriebsmittel und pflanzlichen Erzeugnisse werden, sofern sie betriebsindividuell waren (Böden, Wirtschaftsdünger, Beregnungswasser, Ernteerzeugnisse), separat dargestellt. Andere eingesetzte Faktoren wie Mineraldünger und Pflanzenschutzpräparate, die überregional vertrieben und eingesetzt werden, werden zusammengefaßt gezeigt. Die Gesamtdarstellung und Auswertung der im Rahmen der Arbeit gewonnenen Analyseergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

5.1.1.1 *Schwermetallgehalte*

5.1.1.1.1 Böden

Tab. 5-1 zeigt die betriebs- und nutzungsweise gemittelten Gesamtschwermetallgehalte ausgesuchter Betriebsflächen einschließlich der ermittelten pH-Werte. Die Ergebnisse decken sich mit den in der Literatur dargestellten Ergebnissen wie denen von LIEBE (1999). So wiesen die Standorte mit sandigeren Böden der Betriebe 4, 8 und 9 geringere Chrom- und Nickelgehalte in der Ackerkrume auf als andere Standorte. Nach SPÄTE ET AL. (1991) sind diese beiden Elemente in hohem Maße silikatisch gebunden. Diese Bindungsmöglichkeit liegt in sandigen Bodentexturen wesentlich seltener vor.

Die Gehalte im Beprobungshorizont von Grünland (0-15 cm) lagen tendenziell höher als die im Beprobungshorizont von Ackerland (0-30 cm) des jeweiligen entsprechenden Betriebes. Diese Beobachtung wird auch von VAN SAAN ET AL. (1992A) und SPÄTE ET AL. (1991) bestätigt. WIEGMANN (1999) beschreibt die Schwermetallakkumulation im A_h -Horizont von Grünland als einen pedogenen Prozeß in Folge der „Pumpwirkung“ der Grünlandpflanzen. Nicht zu vernachlässigen sind sämtliche anthropogenen Einträge, die nicht wie im A_p -Horizont von Ackerflächen, ständig eingemengt und damit verdünnt werden.

Auffällig höher als bei den anderen Ackerböden sind die Cadmiumgehalte in den Böden von Betrieb 11. In ca. 5- 10 km Entfernung zu diesem Standort befinden sich seit den 20er Jahren

des vorigen Jahrhunderts große Raffinerieanlagen und Petroindustrie. Allerdings liegt der Standort nicht in der Hauptwindrichtung dieser Emittenten. An diesem Standort ist das lithogene Ausgangsmaterial ein devonischer Tonschiefer. Die devonischen Tonschiefer des Rheinischen Schiefergebirges weisen nach HINDEL & FLEIGE (1990) und BLUME (1992) überdurchschnittlich hohe Schwermetallgehalte auf.

Tab. 5-1: Schwermetallgehalte der Acker- und Grünlandböden [mg kg⁻¹]

Betrieb	n	Nutzung	Bodenart	pH ¹	mg kg ⁻¹ TM					
					Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	13	Acker	sL	6,5	0,25 ± 0,15	21,4 ± 2,7	8,53 ± 2,72	10,5 ± 3,4	18,5 ± 2,8	45,2 ± 7,2
1	1	Grünland	sL	6,0	0,24	32,7	9,08	20,5	25,5	74,7
2	8	Acker	sL	5,9	0,28 ± 0,06	17,2 ± 4,6	6,59 ± 2,07	4,41 ± 1,64	17,3 ± 4,6	32,4 ± 10,8
2	2	Grünland	sL	5,7	0,34 ± 0,09	33,1 ± 11,5	6,64 ± 0,55	16,4 ± 8,5	26,9 ± 7,5	68,1 ± 35,2
3	7	Grünland	tL	6,0	0,80 ± 0,13	35,2 ± 2,8	19,7 ± 5,1	20,5 ± 4,0	46,3 ± 2,8	113 ± 9
4	4	Acker	hS	6,3	0,26 ± 0,07	10,7 ± 1,6	9,55 ± 2,78	3,18 ± 0,37	17,7 ± 2,3	32,9 ± 2,1
5	5	Acker	tL	6,9	0,28 ± 0,04	28,8 ± 3,5	15,1 ± 3,0	15,1 ± 1,2	21,5 ± 1,4	51,3 ± 1
5	5	Grünland	IT	6,4	0,24 ± 0,06	34,5 ± 7,25	16,9 ± 4,5	15,3 ± 1,6	23,2 ± 4,7	54,1 ± 8,5
6	21	Acker	sL	6,7	0,51 ± 0,08	31,6 ± 3,0	11,2 ± 1,8	10,3 ± 1,6	29,1 ± 4,0	44,1 ± 4,4
7	20	Acker	utL	6,4	0,39 ± 0,10	20,9 ± 5,3	8,34 ± 1,82	8,12 ± 2,52	23,6 ± 4,5	40,8 ± 10,9
8	4	Acker	IS- sL	6,2	0,71 ± 0,04	17,4 ± 1,9	13,6 ± 1,0	4,53 ± 0,79	36,7 ± 4,1	77,3 ± 4,8
9	5	Acker	IS	6,0	0,36 ± 0,09	17,3 ± 2,6	13,2 ± 2,2	4,81 ± 0,48	19,1 ± 2,8	47,1 ± 3,8
10	5	Acker	uL	6,8	0,55 ± 0,31	25,0 ± 3,5	12,4 ± 3,9	13,1 ± 1,1	26,6 ± 0,6	67,3 ± 5,0
11	13	Acker	suL	7,4	1,53 ± 0,07	44,5 ± 5,6	19,8 ± 6,2	21,0 ± 3,5	33,0 ± 2,8	58,2 ± 4,3

± Standardabweichung

¹ Median

Der mit durchschnittlich 0,71 mg Cadmium pro kg Boden zumindest für die Bodenart IS über dem Vorsorgewert für Sandböden von 0,4 mg kg⁻¹ Boden liegende Durchschnittsgehalt der Böden von Betrieb 8 läßt sich mit seiner Lage im industriell verdichteten nördlichen Ruhrgebiet erklären. Hierfür sprechen auch die für diese Bodenart relativ hohen Zinkgehalte von 77,3 mg kg⁻¹ Boden. Die BBODSCHV (1999) sieht für solche Standorte jährliche Gesamthöchstfrachten vor (siehe Tab. 2-3).

Mit Ausnahme des durchschnittlichen Cadmiumgehaltes auf den Böden von Betrieb 11

wurden die Vorsorgewerte lt. BBODSCHV (1999) in keinem Falle erreicht. Die vorliegenden pH-Werte ließen darüber hinaus für keinen Boden eine erhöhte Aufnahme von Schwermetallen in Pflanzen oder eine Verlagerung in das Grundwasser erwarten. Laut ZAUNER ET AL. (1999) liegen die mobilisierbaren Anteile am Gesamtschwermetallgehalt in einem Bereich <10 %.

5.1.1.1.2 Betriebsmittel

Saat- und Pflanzgut

Tab. 5-2 zeigt die gemessenen Schwermetallgehalte im Saat- und Pflanzgut, das auf den Betrieben eingesetzt wurde.

Tab. 5-2: Schwermetallgehalte in Saat- und Pflanzgut

Betrieb	n	Saat-/Pflanzgut	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Landhdl.	41	Getreidesaatgut (gebeizt)	0,04 ± 0,03	0,10 ± 0,06	2,93 ± 0,87	0,26 ± 0,18	0,10 ± 0,08	18,5 ± 3,8
	5 ¹	Grassamen Deutsches Weidelgras	0,04 ± 0,01	1,47 ± 0,29	3,83 ± 0,25	1,37 ± 0,11	1,35 ± 0,22	33,0 ± 0,5
	15	Containerjungpflanzen (Blumenkohl, Sellerie, Salat)	0,31 ± 0,04	3,30 ± 0,91	12,03 ± 1,64	2,82 ± 0,88	14,13 ± 4,87	28,3 ± 6,9
	2	Maissaatgut (gebeizt)	0,01 ± 0,00	0,16 ± 0,06	3,29 ± 2,00	0,32 ± 0,28	0,19 ± 0,15	20,7 ± 3,4
	8	Ölsaaten	0,13 ± 0,08	0,77 ± 0,52	3,75 ± 1,99	0,96 ± 0,60	0,21 ± 0,20	38,5 ± 7,8
	3	Pflanzkartoffeln (ungebeizt)	0,16 ± 0,04	1,06 ± 0,49	5,56 ± 0,43	0,68 ± 0,25	0,54 ± 0,08	14,0 ± 2,9
	2	Rübensaatgut, pilliert	0,20 ± 0,02	14,3 ± 1,9	44,6 ± 24,7	6,34 ± 1,63	4,94 ± 1,12	29,6 ± 0,6

± Standardabweichung ¹ hierin sind auch die in Tab. 5-10 zugrundeliegenden Proben enthalten

Die Gehalte unterschieden sich im gebeizten Getreidesaatgut incl. Mais kaum von denen im geernteten Korn (vgl. Tab. 5-10). Grassamen wurde nur als Ernteprodukt beprobt. Da auch zertifiziertes Grassamensaatgut ungebeizt ausgesät wird, sind die Analysenwerte von den genommenen Grassamenproben zusätzlich unter Saatgut aufgeführt. Die artspezifischen Gehaltsunterschiede werden bei den Gehalten in pflanzlichen Erzeugnissen erläutert.

Höhere Gehalte der Containerjungpflanzen resultierten aus den Gehalten des verwendeten Pflanzsubstrates. Hauptmischungskomponenten dieser Substrate sind Sand, Komposterden/Torf und ein kohlenaurer Kalk zur pH-Wert-Einstellung. Im Vergleich zu gemessenen Gehalten sandiger Böden lag keine stärkere Belastung des Pflanzsubstrates vor.

Mineraldünger

Die Tabellen 5-3 bis 5-6 zeigen die Schwermetallgehalte von Mineraldüngern. Neben diesen enthalten die Tabellen auch Literaturwerte, die für die weitere Bilanzkalkulation vorzugsweise verwendet wurden. Diese sind mit Ψ und einem Index für die Quelle gekennzeichnet. Dies geschah bei den Hauptnährstoffdüngern immer dann, wenn $n \leq 3$ war. Im Falle des Carbokalkes waren sowohl der Stichprobenumfang der eigenen Erhebungen als auch die der Literaturwerte so gering, daß aus den eigenen Werten und verschiedenen Literaturwerten neue Werte gemittelt wurden. Diese wurden für die weitere Bilanzierung mit einem mittleren Fehler von 20 % als Berechnungsgrundlage angenommen (siehe Kap. 4-9).

Tab. 5-3: Schwermetallgehalte von mineralischen Einnährstoffdüngern

Type	n	Dünger	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
					Cu	Ni	Pb	Zn
N	2	AHL	> 0,01	0,98 ± 0,74	1,69 ± 1,86	5,51 ± 3,55	1,50 ± 1,55	n.n.
		AHL ¹ Ψ	0,03	1,3	6,3	0,3	0,2	2,3
	1	Ammonsulfatsalpeter	n.n.	0,29	0,29	0,50	1,13	0,58
	6	Harnstoff, gepelrt	> 0,01	0,21 ± 0,02	0,14 ± 0,11	0,21 ± 0,07	0,04 ± 0,04	0,95 ± 1,22
	16	KAS	0,19 ± 0,133	2,99 ± 1,28	4,77 ± 5,83	2,16 ± 1,50	17,6 ± 15,5	31,0 ± 22,4
		Kalkstickstoff ² Ψ	<0,1	10,6	9,4	23,4	27,0	12,5
	1	Kalkstickstoff	<0,1	7,07	11,4	25,1	0,63	n.n.
P	1	Superphosphat	12,8	54,9	21,2	21,3	2,89	264
		Superphosphat ¹ Ψ	10,8	114	17,2	28,8	18,5	236
	5	Teilaufgeschlossenes Rohphosphat	6,55 ± 3,62	21,1 ± 15,2	40,3 ± 10,2	20,6 ± 14,1	6,05 ± 7,86	269 ± 28
	1	Thomasphosphat	3,1	990	26,5	8,79	12,9	229
		Triplephosphat ¹ Ψ	26,8	288	27,3	36,3	12,0	489
K	11	40er Kali	0,13 ± 0,21	8,05 ± 8,84	3,33 ± 2,30	1,57 ± 0,56	0,37 ± 0,34	2,55 ± 4,39
	3	Patentkali	0,08 ± 0,06	14,4 ± 14,1	2,74 ± 0,35	0,09 ± 0,04	0,25 ± 0,21	0,76 ± 0,38
		Patentkali	0,11	5,2	3,6	4,1	2,5	17,4

± Standardabweichung ¹Ψ LABO (2000) ²Ψ KERSCHBERGER ET AL. (2001)

Wie bei BOYSEN (1992) und SEVERIN ET AL (1991) beschrieben, waren die Schwermetallgehalte in **Stickstoffdüngern** gering. Die höchsten Schwermetallkonzentrationen bei den N-Düngern wurden bei Kalkammonsalpeter und Kalkstickstoff festgestellt. Kalkstickstoff wies auch lt. einer einzelnen eigenen Messung in dieser Gruppe die höchsten Chromgehalte auf. Auffällig waren dagegen die viel geringeren Gehalte an Blei und Zink in der eigenen Kalkstickstoffprobe. Dem entsprechenden Literaturwert ist kein Streuungsmaß zu entnehmen. Trotz relativ hohem Stichprobenumfang bei den

Kalkammonsalpeterproben fallen hier für alle Elemente, besonders aber für Kupfer, Blei, Zink und Cadmium relativ hohe Standardabweichungen auf. LBP (1997) schloß von hohen Gehaltsschwankungen bei Kalkammonsalpeter auf die Verarbeitungen von Chilesalpeter, der höhere Schwermetallgehalte, insbesondere an Cadmium, enthalten kann. Nach SCHILLING ET AL. (1989) werden für die Herstellung von Kalkammonsalpeter mehr oder weniger verunreinigtes CaCO_3 verwendet.

Auf- oder teilaufgeschlossene **P-Dünger** wiesen, wie auch bei BOYSEN (1992) und LBP (1997) beschrieben, höhere Cadmium- und Zinkgehalte auf, P-Dünger aus der Eisenverhüttung (Thomasphosphat) enthielt dagegen höhere Konzentrationen an Chrom.

Die **Kaliumdünger** wiesen unabhängig von ihrer Bindungsform ähnliche Schwermetallgehalte auf, die als niedrig anzusprechen sind. Die festgestellten Standardabweichungen sind allerdings sehr hoch und übersteigen nicht selten den Mittelwert, wie die Chromgehalte bei 40er Kali.

Neben Einnährstoffdüngern wurden auf den Betrieben auch **Mehrnährstoffdünger** eingesetzt, über deren Schwermetallgehalte Tab. 5-4 Auskunft gibt.

Tab. 5-4: Schwermetallgehalte von mineralischen Mehrnährstoffdüngern

Type	n	Dünger	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
mg kg ⁻¹ TM								
NP	3	Diammonphosphat 18/46	0,34 ± 0,49	8,76 ± 10,57	12,2 ± 6,3	3,22 ± 0,87	0,86 ± 0,85	14,2 ± 15,1
		Diammonphosphat 18/46 ² Ψ	8,2	91	5,2	16,0	1,3	57,0
NPK	1	14/17/17/2+ Bor	0,63	12,7	10,6	0,86	0,34	103
	5	14/10/20+3,5 S	1,35 ± 0,51	13,9 ± 4,9	7,25 ± 0,71	2,26 ± 0,57	3,01 ± 0,37	23,6 ± 4,6
	2	12/12/17+2 Bor	0,02 ± 0,02	3,19 ± 1,41	5,44 ± 0,41	1,24 ± 0,30	0,60 ± 0,35	100 ± 12
		15/15/15 u. a. Volldünger ¹ Ψ	3,78	45,8	11,3	10,9	14,8	116

± Standardabweichung ¹Ψ LABO (2000)

²Ψ KERSCHBERGER ET AL. (2001)

Im Vergleich zur Literatur fällt auf, daß besonders die Cadmium- und Chromgehalte aller untersuchten Mehrnährstoffdünger erheblich unter denen der Literaturwerte lagen. Hier ist anzunehmen, daß von dem/den Hersteller/n sehr gering mit Cadmium und Chrom belastete Rohphosphate eingesetzt wurden. Bereits 1985 stellte die deutsche Düngemittelindustrie in Aussicht, nur noch Rohphosphate mit einem Cadmiumgehalt <90 mg kg⁻¹ in der Düngemittelherstellung zu verwenden (TROTT, 2003). Durch die Cadmiumeliminierung bei der Düngemittelherstellung ist mit einem weiteren Rückgang der Gehalte zu rechnen (LBP, (1997)).

Die Zinkgehalte in den untersuchten Mehrnährstoffdüngern lagen unter denen der eingangs gezeigten Werte. Besonders auffällig war in dieser Hinsicht Diammonphosphat mit durchschnittlich 14,2 mg Zink bei allerdings hoher Standardabweichung und 14/10/20 + 3,5 S mit durchschnittlich 23,6 mg Zink pro kg. Aufgrund der relativ geringen Stichprobenumfänge wurde bei der Bilanzierung der pflanzlichen Produktion aber mit Literaturwerten gerechnet.

In Zukunft sollten die **Schwermetallgehalte von Phosphordüngern weiterhin kontrolliert werden** und positive Entwicklungen in Bezug auf verwendete Kalkulationsgrößen für die Berechnung von Schwermetalleinträgen berücksichtigt werden.

Über die Schwermetallgehalte in der Gruppe der **Kalk- und Magnesiumdünger** informiert Tab. 5-5. Die ermittelten Gehalte in der einzelnen Probe Bittersalz wichen z.T. von den in der Literatur genannten Mittelwerten ab. Da letztere allerdings nicht mit einem Streuungsmaß belegt waren, läßt sich keine Aussage über die Vergleichbarkeit der eigenen Analysedaten machen.

Anders ist dies für die Proben des Branntkalkes, dessen festgestellte arithmetische Mittelwerte für die Elemente Cadmium, Chrom und Nickel unterhalb der bei BOYSEN (1992) angegeben Bereiche und für Blei und Zink oberhalb dieser liegen. Dabei streut die Standardabweichung wie bei der von Zink mit >100 % allerdings beachtlich. Dagegen waren die ermittelten Gehalte von Hütten- und Konverterkalk mit denen der Literatur konform (vgl. Tab. 2-6). Die gemessenen Schwermetallgehalte im Carbokalk lagen auch in den Wertebereichen der Literaturdaten von KERSCHBERGER ET AL. (2001). Diese Literaturdaten wurden mit den eigenen Analysedaten, wie eingangs erwähnt, aufgrund der geringen Stichprobenumfänge zusammengefaßt.

Der auf Betrieb 9 verwendete Rückstandskalk aus der Sodagewinnung zeigte mit Ausnahme des Bleigehaltes von 79 mg kg⁻¹ Schwermetallwerte, die mit den Gehalten der anderen hier untersuchten und in der Düngemitteltypenliste eingetragenen Kalkdüngern vergleichbar sind. Der ermittelte Bleigehalt bei diesem Produkt besaß auch hier eine hohe Standardabweichung von rund 51,3 mg kg⁻¹. Hinsichtlich des Chromgehaltes, der ebenfalls eine sehr hohe Streuung aufwies, ist dieser Rückstandskalk am ehesten mit Konverterkalk zu vergleichen. Dagegen enthielt der Rückstandskalk aus der Wassergewinnung im Vergleich zu den anderen Kalken für die Elemente Cadmium, Chrom, Nickel und Blei geringere Gehalte. Die Kupfer- und Zinkwerte dieses Produktes waren mit 84,3 mg kg⁻¹ bzw. 134,2 mg kg⁻¹ im Vergleich zu den anderen Kalken und den bei KERSCHBERGER ET AL. (2001) erwähnten Werten für Rückstandskalke als verhältnismäßig hoch anzusprechen.

Tab. 5-5: Schwermetallgehalte von mineralischen Kalk- und Magnesiumdüngern

Type	n	Dünger	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Mg	1	Bittersalz	0,01	0,05	8,98	0,22	n.n.	n.n.
		Bittersalz ¹ Ψ	<0,1	6,9	3,0	<1,0	<1,0	9,5
Ca	4	Brantkalk	0,82 ± 1,13	4,33 ± 2,40	12,3 ± 2,7	2,93 ± 3,15	25,4 ± 15,2	69,3 ± 98,8
	1	Carbokalk	0,64	5,9	25,0	2,86	4,05	53,3
		Carbokalk ² Ψ	0,54 ± 0,08	10,48 ± 5,29	22,3 ± 2,6	2,97 ± 1,63	4,26 ± 0,49	54,3 ± 18,0
	4	Hüttenkalk	0,06 ± 0,04	76,82 ± 2,48	8,08 ± 0,91	12,2 ± 19,5	0,75 ± 0,87	5,13 ± 3,06
	47	Kohlensaurer Mg-Kalk ³ Ψ	0,5	6,9	8,2	4,6	2	58
	5	Konverterkalk	0,02 ± 0,02	1062,2 ± 626,3	12,0 ± 5,8	10,5 ± 11,9	13,1 ± 5,9	14,4 ± 9,1
	4	Rückstandskalk aus der Sodagewinnung	0,32 ± 0,19	484,03 ± 939,31	22,7 ± 4,8	25,2 ± 10,5	79,2 ± 51,2	38,1 ± 26,7
	9	Rückstandskalk aus der Entcarbonisierung	0,59 ± 0,16	18,16 ± 7,76	84,3 ± 8,5	19,0 ± 10,1	27,5 ± 13,6	134 ± 45

± Standardabweichung

¹Ψ KERSCHBERGER ET AL. (2001)²Ψ verrechnet KERSCHBERGER ET AL.(2001) und eigene Werte³Ψ LABO (2000)

Spurenelementdünger kamen nur bei Betrieb 8 zum Einsatz. BOYSEN untersuchte 1992 Kupferdünger mit 5 und 2,7 % Kupfergehalt auf ihre Schwermetallgehalte. Dabei stellte er je nach Herstellungsverfahren erhebliche Unterschiede bei diesen Produkten fest. Da keine Untersuchungen über 45 %-ige Kupferdünger vorliegen, die zudem noch auf einem höheren Stichprobenumfang beruhen, wurde die Ackerschlagbilanz für den Betrieb mit den vorliegenden ermittelten Werten einer Probe (Tab. 5-6) kalkuliert. Da keine Standardabweichung ermittelt werden konnte, läßt sich nicht genau sagen, ob der Kupfergehalt lt. Deklaration eingehalten wurde. Der gemessene Wert liegt aber mit 41 % Kupfergehalt nahe dem deklarierten Wert. Neben Kupfer enthält der verwendete Dünger mit 135 mg kg⁻¹ Zink ebenfalls nennenswerte Anteile dieses Elementes. Als hoch läßt sich der Bleigehalt von fast 109 mg kg⁻¹ bezeichnen. Die bei BOYSEN (1992) ermittelten Bleigehalte lagen sowohl im 2,7 %igen als im 5 %-igem Kupferdünger noch über diesem Wert.

Tab. 5-6: Schwermetallgehalte von mineralischen Spurenelementdüngern

Type	n	Dünger	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cu	1	Kupfersulfat 45 % Cu	1,24	5,29	410.256	6,59	109	136
Mn	1	Mangansulfat	0,78	0,14	31,2	n.n.	n.n.	17,9

± Standardabweichung

Wirtschaftsdünger

Über die ermittelten Schwermetallgehalte der untersuchten Wirtschaftsdüngern aus der Rindviehhaltung geben Tab. 5-43 und 5-44, aus der Schweinehaltung Tabellen 5-54 und 5-55 und aus der Mastputenhaltung Tab. 5-64 in den entsprechenden Kapiteln „Tierische Produktion“ Auskunft.

Zugekaufte organische Düngemittel/Sekundärrohstoffdünger

Neben dem klassischen Sekundärrohstoffdünger Klärschlamm setzte Betrieb 10 ebenfalls auf einem Teil seiner Fläche Putenmist und Hühnertrockenkot ein, weil ihm dort laut Pachtvertrag der Einsatz von Klärschlamm untersagt war. Da keine eigenen Proben vom eingesetzten Hühnertrockenkot untersucht werden konnten und die untersuchten Putenmistproben ausschließlich von einem Betrieb (Nr. 9) stammten, wurden für diese beiden Düngemittel Literaturwerte herangezogen (Ψ).

Tab. 5-7: Schwermetallgehalte in organischen Zukaufsdüngern

Betrieb	n	Dünger	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			
					Cu	Ni	Pb	Zn
10 a	9	Hühnertrockenkot ¹ Ψ	0,21	9,8	45	8,2	2,4	430,1
10 b	6	Klärschlamm	1,15 ± 0,37	28,8 ± 0,95	302 ± 85	15,5 ± 0,7	61,2 ± 16,3	705 ± 194
10 a	34	Putenmist ¹ Ψ	0,5	22,1	150	6,5	2,6	395

± Standardabweichung

¹ Ψ SCHULTHEISS ET AL. (2003)

Der zum Untersuchungszeitpunkt eingesetzte Klärschlamm kann im Vergleich zur den in Tab. 2-9 gezeigten Literaturwerten als für Klärschlamm gering belastet eingestuft werden.

Beregnungswasser

Alle eingesetzten Beregnungswässer stammten aus betriebseigenen Brunnen. Betrieb 1 setzte die Beregnung lediglich im Kartoffelanbau ein. Der intensive Freilandgemüseanbaubetrieb dagegen beregnete sämtliche Kulturen.

Einen Überblick hinsichtlich der Schwermetallkonzentration der verwendeten Brunnenwässer vermittelt Tab. 5-8.

Im Vergleich zu den Werten der TRINKWV (2001) erscheinen die ermittelten Cadmium-, Kupfer- und Zinkgehalte sehr niedrig. Die durchschnittliche Bleikonzentration der Wasserproben von Betrieb 11 lag mit 40 µg l⁻¹ um den Faktor 4 (bei hoher Standardabweichung)

über dem ab 1.12.2003 zulässigen Höchstwert für Trinkwasser in Deutschland.

Tab. 5-8: Schwermetallkonzentration in Beregnungswasser

Betrieb	n	Beregnungswasser	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			$\mu\text{g l}^{-1}$					
1	3	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	60 ± 10
11	4	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	40 ± 50	10 ± 0

± Standardabweichung n.n.: nicht nachweisbar

Pflanzenschutzmittel

Einen Überblick über die vorgenommenen Schwermetalluntersuchungen bei diesen Betriebsmitteln zeigt Tab. 5-9.

Tab. 5-9: Schwermetallkonzentrationen/-gehalte in Pflanzenschutzmitteln

Type	n	Wirkstoff	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			$\text{mg l}^{-1}/\text{mg kg}^{-1}$					
Herbizid	1	Propyzamid (Kerb) ^b	3,22	n.n.	5,47	n.n.	51,2	9,94
Herbizid	1	Paraquat (Gramoxone) ^a	n. a.	n. a.	n. a.	<0,01	n.n.	<0,01
Fungizid	1	Propamocarb-Hydrochlorid (Previcur N) ^a	n. a.	n. a.	n. a.	<0,01	n. a.	n. a.
Fungizid	1	Difenoconazol (Bardos) ^a	n. a.	n. a.	n. a.	<0,01	n. a.	n. a.
Fungizid	1	Metalaxyl-M/Mancozeb (Ridomil) ^b	5,10	1,00	27,8	n.n.	25,6	10.530
Insektizid	1	Parathion/Oxydemeton-methyl (E Kombi) ^a	n. a.	n. a.	n. a.	n.n.	n. a.	n.n.

± Standardabweichung n.n.: nicht nachweisbar n.a.: nicht analysiert

^a flüssige Formulierung ^b feste Formulierung

Pflanzenschutzpräparate wurden lediglich stichprobenhaft untersucht, da die Analyse dieser Stoffe technisch und gesundheitlich problematisch war. Dementsprechend dienten die Untersuchungen einem ersten Screening, infolgedessen dann keine weiteren Nachforschungen unternommen wurden. Bei den durchgeführten Analysen konnten lediglich für das Herbizid Kerb nennenswerte Gehalte an Blei $51,23 \text{ mg kg}^{-1}$ und dem Fungizid Ridomil Konzentrationen von mehr als $10.500 \text{ mg kg}^{-1}$ festgestellt werden. Mancozeb enthält nach Angaben von BERTSCHE (2003) 2,5 % Zink, was einen Gehalt von $16.000 \text{ mg kg}^{-1}$ bedeutet. Bei viermaliger Anwendung im Kartoffelbestand zur Phytophthora-bekämpfung werden damit $128 \text{ g Zink ha}^{-1}$ ausgebracht. Allerdings setzte keiner der Betriebe das Präparat im Kartoffelanbau ein.

5.1.1.1.3 Pflanzliche Erzeugnisse

Einen strukturierten Überblick über die ermittelten Schwermetallgehalte in pflanzlichen Roh-erzeugnissen liefern die Tabellen 5-10 bis 5-14. Dabei wurden in dieser Übersicht nur diejenigen Erzeugnisse gelistet, die die Betriebe als Markterzeugnisse verlassen. Die Schwermetallgehalte derjenigen pflanzlichen Erzeugnisse, die auf den Untersuchungsbetrieben nachfolgend in der Veredelungswirtschaft eingesetzt wurden, sind Tab. 5-37 (wirtschaftseigene Futtermittel, Rinderhaltung), Tab. 5-50 (wirtschaftseigenen Futtermittel Schweinehaltung) und Tabellen 5-38, 5-50 und 5-62 für Stroh) zu entnehmen.

Tab. 5-10 zeigt die Analysenergebnisse von **Getreide einschließlich Mais**. Die Analysen der Wintergerste (Betrieb 6) deckten sich weitgehend mit denen der vorgestellten Literatur. Der ermittelte Chromgehalt von $0,10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ lag allerdings unter der bei KERSCHBERGER ET AL. (2001) konstatierten Spanne von $0,15$ bis $0,45 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$. Der Literatur waren keine Angaben für Schwermetallgehalte in Grassamen (*Lolium perenne*) zu entnehmen. Im Vergleich zu anderen untersuchten Poaceen lag der Nickelgehalt von $1,27 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ hoch.

Vom Hafer, der auf Betrieb 8 erzeugt wurde, konnte nur eine Probe gezogen und analysiert werden. Der Körnermais der Betriebe 7 und 9 wies vergleichsweise sehr geringe Chromgehalte auf. Die Bleigehalte von Körnermais lagen ebenfalls unter den zuvor gezeigten Literaturwerten (vgl. Tab. 2-13).

Die durchschnittlichen Cadmium- und Chromgehalte in allen untersuchten Weizenproben lagen durchschnittlich über den vorgestellten durchschnittlichen Literaturwerten (vgl. Tab. 2-13). Die Cadmiumgehalte der Weizenproben der Betriebe 4, 8 und 9 lagen dabei so weit über der Literaturspanne, daß auch der Bereich der Standardabweichung keine Überschneidung mit den Gehaltsspannen der Literatur aufwies. Die Böden, auf denen diese Weizenpartien erzeugt wurden, sind aufgrund ihres niedrigeren pH-Wertes als die für Cadmium sorptionsschwächsten der untersuchten Ackerböden anzusprechen. (s. Tab. 5-1). Auf zwei dieser drei Standorte (Betriebe 4 und 8) wurde ebenfalls der Weizen mit den höchsten Zinkgehalten erzeugt, was ebenfalls auf eine erhöhte Mobilität dieser beiden Elemente in den Böden dieser Betriebe deutet. Dagegen lagen die Nickel- und Bleigehalte in diesen Weizenproben konträr am unteren Ende der in der Literatur genannten Spannen für Nickel ($0,20$ bis $3,78 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$) und Blei ($0,04$ bis $1,33 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$). Der Bleigehalt des auf Betrieb 6 erzeugten Weizen schwankte mit über 100 % um den Mittelwert. Die Zinkgehalte von Weizen der Betriebe 6 und 10 lagen unterhalb der Literaturwerte mit nur geringen Stan-

Tab. 5-10: Schwermetallgehalte in Getreide einschließlich Körnermais

Betrieb	n	Erzeugnis	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
6	20	Gerste	0,02 ± 0,01	0,10 ± 0,07	4,56 ± 0,61	0,09 ± 0,02	0,15 ± 0,09	23,1 ± 1,1
10	6	Grassamen	0,03 ± 0,01	1,27 ± 0,56	4,14 ± 0,80	1,37 ± 0,10	1,23 ± 0,35	32,3 ± 1,9
8	1	Hafer	0,06	0,63	4,12	0,74	0,34	25,7
7	6	Körnermais	0,02 ± 0,01	0,09 ± 0,05	1,80 ± 0,56	0,19 ± 0,12	0,07 ± 0,03	22,3 ± 4,7
9	4	Körnermais	0,03 ± 0,01	0,15 ± 0,21	1,23 ± 0,18	0,23 ± 0,08	0,10 ± 0,04	21,0 ± 3,3
2	6	Roggen	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,05	10,20 ± 14,57	0,16 ± 0,04	0,19 ± 0,15	22,2 ± 4,0
2	6	Weizen	0,06 ± 0,02	0,04 ± 0,04	3,87 ± 0,54	0,14 ± 0,08	0,11 ± 0,06	24,8 ± 14,9
4	9	Weizen	0,12 ± 0,02	1,50 ± 1,66	3,11 ± 0,86	0,29 ± 0,28	0,15 ± 0,06	30,9 ± 6,9
6	48	Weizen	0,09 ± 0,03	0,17 ± 0,28	3,03 ± 0,52	0,22 ± 0,34	0,26 ± 0,34	17,8 ± 5,9
8	9	Weizen	0,16 ± 0,04	0,13 ± 0,08	4,97 ± 1,49	0,27 ± 0,14	0,08 ± 0,05	34,2 ± 2,9
9	9	Weizen	0,19 ± 0,07	0,26 ± 0,14	4,24 ± 0,83	0,27 ± 0,09	0,17 ± 0,07	22,5 ± 2,2
10	14	Weizen	0,06 ± 0,02	0,11 ± 0,08	3,06 ± 0,50	0,23 ± 0,09	0,07 ± 0,06	17,4 ± 2,2
2	6	Triticale	0,05 ± 0,01	0,12 ± 0,06	4,39 ± 0,90	0,15 ± 0,06	0,11 ± 0,05	25,4 ± 2,1
4	5	Triticale	0,12 ± 0,05	0,35 ± 0,18	2,41 ± 1,29	0,21 ± 0,22	0,11 ± 0,09	23,2 ± 14,0
6	20	Triticale	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,05	3,96 ± 0,41	0,06 ± 0,06	0,16 ± 0,51	23,7 ± 3,3
8	6	Triticale	0,13 ± 0,06	0,15 ± 0,05	4,72 ± 0,43	0,33 ± 0,15	0,11 ± 0,03	36,4 ± 6,4
9	37	Triticale	0,06 ± 0,02	0,48 ± 0,73	4,42 ± 0,52	0,23 ± 0,13	0,22 ± 0,29	29,9 ± 5,9

± Standardabweichung

dardabweichungen. Ein sehr ähnliches Bild wie bei den Weizenproben zeichnete sich bei Triticale ab.

Tab. 5-11 gibt Auskunft über die Schwermetallgehalte des von den Betrieben ab Feld oder Hof verkauften **Strohs**.

Mit Ausnahme des Weizenstrohs von Betrieb 8 lagen alle Gehalte der anderen Erzeugnisse auch artübergreifend (Gerste, Weidelgras und Weizen) in recht engen Korridoren. Nach DELSCHEN & WERNER (1989) weist Getreidestroh höhere Bleigehalte als das Korn auf, was auch in den vorliegenden Untersuchungen bestätigt werden konnte. Die Schwermetallgehalte

Tab. 5-11: Schwermetallgehalte in Stroh

Betrieb	n	Stroh von	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
6	8	Gerste	0,07 ± 0,03	0,54 ± 0,25	2,63 ± 0,53	0,56 ± 0,53	0,57 ± 0,29	7,71 ± 3,06
10	6	Grassamen	0,03 ± 0,01	0,47 ± 0,05	2,05 ± 0,29	0,44 ± 0,04	0,78 ± 0,12	19,2 ± 1,6
6	35	Weizen	0,17 ± 0,06	0,49 ± 0,10	2,38 ± 0,43	0,49 ± 0,51	0,58 ± 0,20	6,98 ± 2,44
8	22	Weizen	0,33 ± 0,10	1,01 ± 0,39	4,08 ± 1,02	0,84 ± 0,09	1,26 ± 0,27	20,5 ± 6,3
10	31	Weizen	0,14 ± 0,04	0,78 ± 0,21	1,97 ± 0,64	0,56 ± 0,10	0,80 ± 0,40	6,01 ± 1,84
6	17	Triticale	0,10 ± 0,09	0,49 ± 0,18	1,94 ± 0,45	0,41 ± 0,25	0,58 ± 0,26	7,07 ± 2,62

± Standardabweichung

des Weizenstrohs von Betrieb 8 lagen dagegen bezüglich sämtlicher Elemente über diesen Korridoren. Die Kupfergehalte befanden sich zwar unter den gezeigten Literaturwerten für Weizenstroh, die Cadmium-, Chrom und Bleigehalte lagen aber erheblich darüber. Die für diesen Betrieb zugrundeliegenden Strohproben wurden bei unbeständiger Witterung geborgen. Zudem war das Stroh zum Pressen zuvor mit dem Kreiselschwader gedreht worden. Dies könnte eine Verschmutzung mit Erdanhang verursacht haben, aufgrund dessen sich höhere Schwermetallgehalte erklären lassen. Die höheren Cadmium- und Zinkgehalte decken sich aber auch mit den zuvor beschriebenen höheren Werten in den dazugehörigen Kornproben. Hinzu kommt, daß an diesem Standort infolge der Industrienähe mit einem höheren Depositionsgeschehen zu rechnen ist, so daß wahrscheinlich auch hierdurch eine Kontamination des Getreideaufwuchses stattgefunden hatte.

Tab. 5-12 zeigt die Schwermetallgehalte in **Wurzel- und Knollenfrüchten**. Kartoffeln enthielten, verglichen mit der Literaturstudie von KERSCHBERGER ET AL. (2001), geringere Gehalte an Cadmium und Kupfer, besonders aber an Chrom, Nickel und Blei. Bei den hier gezeigten Ergebnissen wurden die Kartoffeln zuvor gewaschen, so daß der Erdanhang und damit verbundene Kontaminationen nur sehr gering sein dürften. Die genannte Literaturstelle läßt dies offen, so daß hierin eine Erklärung für den genannten Umstand liegen könnte. Auch bei Kartoffeln waren die durchschnittlichen Schwermetallgehalte in den Proben von Betrieb 8 mit Ausnahme von Blei höher als bei Kartoffeln der anderen Betriebe. Für Zuckerrüben galt dies allerdings nicht. Da in der Literatur keine Spannweiten für Schwermetallgehalte in Zuckerrüben angegeben sind, lassen sich die gemessenen Werte nur bedingt einordnen. Die ermittelten Nickelgehalte lagen aber erheblich unter den in Tab. 2-15 gezeigten. Auffällig waren hier auch die hohen Standardabweichungen für Nickel.

Tab. 5-12: Schwermetallgehalte in landwirtschaftlichen Wurzel- und Knollenfrüchten

Betrieb	n	Erzeugnis	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	10	Kartoffeln	0,13 ± 0,12	0,13 ± 0,14	3,83 ± 1,57	0,23 ± 0,16	0,18 ± 0,17	15,3 ± 4,4
2	13	Kartoffeln	0,13 ± 0,08	0,29 ± 0,24	3,88 ± 0,71	0,28 ± 0,30	0,29 ± 0,39	12,5 ± 4,5
4	7	Kartoffeln	0,08 ± 0,04	0,19 ± 0,11	3,35 ± 0,97	0,11 ± 0,12	0,28 ± 0,24	10,7 ± 2,4
8	8	Kartoffeln	0,14 ± 0,02	0,57 ± 0,69	5,66 ± 0,76	0,54 ± 0,55	0,28 ± 0,08	15,5 ± 1,5
1	35	Zuckerrüben	0,17 ± 0,04	0,30 ± 0,33	3,58 ± 0,74	0,27 ± 0,22	0,28 ± 0,32	19,3 ± 9,0
6	47	Zuckerrüben	0,18 ± 0,06	0,42 ± 0,25	3,52 ± 0,60	0,24 ± 0,13	0,35 ± 0,27	11,8 ± 4,6
7	16	Zuckerrüben	0,29 ± 0,11	0,35 ± 0,13	4,28 ± 0,59	0,28 ± 0,26	0,29 ± 0,11	17,4 ± 3,5
8	6	Zuckerrüben	0,20 ± 0,03	0,19 ± 0,03	3,50 ± 0,68	0,20 ± 0,11	0,32 ± 0,02	18,9 ± 4,4
10	58	Zuckerrüben	0,17 ± 0,09	0,30 ± 0,13	2,63 ± 0,49	0,35 ± 0,25	0,28 ± 0,13	11,5 ± 6,4

± Standardabweichung

Über untersuchte Schwermetallgehalte in **Blatt- und Sproßgemüse** unterrichtet Tab. 5-13. Die Gehalte im Blumenkohl entsprachen mit Ausnahme von Kupfer und Nickel denen in der vorgestellten Literatur. Die Kupfer- und Nickelgehalte lagen um den Faktor 4 bzw. 10 unter diesen gezeigten Literaturwerten (vgl. Tab. 2-16). Salatproben wurden während einer längeren Regenperiode genommen. Während durch Niederschläge mit geringen Regenmengen relativ hoch konzentrierte Schadstoffmengen auf den Pflanzen deponiert werden, sind diese Konzentrationen bei stärkeren bzw. langanhaltenderen Regenereignissen verdünnt und werden darüber hinaus durch den Regen von den von den Pflanzenoberflächen abgewaschen (SOMMER, 1987). Nach BERGMANN (1988) gehört Salat zu den hoch Schwermetall akkumulierenden Pflanzen, Blumenkohl und Sellerie zu den niedriger akkumulierenden Pflanzen. Stangensellerie hat im Vergleich zum Salat jedoch eine bedeutend längere Kulturzeit. Nach ERNST & JOOSSE (1983) weisen Pflanzen mit zunehmender Kulturdauer höhere Schadstoffablagerungen auf ihren Oberflächen auf, weil sie länger der Deposition ausgesetzt sind. Dies erklärt, warum die Gehaltsunterschiede zwischen Salat und Sellerie recht gering waren. Stellung und Form der Blätter und Früchte beeinflussen das Ausmaß der Oberflächenkontamination ebenfalls (KAMPE, 1980). Da vom Blumenkohl nur die Blume mit Hüllblättern ohne Strunk und untere Blätter geerntet wurden, erklärt sich der recht deutliche Unterschied zwischen den Schwermetallgehalten des Stangenselleries und denen des Blumenkohls.

Tab. 5-13: Schwermetallgehalte in Blatt- und Sproßgemüse

Betrieb	n	Erzeugnis	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
11	31	Blumenkohl	0,18 ± 0,04	0,16 ± 0,08	4,23 ± 1,85	0,27 ± 0,16	0,11 ± 0,05	27,9 ± 5,0
11	23	Salat	1,06 ± 0,25	2,11 ± 1,27	12,0 ± 1,6	1,70 ± 0,46	1,49 ± 0,70	58,1 ± 8,4
11	15	Knollensellerie	1,03 ± 0,10	0,40 ± 0,23	13,0 ± 1,8	1,05 ± 0,17	0,42 ± 0,20	30,9 ± 2,2
11	18	Stangensellerie	0,74 ± 0,05	1,20 ± 0,38	9,6 ± 1,4	0,92 ± 0,36	1,49 ± 1,23	40,4 ± 4,8

± Standardabweichung

Die Gehalte des untersuchten Knollensellerie überstiegen für alle untersuchten Elemente die gezeigten Literaturwerte. Bei WILCKE UND DÖHLER (1995) werden die Schwermetallgehalte für die verzehrbaren Anteile von Knollensellerie mitgeteilt. Ob dies allerdings heißt, daß der Schalenanteil der Knollen bei der Analyse unberücksichtigt blieb, bleibt offen, ist aber zu vermuten. Von anderen untersuchten Wurzel- und Knollenfrüchten läßt sich Knollensellerie am ehesten mit Zuckerrüben vergleichen. Obwohl Zuckerrüben und Knollensellerie zuvor gewaschen wurden und nur noch ähnliche unvermeidliche Schmutzrückstände in den Riefen des Rüben- bzw. des Knollenkörpers zurückblieben, waren die Gehalte an Cadmium, Nickel, Kupfer und Zink in Knollensellerie bedeutend höher. Wahrscheinlich spiegeln sich hier die höheren Gehalte der Ackerkrume von Betrieb 11 wieder. Ob diese jedoch aus dem Transfer in die Pflanze oder aus dem nicht vermeidbaren Erdanhang resultierte, bleibt offen. Der hohe durchschnittliche pH-Wert der Böden von Betrieb 11 (siehe Tab. 5-1) läßt jedoch nur eine geringe Aufnahme von Cadmium durch die Pflanzen vermuten. Schwermetallgehalte anderer auf Betrieb 11 angebauten aber zur Bilanzierung nicht berücksichtigter Kulturen Chinakohl, Kohlrabi und Spitzkohl sind Anhang G zu entnehmen.

Tab. 5-14 zeigt die gemessenen Schwermetallgehalte in **Grünland- und Klee-gras-aufwüchsen**.

Tab. 5-14: Schwermetallgehalte in Grünland- und Klee-gras-aufwüchsen

Betrieb	n	Aufwuchs	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	5	Gras, Weide	0,11 ± 0,04	0,96 ± 0,14	10,6 ± 1,5	0,98 ± 0,06	0,95 ± 0,16	56,4 ± 17,1
2	5	Gras, Weide	0,10 ± 0,00	0,93 ± 0,19	10,7 ± 1,8	0,98 ± 0,09	0,90 ± 0,06	55,0 ± 23,7
2	6	Klee-gras	0,07 ± 0,02	0,26 ± 0,13	10,3 ± 2,9	0,31 ± 0,21	0,62 ± 0,16	30,8 ± 7,0
3	8	Gras, Weide	0,18 ± 0,08	0,43 ± 0,15	7,6 ± 0,9	1,09 ± 0,21	0,51 ± 0,09	25,5 ± 3,1

± Standardabweichung

Die ermittelten Ergebnisse decken sich dabei weitestgehend mit der Literatur (vgl. Tab. 2-17). Damit verglichen waren allenfalls die geringeren Nickelgehalte im untersuchten Klee gras auffällig. Hierbei handelt es sich allerdings um Ackerfutter. Die Bleigehalte in den untersuchten Aufwüchsen waren ebenfalls gering.

5.1.1.2 *Schwermetalleinträge und –bilanzen für Ackerland*

Im vorliegenden Kapitel werden die Schwermetallumsätze der Betriebe auf den von ihnen bewirtschafteten Ackerflächen differenziert nach Betriebstypen beleuchtet. Da die Düngung innerhalb der pflanzlichen Produktion bei Existenz eines oder mehrerer Betriebszweige tierischer Produktion auch immer von letzterer/n beeinflusst wird, erschien es sinnvoll, eine Abstufung nach dem tierischen Produktionszweig vorzunehmen.

Zur besseren Zuordnung und Vergleichbarkeit der Eintragsquellen werden diese zu Beginn einer jeden „Betriebstypengruppe“ graphisch anteilmäßig dargestellt. Mineraldünger (Kalk und Mineraldünger exkl. Kalk) sind unschattiert gekennzeichnet. Dünger zur N-, P-, K-, Mg-, S- und Spurenelementdüngung (Wirtschaftsdünger und Mineraldünger exkl. Kalk) werden schraffiert dargestellt.

Die aufgeführte Position „Sonstige Betriebsmittel“ beinhaltet Schwermetalleinträge durch Saat-/Pflanzgut und Wasser zur Beregnung.

5.1.1.2.1 Futterbaubetriebe

Abb. 5-1 zeigt die Anteile der Betriebsmittel am bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag auf den Ackerflächen der Futterbaubetriebe **1 (Milchvieh, konventionell, 1,5 GV ha⁻¹), 2 (Milchvieh, biologisch-dynamisch, 0,9 GV ha⁻¹) und 4 (Mastbullen, konventionell, 4,9 GV ha⁻¹)**. Dabei wiesen die konventionell wirtschaftenden Betriebe 1 und 4 ein sehr ähnliches Bild auf. Insbesondere die Verhältnisse der Summen der Mineraldüngeranteile an den elementspezifischen Schwermetalleinträgen waren sehr ähnlich.

Bei allen Betrieben lieferten die eingesetzten Wirtschaftsdünger für fast alle Schwermetalle die höchsten Einträge. Für Kupfer und Zink lag dieser Anteil bei weit über 90 %. Cadmium wurde bei den Betrieben 1 und 2 überwiegend durch Wirtschaftsdünger auf die Ackerflächen aufgetragen. Bei Betrieb 1 resultierten ca. 20 % des Cadmumeintrages, bei Betrieb 4 über 40 % des Cadmumeintrages aus „Mineraldünger exkl. Kalk“. Den geringsten Anteil am

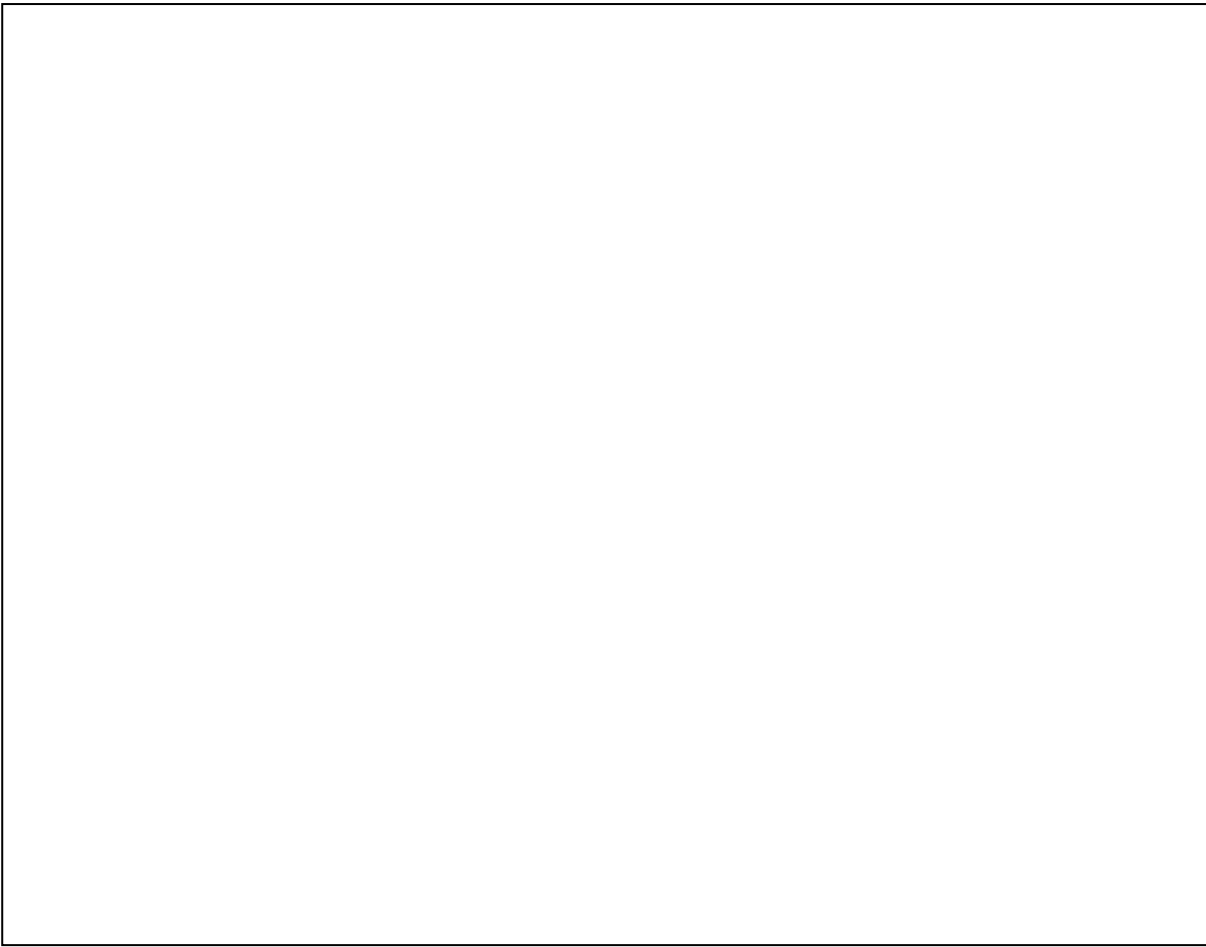


Abb. 5-1: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen der Futterbaubetriebe 1, 2 und 4 [%]

Schwermetalleintrag hatten die Wirtschaftsdünger bei Chrom. Auch dies galt für alle Futterbaubetriebe. Allerdings entstammte bei den Betrieben 1 und 4 immer noch über die Hälfte des Chromeintrages aus den Wirtschaftsdüngern. Bei Betrieb 2 resultierten dagegen ca. 75 % des Chromeintrages auf die Ackerflächen aus der Kalkungsmaßnahme. Bei den konventionellen Betrieben 1 und 4 hatten immer die „Mineraldünger exkl. Kalk“ gegenüber den Kalken die größeren Anteile am Schwermetalleintrag. Durch die Kalkungsmaßnahme bei Betrieb 2 wurden ca. 50 % des Nickelinputs auf die Fläche beigesteuert. Der Bleieintrag resultierte bei allen Betrieben überwiegend aus eingesetzten Wirtschaftsdüngern. Der Eintrag aus der Position „Sonstige Betriebsmittel“ blieb für alle Betriebe und Elemente ohne größere Relevanz für den bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag auf die ackerbaulich genutzten Flächen.

Den gesamten Schwermetallumsatz auf der Ackerfläche des **Betriebes 1** verdeutlicht Tab. 5-15.

Tab. 5-15: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, Marktfruchtbau, 1,5 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	AHL	0,003	0,16	0,8	0,04	0,02	0,3
	Carbokalk	0,27	5,17	11,0	1,46	2,10	26,8
	DAP	0,48	5,29	0,3	0,93	0,08	3,3
	KAS	0,05	0,72	1,2	0,52	4,27	7,5
	Patentkali	0,02	0,98	0,7	0,78	0,47	3,3
Wirtschaftsdünger	Gülle	1,27	13,49	829,9	18,17	11,46	820,0
	Mist	0,33	8,07	43,7	5,00	12,43	122,4
Sonstige Betriebsmittel	Wasser ²	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,3
	Saat-/Pflanzgut	0,04	0,20	1,3	0,15	0,12	3,4
Summe Eintrag		2,46	34,1	889	27,1	31,0	987
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,54	8,57	205	6,55	9,06	216
Pflanzliche Erzeugnisse	Feldgras (Silage)	0,42	3,28	12,4	2,53	2,53	50,8
	Grassamen	0,00	0,11	0,3	0,10	0,10	2,5
	Kartoffeln	0,44	0,46	13,1	0,78	0,61	52,5
	Raygrasstroh	0,04	0,06	7,0	0,13	0,23	7,8
	Silomais	0,58	1,92	24,2	2,82	2,63	110,6
	Zuckerrüben	0,21	0,37	4,5	0,34	0,35	24,2
Summe Austrag		1,69	6,20	61,5	6,70	6,45	248
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,41	2,13	15,6	1,81	1,94	49,5
Saldo		0,77	27,9*	828*	20,4*	24,6*	739*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag) ² zur Beregnung ³ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Gülle stellte für alle Elemente, mit Ausnahme von Blei, das Haupteintragsvolumen dar. An zweiter Stelle folgte Mist, der mit Ausnahme von Cadmium, für alle anderen Schwermetalle die zweit bedeutendste, und für Blei die größte Inputquelle darstellte. Mist trug neben dem Eintrag von Blei besonders stark zum Eintrag von Chrom bei.

Obwohl nur rund 23 kg P₂O₅ ha⁻¹ mineralisch als Diammonphosphat während der gesamten Fruchtfolge ergänzt wurden, bedeutete dies, daß hierüber 0,48 g Cadmium pro Hektar eingetragen wurden. ANONYMUS (1997) stellt fest, daß der Cadmиеintrag auf landwirtschaftliche Nutzflächen von Milchviehbetrieben durch das Einsatzvolumen mineralischer Düngemittel bestimmt sei. Die Ergänzung der Grunddüngung in Futterbaufruchtfolgen mit

Mais, erfolgt wie hier (P-Versorgungsstufe $\leq C$ vorausgesetzt) sinnvoller Weise als NP-Unterfußdüngung für die jungen Maispflanzen. Der Schwermetalleintrag auf Milchviehbetrieben ist nach MOOLENAAR & LEXMOND (1998) schwerer zu beeinflussen als auf Ackerbaubetrieben. Durch das Verwendungsgebot für die Wirtschaftsdünger ist die Auswahlmöglichkeit für ergänzende Mineraldünger limitiert.

Chrom wurde neben den Wirtschaftsdüngern auch noch in nennenswertem Umfang durch Diammonphosphat und Carbokalk zu je gleichen Teilen eingetragen. Aus der Gruppe der Mineraldünger sind außerdem noch Kalkammonsalpeter für den Bleiinput und Carbokalk für den Eintrag an Zink zu erwähnen.

Auffällig war die sehr hohe Kupferapplikation über die Gülle. Wären die Vorsorgewerte der BBODSCHV (1999) erreicht oder überschritten, läge dieser Eintrag weit über der jährlich zulässigen Zufuhr von $360 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auch Zink wurde sehr stark mit der eingesetzten Gülle ($820 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) auf die Ackerflächen von Betrieb 1 eingetragen. Dieser Wert scheint im Vergleich zu Ergebnissen von MÜLLER (1997) sehr hoch, die zwar ein ähnliches Eintragsvolumen für Zink ermittelte, allerdings bei einem Viehbesatz von 2,8 GV pro ha.

Die Gesamtfehler der Einträge der einzelnen Elemente lagen durchschnittlich bei rund 20 %.

Mit Ausnahme von Cadmium konnten bei allen anderen Elementen signifikant höhere Einträge als Austräge festgestellt werden. Nur rund 20 % der Elemente Chrom, Nickel und Blei wurden mit Ernteerzeugnissen wieder von der Ackerfläche abgeführt. Für Zink betrug dieser Anteil immerhin rund 25 %. Die größte Diskrepanz zwischen Eintrag und Austrag klaffte für Kupfer. Hier wurden über die pflanzlichen Erzeugnisse lediglich 7 % des Inputs auch wieder abgefahren. Die beiden größten Austragspositionen stellte dabei der Bereich Ackerfutter. Über den angebauten Silomais verließen die höchsten Mengen an Cadmium, Nickel, Blei und Zink, über Feldgras zur Silagenutzung die mit Abstand höchsten Chromfrachten die Ackerflächen von Betrieb 1. Der zur Saatgutvermehrung erzeugte Grassamen stellte erwartungsgemäß nur einen geringen Anteil zum Schwermetallaustrag aller Elemente dar. In Anbetracht dessen, daß die hier gezeigten Austragssummen Durchschnittswerte über die gesamte Fruchtfolge darstellen, sind sie Untersuchungsergebnissen denen von HORAK ET AL. (1994) sehr ähnlich.

Anders gestaltete sich die Situation bei **Betrieb 2** (Tab. 5-16).

Dieser Betrieb wirtschaftete nach biologisch-dynamischen Richtlinien. Die Kalkung erfolgte nur alle 10 Jahre mit 40 dt Hüttenkalk pro Hektar. Obwohl somit selten gekalkt wurde, verursachte Hüttenkalk mit fast $31 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ den Hauptanteil des Chromeintrages und mit

4,88 g ha⁻¹ a⁻¹ den höchsten Nickeleintrag. Alle anderen Schwermetalle wurden überwiegend durch den eingesetzten Stallmist auf die Ackerflächen eingetragen. Dagegen war der Schwermetallinput über Jauche nur für das Element Blei relevant. Trotz der geringeren Summen der Schwermetalleinträge, war auch hier die Position „Saat- und Pflanzgut“ von un-

Tab. 5-16: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, Marktfruchtbau, biologisch-dynamisch, 0,9 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	Hüttenkalk	0,02	30,76	3,2	4,88	0,30	2,1
Wirtschaftsdünger	Exkremente	0,14	2,06	12,38	1,79	1,59	55,83
	Jauche	0,01	0,16	0,5	0,14	2,07	3,3
	Mist	0,44	8,43	38,5	4,20	5,95	187,0
Sonstige Betriebsmittel	Saat-/Pflanzgut	0,02	0,11	0,7	0,08	0,06	2,4
Summe Eintrag		0,63	41,5	55,3	11,1	9,97	251
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,22	7,74	18,9	6,81	4,90	90,7
Pflanzliche Erzeugnisse	Gerste-Erbсен-Gemenge	0,04	0,36	2,0	0,19	0,19	7,7
	Kartoffeln	0,10	0,22	2,9	0,21	0,21	9,4
	Klee gras	0,38	2,93	39,2	2,21	3,33	134,2
	Roggen	0,01	0,02	4,3	0,07	0,08	39,9
	Roggenstroh	0,03	0,24	1,6	0,35	0,20	6,4
	Triticale	0,01	0,02	0,7	0,02	0,02	3,9
	Triticalestroh	0,01	0,08	0,4	0,06	0,07	1,1
	Weizen	0,04	0,02	2,5	0,09	0,07	16,2
	Weizenstroh	0,06	0,41	1,3	0,33	0,25	3,8
	Summe Austrag		0,68	4,30	54,9	3,53	4,42
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,20	2,02	20,98	1,63	1,78	93,90
Bilanzsaldo		-0,05	37,2*	0,40	7,57	5,55	28,0

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

tergeordneter Bedeutung. Lediglich der Eintrag von Cadmium, der in erster Linie über die Pflanzkartoffeln stattfand, war höher als der über Jauche. Da das Milchvieh die

Kleegrasflächen ab dem zweiten Aufwuchs beweidete, tauchen auf der Eintragsseite der Bilanzierung auch Exkreme auf.

Nach MOOLENAAR & LEXMOND (1998) kommt es auf ökologisch bewirtschafteten Flächen infolge der niedrigeren Erträge zu geringeren Schwermetallausträgen als auf konventionell bewirtschafteten Parzellen. Im Vergleich zu der zuvor gezeigten Situation bei Betrieb 1 (beide Betriebe liegen in räumlicher Nähe) kann diese Aussage bestätigt werden. Dennoch lag kein Eintrag eines Elementes auf die Ackerfläche von Betrieb 2 signifikant über dem Austrag. Berücksichtigt man die von PETERS (1990) angegebenen Austräge über Sickerwasser für Parabraunerden, kommt man zu negativen Salden (\triangleq Austragsüberhängen) von 2,3 g Cadmium $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, 15,6 g Kupfer $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und Zink 60,8 g Zink $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und somit zu rechnerischen Abreicherungen der Elemente Cadmium, Kupfer und Zink im Boden. Auch MOOLENAAR & LEXMOND (1998) bestätigen im Falle der Nichtverwendung mineralischer Phosphordünger und geringerem Wirtschaftsdüngereinsatz eine Cadmiumanreicherung des Bodens, obwohl sie die Einträge durch Deposition mit in ihre Bilanzierung einbezogen. Für einen ökologisch bewirtschafteten Marktfruchtbaubetrieb kalkulieren sie allerdings vergleichbare Cadmiumaufschläge wie beim konventionell geführten Ackerbaubetrieb. Dabei resultierte der bewirtschaftungsbedingte Cadmiumeintrag auf die Flächen des ökologisch wirtschaften Betriebes hauptsächlich aus Kompost.

Die höchsten Schwermetallentzüge resultierten bei Betrieb 2 aus dem zur Silierung geräumten bzw. beweideten Kleegras, gefolgt vom Getreide. Hier fiel die Korn/Stroh-Relation der Schwermetallfrachten für Chrom auf: Der Austrag über Weizenstroh war doppelt so hoch wie der über Roggenstroh. Der Schwermetallaustrag über die dikotylen Pflanzen, incl. der Mischkulturen „Gerste-Erbse-Gemenge“ und „Kleegras“ war in der hier aufgezeigten Rotation bedeutend höher als über die monokotylen Gramineen.

Tab. 5-17 zeigt die Schwermetallbilanz der Ackerflächen des **Mastbullenbetriebes 4**. Aus der Gruppe der Mineraldünger waren hier lediglich Diammonphosphat für seine Anteile am Cadmium- und Chromeintrag, sowie Kalkammonsalpeter und Rückstandskalk für den Bleieintrag auf die Ackerflächen dieses Betriebes zu erwähnen. Die größten Anteile des Schwermetalleintrages wurden bei allen Elementen durch den Wirtschaftsdünger Gülle gestellt (vgl. Abb. 5-1). Sonstige Betriebsmittel blieben auch hier für die Eintragungssituation ohne große Bedeutung.

Für alle Elemente ergaben sich signifikant höhere Ein- als Austräge. Nach SEVERIN (1999) liegen die Cadmiumsalden infolge höherer Auswaschungen auf leichteren Standorten

niedriger als auf schwereren. Da der Austrag über Sickerwasser eine unerwünschte und möglichst zu vermeidende Größe darstellt, wurde diese Austragsgröße hier nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieses Austragspfades wäre lediglich im Falle der Spurenelemente Kupfer und Zink sinnvoll, da es im Falle einer fortdauernden Abreicherung dieser Elemente im Boden zu Mangelerscheinungen der Pflanzenbestände kommt. Für die Elemente Chrom und Blei ist der Austrag über das Sickerwasser indes nur von untergeordneter Bedeutung. Besonders auf leichten Standorten kommt es bei einer Erhöhung der Cadmiumbodgehalte wesentlich schneller zu erhöhten Gehalten im Weizenkorn (SEVERIN, 1999). Nach KÖSTER & MERKEL (1985) beträgt die akzeptable Cadmiumanreicherung auf sandigen Böden max. $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden.

Tab. 5-17: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 4 (Bullenmast, Marktfruchtbau, konventionell, 4,9 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	40er Kali	0,01	0,49	0,2	0,10	0,02	0,2
	DAP	0,92	10,25	0,6	1,80	0,15	6,4
	Harnstoff	0,00	0,02	0,0	0,02	0,00	0,1
	KAS	0,04	0,58	0,9	0,42	3,42	6,0
	Patentkali	0,01	0,32	0,2	0,25	0,15	1,1
	Rückstandskalk	0,06	1,77	8,2	1,85	2,68	13,1
Wirtschaftsdünger	Gülle	1,03	11,38	181,1	26,54	12,68	923,4
Sonstige Betriebsmittel	Saat-/Pflanzgut	0,03	0,16	1,04	0,12	0,09	3,55
Summe Eintrag		2,10	25,0	192	31,1	19,2	954
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,33	4,19	20,2	3,78	2,66	100
Pflanzliche Erzeugnisse	CCM	0,02	0,13	2,1	0,35	0,21	20,5
	Kartoffeln	0,20	0,47	8,3	0,27	0,69	26,4
	Silomais	0,82	1,96	20,7	1,15	2,89	122,1
	Triticale	0,08	0,24	1,7	0,15	0,08	16,3
	Weizen	0,09	1,11	2,3	0,22	0,11	22,9
Summe Austrag		1,21	3,91	35,1	2,14	3,98	208
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,25	1,00	5,90	0,82	0,91	33,1
Bilanzsaldo		0,89*	21,1*	157*	29,0*	15,2*	746*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

Den Hauptaustragspfad für alle Schwermetalle stellte der zur Silierung abgefahrene Mais dar. Mit Ausnahme von Nickel erreichten die geernteten Kartoffeln die höchste Abfuhr an den anderen Schwermetallen. Der Austrag über die Erzeugnisse blieb vergleichsweise gering, weil kein Stroh abgefahren wurde. Dies erklärt v.a. die geringe Diskrepanz zu den Austrägen von Betrieb 2.

Betrieb 4 lag ein Viehbesatz von 4,9 GV ha⁻¹ zugrunde - Betrieb 1 dagegen wies nur 1,9 GV ha⁻¹ auf. Dennoch exportierte letzterer, mit Ausnahme von Nickel und Blei, höhere

Schwermetallfrachten auf seine Ackerflächen. Dieser Umstand überrascht und verlangt nach einer genauen Evaluierung der unterschiedlichen tierischen Produktionsverfahren „Milcherzeugung“ und „Bullenmast“ im Kapitel „Tierproduktion“.

5.1.1.2.2 Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung

Abb. 5-2 zeigt die Anteile der Betriebsmittel am bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag auf die Ackerflächen der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe **6 (Ferkelerzeugung, konventionell, 1,3 GV ha⁻¹), 7 (Ferkelerzeugung und Mast im geschlossenem System, konventionell, 1,3 GV ha⁻¹) und 8 (Mast, konventionell, 1,1 GV ha⁻¹)**.



Abb. 5-2: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe 6, 7 und 8 [%]

Bei diesen Betrieben differierte die Schwermetalleintragssituation innerhalb ihrer Gruppe stärker als bei den zuvor gezeigten Futterbaubetrieben. Der Eintrag der Spurenelemente Kupfer und Zink auf die Ackerflächen resultierte bei den Betrieben 6 und 7 zu $\geq 95\%$ aus den eingesetzten Wirtschaftsdüngern. Dies traf bei Betrieb 8 lediglich für Zink zu. Kupfer wurde zum überwiegenden Teil aus „Mineraldünger exkl. Kalk“ auf die ackerbaulich genutzte Produktionsfläche eingetragen.

Der Cadmiuminput resultierte bei den beiden viehstärkeren Ferkelerzeugern 6 und 7

überwiegend aus den eingesetzten Wirtschaftsdüngern. Hingegen entstammten ca. 65 % des Cadmumeintrages bei Betrieb 8 aus dem Einsatz von mineralischen Düngemitteln exkl. Kalk. Chrom wurde bei Betrieb 6 zu annähernd 75 % über die Kalkungsmaßnahme eingetragen, bei Betrieb 8 ging dieser Anteil sogar gegen 100 %. Bei Betrieb 7 wurden dagegen 85 % des auf die Ackerflächen beaufschlagten Chromes durch Wirtschaftsdünger verursacht. Der Nickeleintrag resultierte bei den Betrieben 6 und 7 überwiegend aus Wirtschaftsdüngereinsatz. Das zweitstärkste Eintragsvolumen besaßen für dieses Element die Kalke. Für Betrieb 8 stellten letztgenannte mit rund 55 % sogar den überwiegenden Anteil am Nickeleintrag. Blei wurde lediglich bei Betrieb 6 zu mehr als der Hälfte über Wirtschaftsdünger eingetragen. Bei den Betrieben 7 und 8 erfolgte dies überwiegend aus dem Kalkeinsatz.

Tab. 5-18 gibt Auskunft über die Schwermetallbilanz des **spezialisierten Ferkelerzeugerbetriebes 6**. Kali wurde nicht mineralisch ergänzt, da der Betriebsleiter zu den letzten Bodenuntersuchungen keine K-Verarmung trotz zurückgefahrter Mineraldüngung feststellen konnte.

Von den Mineraldüngern trugen Hüttenkalk zu nennenswerten Chrom- und Nickeleinträgen sowie Kalkammonsalpeter zum Bleieintrag bei. Alle anderen Einträge an Schwermetallen (Cadmium, Kupfer und Zink) waren über diese beiden eingesetzten Mineraldünger im Vergleich zu den Einträgen durch Gülle marginal. Die Wirtschaftsdünger stellten auf diesen Betriebsflächen die einzige Phosphordüngung dar. SEVERIN (1999) stellt fest, daß nahezu der gesamte Cadmumeintrag über P-haltige Düngemittel zustande kommt. Allerdings konstatiert er auch, daß dieser am geringsten auf Betrieben mit kombinierter Schweinegülle-/Mineraldüngung ist. Im Gegensatz zum Rindviehbetrieb, wo Kalium der limitierende Faktor für den Wirtschaftsdüngereinsatz darstellt, ist dies bei Schweinebetrieben mit entsprechendem Viehbesatz, hier waren es $1,3 \text{ GV ha}^{-1}$, Phosphat. Der zuvor beschriebene relativ geringe Cadmumeintrag auf diesem Betrieb findet seinen Ausdruck im signifikant negativen Saldo dieses Elementes. Die Chromeinträge waren, wie auch beim Milchviehbetrieb 2, infolge des Einsatzes von Hüttenkalk erhöht. Mit Ausnahme von Cadmium kam es bei allen anderen untersuchten Elementen zu einem signifikanten Eintragsüberhang, der für Kupfer ($519,8 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Zink ($1426,8 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sehr hoch war. Die aufgebrauchten Kupfer- und Zinkfrachten überstiegen die in der BBODSCHV (1999) vorgesehenen Grenzfrachten bei Erreichen der Bodenvorsorgewerte um die Faktoren 1,6 bzw. 1,3. Nach zuvor unternommenen Berechnungen von BIEN (2001) ergibt sich eine Verdoppelung der Boden-

Tab. 5-18: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 6 (Ferkelerzeugung, Marktfruchtbau, 1,3 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	Hüttenkalk	0,03	40,01	4,2	6,35	0,39	2,68
	KAS	0,08	1,33	2,1	0,96	7,81	13,78
Wirtschaftsdünger	Gülle	0,35	10,42	527,4	8,23	8,46	1476,2
	Mist	0,08	0,93	28,8	1,09	0,52	114,5
Sonstige Betriebsmittel	Saatgut	0,004	0,03	0,4	0,04	0,02	1,92
Summe Eintrag		0,54	52,7	563	16,8	17,2	1609
<i>Gesamtfehler Eintrag¹</i>		<i>0,12</i>	<i>6,91</i>	<i>116</i>	<i>8,15</i>	<i>4,13</i>	<i>336</i>
Pflanzliche Erzeugnisse	Gerste	0,02	0,10	4,6	0,09	0,15	23,6
	Gerstenstroh	0,07	0,56	2,7	0,58	0,58	7,9
	Triticale	0,04	0,04	4,2	0,07	0,17	25,3
	Triticalestroh	0,11	0,58	2,3	0,49	0,69	8,4
	Weizen	0,26	0,49	8,7	0,63	0,75	51,2
	Weizenstroh	0,48	1,35	6,5	1,33	1,59	19,1
	Zuckerrüben	0,70	1,65	13,9	0,95	1,38	46,6
Summe Austrag		1,68	4,77	42,9	4,14	5,31	182
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		<i>0,17</i>	<i>0,66</i>	<i>3,1</i>	<i>0,82</i>	<i>0,88</i>	<i>14,6</i>
Bilanzsaldo		-1,14*	47,9*	520*	12,7*	11,9*	1427*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

¹ angenommener mittlerer Fehler für Schwermetallgehalt Stallmist: 20 %

gehalte an Kupfer binnen 100 Jahren und Zink binnen 150 Jahren unter ceteris paribus Bedingungen. Andere Eintragsgrößen, wie Deposition, blieben hierbei unberücksichtigt, so daß sich die tatsächliche Anreicherung zumindest beim nur gering über das Sickerwasser ausgetragenen Kupfer noch schneller vollziehen dürfte.

Über die Schwermetallbilanz auf den Ackerflächen des **Betriebes 7 (Ferkelerzeugung und Mast im geschlossenen System, 1,3 GV ha)** informiert Tab. 5-19. Aus der Gruppe der Mineraldünger (N und Ca) trug Branntkalk zu größeren Anteilen zum Eintrag von Cadmium und besonders Blei bei. Letzteres wurde mit rund 22 g ha⁻¹ a⁻¹ sogar am stärksten durch

Branntkalk eingetragen. Auch für Zink wies dieser Dünger ein Eintragsvolumen von fast $61 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf. Allerdings relativierte sich dieser Eintrag im Vergleich zum Gesamteintrag. Neben der Kalkdüngung war auch die Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter für den Bleieintrag von Bedeutung.

Von den eingesetzten Wirtschaftsdüngern blieb die Jauche für den Schwermetalleintrag auf die Ackerfläche ohne nennenswerten Beitrag. Dagegen war das Eintragungspotential des Mistes

Tab. 5-19: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 7 (Ferkelerzeugung u. Mast im geschlossenen System, Markt., 1,3 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	AHL	0,002	0,13	0,6	0,03	0,02	0,2
	Branntkalk	0,71	3,79	10,7	2,56	22,18	60,6
	KAS	0,09	1,40	2,2	1,01	8,26	14,6
Wirtschaftsdünger	Jauche	0,002	0,08	0,6	0,06	0,05	2,8
	Mist	1,29	26,88	396,0	14,00	7,72	1324,1
Sonstige Betriebsmittel	Saatgut	0,06	0,35	1,9	0,44	0,10	18,0
Summe Eintrag		2,15	32,6	412	18,1	38,3	1420
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,89	10,9	109	7,35	12,3	381
Pflanzliche Erzeugnisse	CCM/KM	0,01	0,03	0,7	0,06	0,02	7,3
	Gerste	0,07	0,18	4,2	0,18	0,26	55,8
	Gerstenstroh	0,14	1,33	7,0	1,01	1,00	15,2
	Hafer	0,02	0,06	0,6	0,11	0,02	4,7
	Raps	0,04	0,23	1,1	0,28	0,06	11,4
	Triticale	0,04	0,03	2,0	0,22	0,05	19,4
	Triticalestroh	0,11	0,41	1,3	0,30	0,32	21,4
	Weizen	0,35	0,26	6,6	0,23	0,38	56,4
	Weizenstroh	0,54	1,27	5,8	1,21	1,07	32,4
	Zuckerrüben	0,89	1,07	13,2	0,87	0,90	53,7
Summe Austrag		2,21	4,87	42,5	4,47	4,08	278
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,27	0,78	6,4	1,03	0,66	44,9
Bilanzsaldo		-0,04	27,7*	370*	13,6*	34,2*	1142*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

Markt.: Marktfruchtbau

von überwiegender Bedeutung für den Eintrag von Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink. Beide Betriebe, (6 und 7), besaßen während des Untersuchungszeitraumes einen Viehbesatz von 1,3 GV ha⁻¹. Dieser führte in beiden Fällen über die Wirtschaftsdünger zu

ähnlichen Kupfer- und Zinkeinträgen auf die bewirtschafteten Flächen. Allerdings lag der Eintrag dieser beiden Elemente bei Betrieb 6 etwas höher als bei Betrieb 7. Dies verwundert nicht, da zuvor schon die höchsten Schwermetallgehalte von Schweinegülle in Ferkelgülle festgestellt wurden (KÜHNEN ET AL., 2002). Betrieb 7 arbeitete mit Festmistsystem. Die Eintragungssituation, die die Gehalte des Mistes beeinflusste, war indes weitestgehend deckungsgleich zum Fließmistsystem bei Betrieb 6, sofern vom verwendeten Stroh bei Betrieb 7 abgesehen wird. (vgl. Tabellen 5-56 und 5-57). Über Mist wurden im Vergleich zum Flüssigmistssystem von Betrieb 6 auch höhere Frachten an Chrom und Nickel auf die Ackerflächen ausgebracht. Ebenfalls wurden auch für diesen Veredelungsbetrieb signifikant positive Salden für Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink ermittelt. Der Eintrag an Cadmium unterschied sich nicht signifikant vom Austrag.

Die summierten Cadmium- und Zinkausträge über die Ernteprodukte lagen bei Betrieb 7 1,3 bzw. 1,5 mal über denen von Betrieb 6. Der Austrag über Zuckerrüben blieb, wie auch bei Betrieb 6, bei allen Schwermetallen hinter den Austrägen über Gerste und Weizen zurück, weil das Rübenblatt nicht geerntet wurde. Bei Getreide wurden Cadmium, Chrom, Nickel und Blei überwiegend mit Stroh abgefahren. Die Spurenelemente Kupfer und Zink wurden überwiegend im Haupternteprodukt gespeichert und somit der Fläche entzogen.

Neben den beiden vorherigen Betrieben zeigt Tab. 5-20 die durchschnittliche Schwermetallschlagbilanz von **Betrieb 8 (Schweinemast, 1,1 GV ha⁻¹)**. Da die Menge des Wirtschaftsdüngers hier nicht ausreichend war, um die Grunddüngung abzuschließen, wurden P- und K-Mineraldünger eingesetzt.

Triplephosphat trug mit 0,83 g ha⁻¹ a⁻¹ hauptsächlich zum Cadmiumeintrag bei. Beachtlich war auch der Chromeintrag durch den ausgebrachten Konverterkalk. Die Verwendung dieses Mineraldüngers stellte auch den bedeutendsten Eintragungspfad für Nickel und Blei dar.

Neben der Düngung von Hauptnährstoffen wurden, kombiniert mit Pflanzenschutzmaßnahmen, auch Applikationen von Spurenelementdüngern vorgenommen. Für den Kupfereintrag war diese Maßnahme entscheidender als der Eintrag durch Gülledüngung. Dennoch wies Betrieb 8 verglichen mit den Betrieben 6 und 7 einen wesentlich geringeren Gesamteintrag an Kupfer und Zink auf.

Die Austräge von den Ackerflächen dieses Betriebes lagen in sehr ähnlichen Größenordnungen wie die von Betrieb 7. Allerdings konnte ein demgegenüber leicht erhöhter Chromaustrag durch die Ernteerzeugnisse ermittelt werden. Es gilt dabei zu bedenken, daß das Ertragspotential an diesem Standort ca. 10 % unter dem der Betriebe 6 und 7 lag wodurch

auch die Schwermetallausträge dieses Standortes unter *ceteris paribus* Bedingungen eher niedriger als höher ausfallen würden. Ob der höhere Chromaustrag in direkter Verbindung zu den hohen Chromeinträgen via Konverterkalk stand, kann nur vermutet werden. ENDER (1986) konnte in Sickerwässern von Sandböden erhöhte Chromgehalte infolge von Düngung mit Thomasphosphat ($91,6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) feststellen, was ein weiteres Indiz für diese Vermutung ist.

Wie auch bei den zuvor gezeigten schweinehaltenden Betrieben waren die Salden für Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink signifikant positiv. Das Cadmiumsaldo war hingegen signifikant negativ.

Tab. 5-20: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 8 (Mastschweine, Marktfruchtbau, 1,1 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	40er Kali	0,02	1,43	0,6	0,28	0,07	0,5
	AHL	0,01	0,48	2,3	0,11	0,07	0,9
	Bittersalz	0,001	0,05	0,02	0,006	0,006	0,06
	Kupferdünger	0,0006	0,002	183,1	0,003	0,05	0,1
	Harnstoff	0,0003	0,02	0,01	0,02	0,004	0,1
	Konverterkalk	0,02	1090,5	12,3	10,80	13,48	14,7
	Mangansulfat	0,002	0,0003	0,1	-	-	0,04
	Patentkali	0,01	0,35	0,2	0,28	0,17	1,2
	Triplephosphat	0,83	8,88	0,8	1,12	0,37	15,1
Wirtschaftsdünger	Gülle	0,33	6,60	115,3	6,70	1,96	594,0
Sonstige Betriebsmittel	Saat-/Pflanzgut	0,02	0,12	0,9	0,09	0,06	3,3
Summe Eintrag		1,24	1108	316	19,4	16,2	630
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,26	316	65,3	7,34	3,65	130
Pflanzliche Erzeugnisse	Hafer	0,05	0,52	3,4	0,61	0,28	21,1
	Kartoffeln	0,17	0,71	7,0	0,67	0,34	19,3
	Triticale	0,28	3,18	10,0	0,69	0,23	77,2
	Weizen	0,40	0,34	11,8	0,65	0,20	85,9
	Weizenstroh	0,74	2,28	9,2	1,90	2,84	46,3
	Zuckerrüben	0,18	0,18	3,2	0,19	0,29	17,5
Summe Austrag		1,82	7,21	44,6	4,71	4,18	267
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,23	0,89	4,90	0,96	0,51	25,7
Bilanzsaldo		-0,58*	1101*	271*	14,7*	12,0*	363*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) - kein Eintrag aufgrund nicht nachweisbarer Gehalte im Betriebsmittel

5.1.1.2.3 Veredelungsbetrieb Putenmast

Die Anteile des Schwermetalleingtrages auf die Ackerflächen des **Veredelungsbetriebes mit Putenmast 9** ($6,8 \text{ GV ha}^{-1}$, nach Mistabgabe $0,8 \text{ GV ha}^{-1}$) zeigt Abb. 5-3. Auch bei diesem Veredelungsbetrieb entstammten, wie bei den schweinehaltenden Betrieben, mehr als 90 % der Kupfer- und Zinkeinträge auf die Flächen dem Wirtschaftdüngereinsatz. Auf diesen entfielen ebenfalls die Hauptanteile des Cadmium- und Chrominputs. Die restlichen Eintragsanteile für diese beiden Schwermetalle waren überwiegend der Kalkung zuzuschreiben, die ebenfalls mit rund 70 % für den Nickeleintrag und zu über 90 % für den Bleieintrag durch Bewirtschaftungsmaßnahmen verantwortlich war. Der Schwermetalleintrag durch sonstige Betriebsmittel war bedeutungslos.

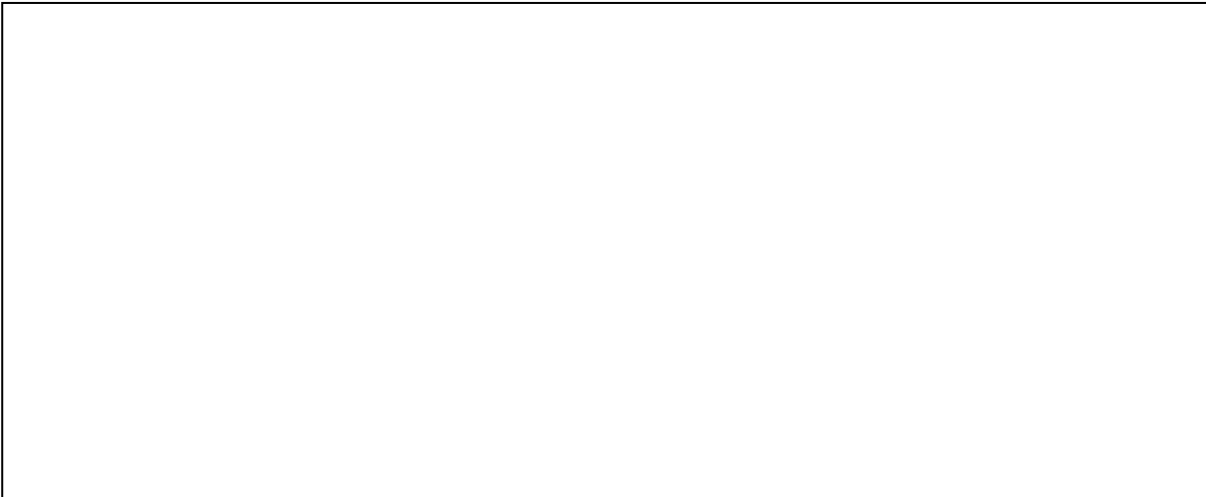


Abb. 5-3: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Veredelungsbetriebes mit Putenmast 9 [%]

Tab. 5-21 zeigt hierzu die Gesamtschlagbilanz dieses Betriebes.

Tab. 5-21: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 9 (Putenmast, Marktfruchtbau, $0,8 \text{ GV ha}^{-1}$)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	40er Kali	0,02	1,46	0,6	0,29	0,07	0,5
	AHL	0,01	0,55	2,7	0,13	0,08	1,0
	DAP	0,22	2,40	0,1	0,42	0,03	1,5
	Rückstandskalk (Sodagewinnung)	0,37	17,78	26,0	28,89	90,82	43,7
Wirtschaftsdünger	Putenmist	1,29	34,10	290,8	11,58	5,79	780,6
Sonstige Betriebsmittel	Saatgut	0,01	0,01	0,3	0,03	0,01	2,1
Summe Eintrag		1,92	56,3	321	41,3	96,8	829
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,46	11,3	68,4	9,35	32,2	185
Pflanzliche Erzeugnisse	Körnermais	0,07	0,36	2,9	0,54	0,23	49,3
	Triticale	0,22	1,76	16,1	0,84	0,80	109,1
	Triticalestroh	0,34	3,41	9,0	1,42	3,26	62,2
	Weizen	0,22	0,30	4,9	0,31	0,19	25,7
	Weizenstroh	0,14	0,73	2,5	0,39	0,60	10,4
Summe Austrag		0,99	6,56	35,4	3,50	5,08	257
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,15	1,31	2,90	0,46	0,83	24,6
Bilanzsaldo		0,93*	49,7*	286*	37,8*	91,7*	572*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)

Die Putenhaltung wurde flächenunabhängig betrieben und von den anfallenden 1100 t Mist lediglich 132 t selber zu Düngezwecken eingesetzt, was einer Reduktion des Besatzes auf 0,8 GV a⁻¹ entsprach. Für die restliche Menge bestanden feste Abnahmeverträge mit anderen Landwirten und einem Lohnunternehmen. Trotzdem wurde die P-Grunddüngung nicht vollständig über den eigenen Wirtschaftsdünger abgewickelt, da der Betriebsleiter nicht auf eine NP-Unterfußdüngung zu Mais verzichten wollte. Zur Kalkung wurde daher ein P-freier Rückstandskalk aus der Sodagewinnung verwendet. Durch diesen und Diammonphosphat wurden zusätzlich zu den 1,29 g Cadmium ha⁻¹ a⁻¹ über Putenmist weitere 0,59 g Cadmium ha⁻¹ a⁻¹ eingetragen. Durch die Verwendung des Rückstandskalkes wurden ferner größere Mengen an Nickel und Blei der Fläche zugeführt. Der eingesetzte Putenmist trug für die

Elemente Cadmium, Chrom, Kupfer und Zink die Hauptfrachten an den genannten Elementen ein.

Alle Einträge an Schwermetallen überstiegen die Austräge signifikant.

Die Austräge lagen auf ähnlichem Niveau wie die der zuvor beschriebenen Veredelungsbetriebe. Dies ist insofern bemerkenswert, als bei den auf diesem Betrieb praktizierten Fruchtfolgen (KM-TR-TR) und (KM-WW) relativ große Mengen an Ernteresten durch das Maisstroh auf dem Acker zurückblieben. Bemerkenswert ist auch, daß der Cadmiumaustrag über Weizenkorn höher lag als über das zugehörige geborgene Stroh. Grund hierfür mag der ausschließliche Anbau von Futterweizen mit sehr geringem Strohanteil sein.

5.1.1.2.4 Marktfruchtbaubetrieb

Betrieb 10 setzte zur Grunddüngung und Humusreproduktion Geflügelmist (Betrieb 10a) oder alternativ Klärschlamm (Betrieb 10b) ein (siehe Abb. 5-4). Die unterschiedliche Düngepraxis ergab sich aus Auflagen in einem Teil der Pachtverträge, in denen der Einsatz von Klärschlamm untersagt war. Der Einsatz der anderen Betriebsmittel (Kalke und andere Mineraldünger) wurde durch den Einsatz des jeweiligen organischen Zukaufsdüngers nicht beeinflusst.

Kupfer und Zink wurden bei beiden Betriebsorganisationen zum überwiegenden Anteil durch die eingesetzten organischen Zukaufsdünger eingetragen. Während bei der Putenmistvariante (Betrieb 10a) über 70 % des Cadmiumeintrages aus dem Einsatz von Mineraldüngern exkl. Kalken resultierten, entstammte dieser bei Betrieb 10b zu fast 50 % aus Klärschlammeinsatz. Dessen Eintragsanteile überwogen bei Betrieb 10 b auch bei den Schwermetallen Chrom ($\geq 60\%$), Nickel (ca. 80 %) und Blei ($\geq 90\%$) die anderen Positionen. Innerhalb der Gruppe der Mineraldünger überwog für Kupfer und Blei der Eintrag durch Kalkung. Bei den anderen Elementen geschah dies durch „Mineraldünger exkl. Kalk“. Sonstige Betriebsmittel spielten für den Schwermetalleintrag auf die Ackerflächen dieses Betriebes keine Rolle.

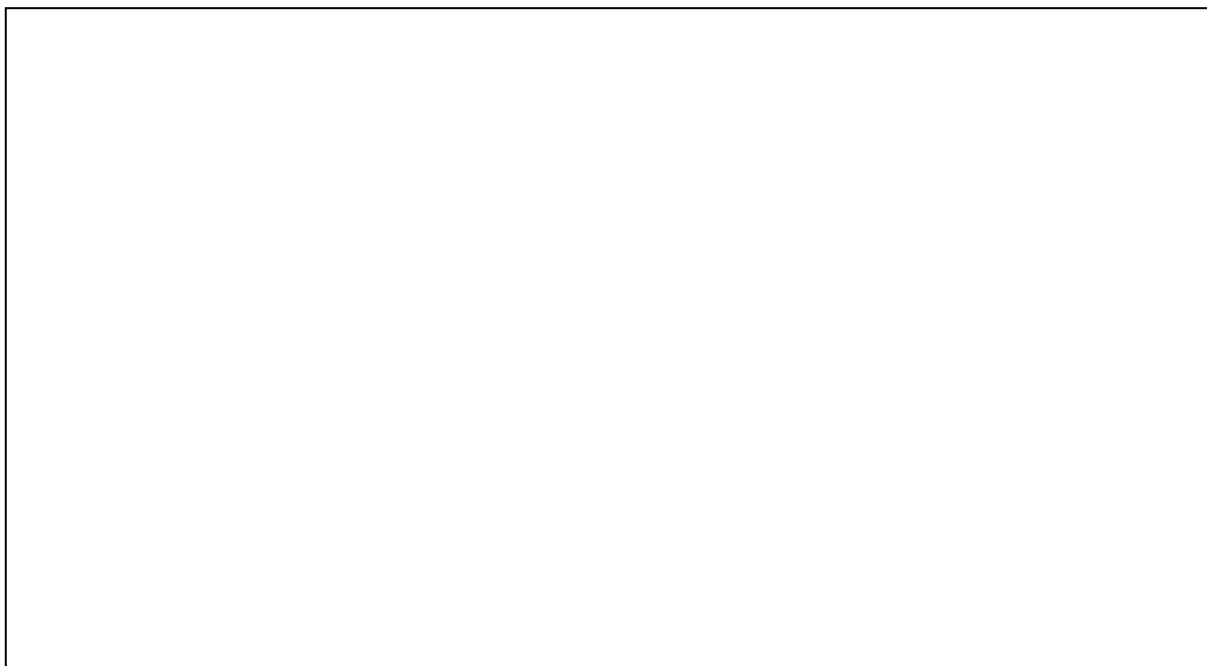


Abb. 5-4: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Marktfruchtbaubetriebes 10 a (Zukauf von Geflügelmist)/10 b (Klärschlammeinsatz) [%]

Nachfolgend beschreibt Tab. 5-22 die Schwermetallumsätze auf den Flächen des Marktfruchtbaubetriebes **10a (Geflügelmistzukauf)**. Der Anteil der zugekauften organischen Dünger Putenmist und Hühnertrockenkot reichte bei diesem Betrieb nicht aus, um die Grunddüngung für die gesamte Rotation abzuschließen. Deshalb wurde zusätzlich Triplephosphat gedüngt. Dieses trug mit mehr als $1 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zum Cadmiuminput und rund $11,1 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zum Chromeintrag bei. Auch durch Carbokalk wurde ein für Cadmium nennenswerter Anteil von ca. $0,5 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf die Ackerflächen eingetragen. Außerdem war dieser mit durchschnittlich 20 % am Eintrag der Elemente Chrom, Nickel und Blei beteiligt. Aus der Gruppe der Mineraldünger ist noch der Bleiinput über Kalkammonsalpeter mit $59 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zu erwähnen.

Putenmist und Hühnertrockenkot wurden zu gleichen Anteilen gestreut. Dabei überstiegen die Cadmium-, Chrom und Kupfereinträge des Putenmistes die durch Hühnertrockenkot um 144 %, 129 % bzw. 339 %. Der Nickel-, Blei- und Zinkinput belief sich auf vergleichbare Größenordnungen. Zusammengefaßt trugen die Geflügeldünger für Kupfer, Nickel und Zink die Hauptanteile für die Schwermetallfrachten auf die Ackerflächen.

Mit Ausnahme von Cadmium konnten die untersuchten Schwermetallfrachten auf die Ackerfläche nicht durch den Austrag über Ernteprodukte ausgeglichen werden, so daß sich für Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink signifikant positive Salden ergaben.

Tab. 5-22: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 10 a (Marktfruchtbau mit Geflügelmist)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	40er Kali	0,04	2,18	0,9	0,43	0,10	0,7
	AHL	0,01	0,28	1,3	0,06	0,04	0,5
	Carbokalk	0,49	9,50	20,2	2,69	3,87	49,3
	KAS	0,06	1,00	1,6	0,72	5,89	10,4
	Triplephosphat	1,03	11,10	1,1	1,40	0,46	18,9
Organische Zukaufsdünger	Hühnermist	0,16	7,43	34,1	6,22	1,82	326,1
	Putenmist	0,39	17,06	115,8	5,02	2,01	304,9
Sonstige Betriebsmittel	Saatgut	0,01	0,04	0,4	0,04	0,02	1,8
Summe Eintrag		2,19	48,6	175	16,6	14,2	713
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,46	10,1	35,8	2,94	3,09	124
Pflanzliche Erzeugnisse	Gerste	0,05	0,10	2,9	0,22	0,07	16,7
	Grassamen	0,01	0,20	0,7	0,22	0,20	5,2
	Grassamenstroh	0,01	0,16	0,7	0,15	0,28	6,7
	Weizen	0,27	0,52	14,7	1,10	0,34	83,0
	Weizenstroh	0,62	3,37	8,5	2,39	3,45	25,9
	Zuckerrüben	0,73	1,29	11,3	1,53	1,21	49,7
Summe Austrag		1,69	5,64	38,8	5,61	5,55	187
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,27	0,66	3,0	0,61	0,73	14,7
Bilanzsaldo		0,48	43,0*	136*	11,0*	8,65*	526*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

Die Austräge über die Ernteerzeugnisse wiesen keine Auffälligkeiten auf und lagen auf ähnlichem Niveau wie die der anderen vorgestellten Betriebe (6 und 7) mit modifizierter Rheinischer Fruchtfolge (Zuckerrüben, 2 x Halmfrucht). Zwar wurde bei Betrieb 10a und 10b das Gerstenstroh nicht abgefahren, infolge der hohen Ernteerträge auf diesem ackerbaulich optimalen Standort wurde dieser Unterschied jedoch.

Tab. 5-23 zeigt auf der folgenden Seite die Schwermetallbilanz auf den Ackerflächen des Betriebes 10b (Klärschlammeinsatz). Diese Flächen unterschieden sich nicht hinsichtlich der auf ihnen erzielten Erträge gegenüber den zuvor beschriebenen Parzellen. Alle Veränderungen am Gesamteintrag sind demnach der Substitution der Geflügeldünger durch Klärschlamm zuzuordnen.

Im Vergleich zur Betriebsorganisation 10a erhöhte sich für Cadmium die Eintragsfracht um mehr als ein Drittel, ähnlich für Chrom und Kupfer. Der Bleieintrag versiebenfachte sich gar, der Nickel- und Zinkinput stieg um etwas mehr als den Faktor 1,5. Demzufolge waren alle Elementsalden auch bei Betrieb 10b signifikant positiv, wobei die Diskrepanz zwischen Eintrag und Austrag für alle Elemente bei Betrieb 10b stärker auseinanderklaffte.

Tab. 5-23: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 10b (Marktfreuchtbau mit Klärschlammeinsatz)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	40er Kali	0,04	2,18	0,9	0,43	0,10	0,7
	AHL	0,01	0,28	1,3	0,06	0,04	0,5
	Carbokalk	0,49	9,50	20,2	2,69	3,87	49,3
	KAS	0,06	1,00	1,6	0,72	5,89	10,4
	Triplephosphat	1,26	13,57	1,3	1,71	0,57	23,0
Organische Zukaufsdünger	Klärschlamm	1,74	43,71	458,2	23,43	92,88	1068,7
Sonstige Betriebsmittel	Saatgut	0,01	0,04	0,4	0,04	0,02	1,8
Summe Eintrag		3,61	70,3	484	29,1	103	1154
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,69	10,5	104	3,66	16,4	241
Pflanzliche Erzeugnisse	Gerste	0,05	0,10	2,9	0,22	0,07	16,7
	Grassamen	0,01	0,20	0,7	0,22	0,20	5,2
	Grassamenstroh	0,01	0,16	0,7	0,15	0,28	6,7
	Weizen	0,27	0,52	14,7	1,10	0,34	83,0
	Weizenstroh	0,62	3,37	8,5	2,39	3,45	25,9
	Zuckerrüben	0,73	1,29	11,3	1,53	1,21	49,7
Summe Austrag		1,69	5,64	38,8	5,61	5,55	187
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,27	0,66	3,00	0,61	0,73	14,7
Bilanzsaldo		1,92*	64,7*	445*	23,5*	97,5*	967*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

5.1.1.2.5 Freilandgemüsebaubetrieb

Da beim Freilandgemüseanbaubetrieb 11 über die Fruchtfolge (incl. der hier nicht gezeigten Austauschflächen) eine ausreichende Humusreproduktion gewährleistet war, verzichtete dieser Betrieb bis dato auf den Einsatz organischer Dünger. Einen Überblick über die Anteile des Schwermetalleintrages auf seine Anbauflächen vermittelt Abb. 5-5. Hier entfielen auf die Mineraldünger exkl. Kalk für die Elemente Cadmium, Chrom, Nickel und Zink die höchsten

Eintragungswerte mit Anteilen mit zwischen ca. 65 % (Zink) und rund 85 % (Cadmium). Den restlichen Schwermetalleintrag bei diesen Elementen teilten sich die Positionen „Kalk“ und „Sonstige Betriebsmittel“ zu ungefähr je der Hälfte. Am Eintrag von Kupfer waren alle drei Positionen „Kalk“, „Mineraldünger exkl. Kalk“ und „Sonstige Betriebsmittel“ zu ca. je einem Drittel beteiligt. Blei wurde zu über 75 % über „Sonstige Betriebsmittel“, hier waren dies Jungpflanzen und Beregnungswasser, auf die Ackerflächen eingetragen.



Abb. 5-5: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Ackerflächen des Freilandgemüsebaubetriebes 11 [%]

Genauere Einblicke in die ermittelte Schwermetallbilanz der Ackerflächen von Betrieb 11 zeigt Tab. 5-24. Neben den in dieser Tabelle gezeigten Kulturen wurden ebenfalls noch andere Kohlarten (Chinakohl, Spitzkohl) und zusätzlicher Salat angebaut. Mit diesen Kulturen wurden häufig Austauschflächen anderer Landwirte als Zweitfrucht bepflanzt. Zum anderen weicht die Kulturführung incl. Düngung bei Kohlrabi nur minimal von der des Blumenkohls ab. Daher wurde bei der Bilanzerstellung von einem vereinfachten Anbauverhältnis von je 1/3 der Kulturen Salat, Blumenkohl und Knollen-/Stangensellerie ausgegangen. Im Vergleich zu den zuvor gezeigten Schwermetallbilanzen fielen höhere Eintragungsvolumina für Cadmium, Chrom und Blei auf. Auch der Eintrag an Nickel lag vergleichsweise hoch, war allerdings niedriger als der Nickeintrag auf Betrieb 9. Für Betrieb 11 muß aber angemerkt werden, daß mit den genannten Einträgen auch schon die Grunddüngung für zwei weitere Fruchtfolgeglieder abgeschlossen war, so daß hier ein direkter Vergleich vage ist. Geht man kalkulatorisch lediglich von einer verbleibenden N-Düngung zu den Marktfrüchten Zuckerrüben und einer Halmfrucht aus, halbieren sich dadurch ungefähr die Einträge an Cadmium, Chrom, Kupfer und Zink pro Jahr. Über die Nickel und Bleieinträge entscheidet dann die N-Düngewahl des Landwirts, der die Parzellen für diesen Anbau übernimmt. Für diesen Zeitraum der Bestellung mit landwirtschaftlichen Ackerkulturen sind keine identischen

Austräge durch Ernteerzeugnisse zu erwarten. Allerdings zeigen die Schlagbilanzen der anderen Betriebe und damit auch unterschiedlicher Fruchtfolgen, daß keine eklatanten Austragsunterschiede bestanden, zumindest nicht in dem Maße, wie es bei den Einträgen der Fall war. Unter der Annahme gleichbleibender Entzüge könnte daher ein Cadmiumsaldo x von $+2 \leq x \leq +2,6$ [$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$], ein Chromsaldo y von $+50 \leq y \leq +60$ [$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$], ein ungefähr ausgeglichenes Kupfersaldo und ein ebenso annähernd ausgeglichenes Zinksaldo für die gesamte Fruchtfolge aus gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Kulturen erwartet werden.

Tab. 5-24: Schlagbilanz, Acker, Betrieb 11 (Freilandgemüseanbau)¹

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	12-12-17(+2)	2,16	26,18	6,5	6,23	8,46	66,3
	13-13-21	2,85	34,53	8,5	8,22	11,16	87,4
	Branntkalk	0,01	2,28	1,3	0,71	0,33	1,9
	Carbokalk	0,49	9,43	20,0	2,67	3,84	48,9
	Kalkstickstoff	0,03	2,95	2,6	6,51	7,51	3,5
	KAS	0,04	0,61	1,0	0,44	3,61	6,4
	Patentkali	0,04	1,99	1,4	1,57	0,96	6,7
	Superphosphat	2,94	31,00	4,7	7,83	5,03	64,2
Sonstige Betriebsmittel	Wasser ²	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	106,60	26,0
	Jungpflanzen	0,56	6,02	21,9	5,14	25,75	51,6
Summe Eintrag		9,12	115	67,9	39,3	173	363
Gesamtfehler Eintrag		3,54	25,1	11,1	9,56	43,2	63,8
Pflanzliche Erzeugnisse	Blumenkohl	0,21	0,19	4,9	0,32	0,13	32,6
	Knollensellerie	1,26	0,49	15,9	1,28	0,51	37,7
	Salat	0,34	0,67	3,8	0,54	0,48	18,5
	Staudensellerie	0,49	0,80	6,4	0,61	0,99	26,9
Summe Austrag		2,30	2,15	31,0	2,75	2,11	116,7
Gesamtfehler Austrag		0,34	0,46	4,80	0,46	0,49	19,7
Bilanzsaldo		6,82*	113*	36,9*	36,6*	171*	247*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag) nach Flächentausch abgeschlossen nachweisbarer Konzentration

¹Grunddüngung (P, K und CaO) für weitere zwei Fruchtfolgeglieder
²Beregnung/Bewässerung
³kein Stofffluß aufgrund nicht

Die Cadmium- und Chromeinträge resultierten hauptsächlich aus den P-haltigen Mineraldüngern (Volldünger, Superphosphat und in geringerem Maße auch Carbokalk). Volldünger und Superphosphat stellten zusammen mit Kalkstickstoff auch den Hauptanteil des Nicleintrages. Dagegen kam der vergleichsweise sehr hohe Bleieintrag überwiegend durch das zur Beregnung eingesetzte Brunnenwasser (~ 107 g Blei ha⁻¹ a⁻¹) zustande. Der Zinkeintrag setzte sich vergleichbar dem Cadmiumeintrag aus den P-haltigen Düngemitteln

zusammen. Das eingesetzte Beregnungswasser trug zu ca. 7 % zum Zinkeintrag auf die Ackerfläche bei.

Für alle Elemente kam es während der Gemüserotation zu einem signifikant positiven Saldo. Gegenüber den zuvor beschriebenen Betriebsflächen trat hier der höchste Cadmiumüberhang beim Eintrag auf. Der Cadmiumaustrag lag allerdings auch höher als bei allen zuvor beschriebenen Betrieben. Die Austräge an den anderen Elementen fielen bei Betrieb 11 allerdings vergleichsweise niedriger aus. Angesichts der relativ geringen Abfuhr an Trockenmasse durch die Ernteerzeugnisse von diesem Gemüsebaubetrieb verwundert diese Tatsache nicht, allerdings verstärkt sich dadurch die Aussage zum ohnehin recht hohen Cadmiumaustrag. Dieser ist wahrscheinlich mit den eingangs in Tab. 5-1 gezeigten hohen Cadmiumbodengehalten in Verbindung zu bringen.

5.1.1.3 Schwermetalleinträge und Bilanzen für Grünland

In gleicher Weise wie bereits zuvor die Schwermetallfüsse auf Ackerflächen gezeigt wurden, erfolgt dies hier ebenfalls für die bewirtschafteten Grünlandflächen der Betriebe **1 (Milchvieh, konventionell, 1,5 GV ha⁻¹), 2 (Milchvieh, biologisch-dynamisch, 0,9GV ha⁻¹) und 3 (Milchvieh konventionell, 1,9 GV ha⁻¹).**

Dabei beruht die Feststellung der Schwermetallströme auf Grünland auf einigen Besonderheiten, die nachfolgend geklärt werden.

Grundsätzliches zur Bilanzierung auf Grünland:

Alle Betriebe fütterten die Weidetiere im Stall bei. Dadurch konnte nur abgeschätzt werden, wie oft sich die Tiere im Außenbereich aufhielten und ihre Exkremete auf den Weideflächen plazierten. Die Betriebsleiter schätzten dazu die Verweildauer der Tiere in den Stallungen.

Die Gehalte in den Exkrementen wurden denen in der Gülle gleichgesetzt. Verfälschungen der realen Schwermetallgehalte in den Exkrementen können durch Verdünnung der Gülle durch andere Abwässer, wie z.B. Spülwasser, aber auch durch eine Erhöhung der Schwermetallgehalte durch Kupferklauenbäder (vgl. Kap. 5.1.2.1.3) und Trockenmasseabbau (vgl. Kap. 5.1.2.2.3) auftreten. Dieser Fehler ließ sich allerdings nicht vermeiden, da eine repräsentative Probenahme von Urin und Kot unter den gegebenen Felderhebungen nicht möglich war. Neben diesem allgemeingültigen Fehler, der aus der Verwendung der Gehalte in der Gülle resultierte, traten noch betriebsindividuelle Probleme auf:

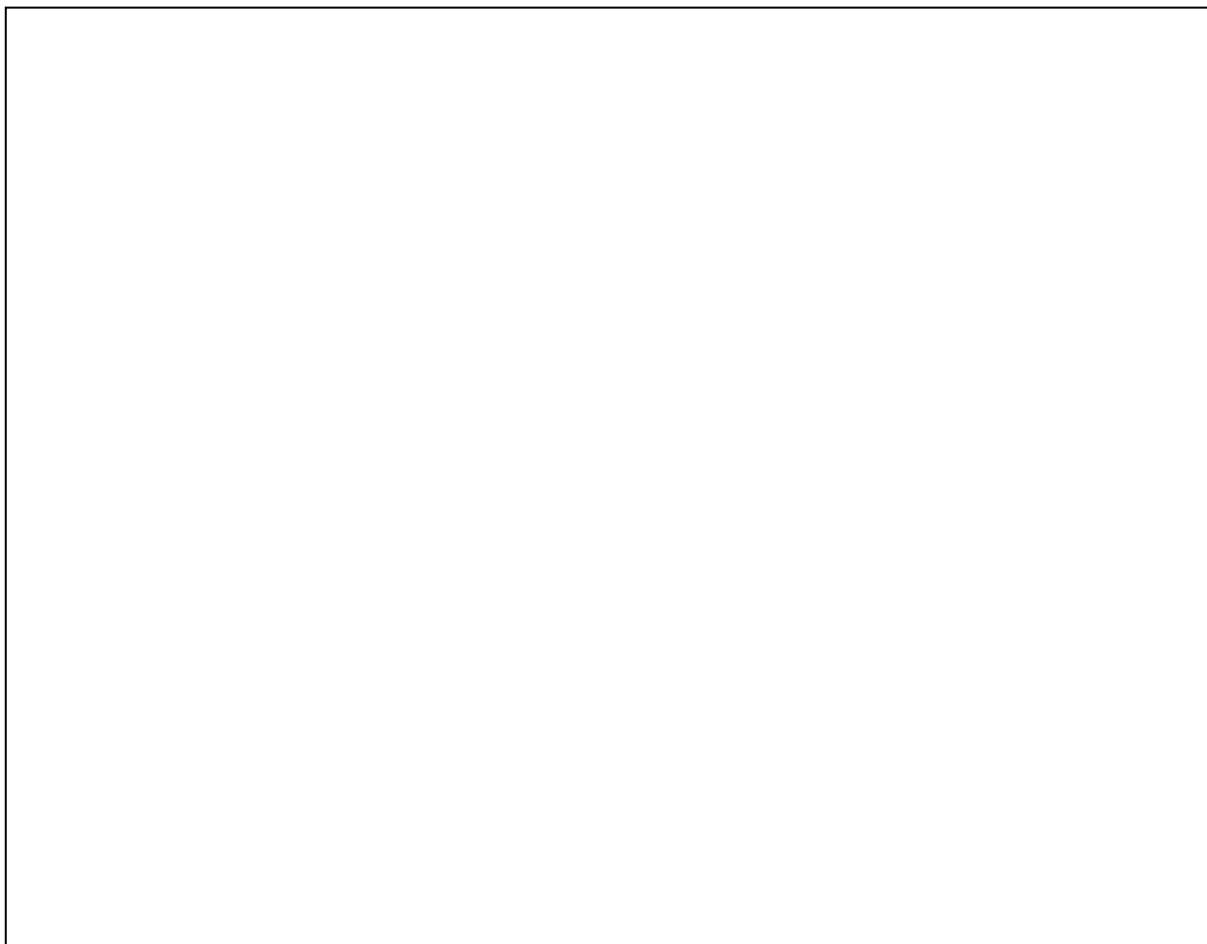
Betrieb 1: Weidegang wurde nur für schwach laktierende und trockene Kühe praktiziert. Deren Gülle wurde aber nicht separat aufgefangen. Zur Abschätzung der Exkrementgehalte wurde demnach die Mischgülle aus allen Stallabteilen herangezogen.

Betrieb 2: Hier fiel kein Flüssigmist an. Deshalb wurden die Gehalte der Gülle von Betrieb 3 zugrunde gelegt. Zwar enthielt auch die Gülle dieses Betriebes erhöhte Kupfergehalte (vgl. Tab. 5-43), beide Betrieb 3 und 2 hatten aber hpts. Weidegang als Futtergrundlage).

Um diese Fehlerquellen angemessen zu bewerten, wurde für die abgelegte Exkrementmenge eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 50 % angenommen, so daß die gezeigten Situationen als abgesicherte Feststellung für die Verhältnisse auf den Betrieben anzusprechen sind.

Abb. 5-6 zeigt die Anteile der Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Grünlandflächen der Futterbaubetriebe 1, 2 und 3.

Abb. 5-6: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag auf die bewirtschafteten Grünlandflächen der



Futterbaubetriebe 1, 2 und 3 [%]

Der biologisch-dynamisch wirtschaftende Milchviehbetrieb 2 setzte außer den anfallenden Wirtschaftsdüngern incl. Exkremente der Weidetiere keine anderen Betriebsmittel zur Grünlandbewirtschaftung ein. Daher umfaßte diese Position für alle Elemente immer 100 %

des Eintrages. Auf eine Kalkung der Flächen verzichtete der Betriebsleiter bislang vollkommen.

Die Spurenelemente Kupfer und Zink wurden bei den konventionell bewirtschafteten Grünlandstandorten, wie auch auf die Ackerflächen der Futterbaubetriebe, fast ausschließlich durch die Wirtschaftsdünger eingetragen. Bei den Betrieben 1 und 3 resultieren die Cadmiumeinträge auf das Grünland zu ≥ 90 % bzw. ≥ 75 % aus Wirtschaftsdüngern incl. Exkrementen. Bei Betrieb 1 wurden weit mehr als 90 % des Chroms durch die Kalkung eingetragen. Dies geschah bei Betrieb 3 zu mehr als $\frac{3}{4}$ durch Wirtschaftsdüngereinsatz und Exkremente. Der Nickeleintrag auf das Grünland erfolgte bei beiden Betrieben (1 und 3) überwiegend aus dieser Position. Dagegen waren Mineral- und Wirtschaftsdünger ungefähr je zur Hälfte an den Bleieinträgen auf das Grünland von Betrieb 1 beteiligt, wobei der größere Anteil aus den „Nicht-Kalken“ stammte. Bei Betrieb 3 war auch für Blei der Wirtschaftsdünger incl. Exkrementen die Haupteintragsquelle.

Über die detaillierte Schwermetallbilanz der Grünlandflächen von **Betrieb 1 (Milchviehhaltung, konventionell, 1,5 GV ha⁻¹)** informiert Tab. 5-25.

Tab. 5-25: Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, konventionell, 1,5 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	KAS	0,11	1,77	2,8	1,28	10,42	18,4
	Konverterkalk	0,01	424,88	4,8	4,21	5,25	5,7
Wirtschaftsdünger	Exkremente	0,15	1,54	94,8	2,07	1,31	93,7
	Gülle	1,34	14,15	870,8	19,07	12,03	860,4
Summe Eintrag		1,61	442	973	26,6	29,0	978
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,35	124	234	7,40	6,50	217
Pflanzliche Erzeugnisse	Silagewerbung	0,78	8,23	37,0	6,59	7,27	204,4
	Beweidung	0,43	3,72	41,1	3,80	3,68	218,5
Summe Austrag		1,21	12,0	78,1	10,4	11,0	423
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,28	2,40	15,2	2,20	2,09	91,3
Bilanzsaldo		0,40	430*	895*	16,2*	18,0*	555*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)

Die Weidetiere konnten auf diesem Betrieb, mit Ausnahme der Melkzeiten, frei zwischen Stall und Weide entscheiden. Zur P- und K-Grunddüngung wurden lediglich die Exkremente der Weidetiere sowie Gülle eingesetzt. Vergleicht man die Schwermetallumsätze der auf Betrieb 1 bewirtschafteten Grünlandflächen mit denen der Ackerflächen dieses Betriebes, stellt man fest, daß die Cadmiumeinträge niedriger, die Einträge der anderen Elemente aber auf ähnlichem Niveau lagen. Lediglich der Eintrag von Chrom mit $442 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ war durch den verwendeten Konverterkalk bedeutend höher als auf den Ackerflächen des Betriebes.

Die Bilanz war nur für Cadmium ausgeglichen, alle anderen Elemente wiesen einen signifikanten Eintragsüberschuß auf.

Der Schwermetallaustrag durch Ernteprodukte des Grünlands lag hier höher als der durch die Nutzung von Ackerfrüchten auf diesem Betrieb. Auffällig ist in diesem Zusammenhang der hohe Austrag an Zink auf diesem Standort. Besonders gilt dies für den Austrag über das Gras zur Beweidung. Der hohe errechnete Austrag kommt in diesem Falle durch den hohen gemessenen Zinkgehalt in den Aufwuchsproben zustande. Diese entstammen überwiegend einem Bereich der Weide, der unregelmäßig von einem kleineren Zufluß der Maas überschwemmt wird. Die in Tab. 5-1 gezeigten Zinkgehalte des Grünlandbodens von Betrieb 1 wiesen ebenfalls erhöhte Zinkgehalte auf. Evtl. liegt hier die Erklärung für die recht hohen Zinkfrachten, die das Grünland verließen. Die anderen Elemente wurden zu jeweils ungefähr $\frac{2}{3}$ durch die Grassilage abgefahren, was auch in etwa dem abgefahrenen Trockenmasseverhältnis (203 t TM Gras für Silage zu 138 t TM für Beweidung) entsprach. Nach der amtlichen Futtermitteluntersuchung enthielten die zugrunde liegenden Silagen weniger als 0,5 % Schmutzanteil. Mit jedem weiteren 0,5 % Schmutz- bzw. Erdanhang wären die Gehalte an den Schwermetallen rechnerisch wie folgt in der Trockenmasse der Silage gestiegen: Cadmium (0,4 %), Chrom (10,9 %), Kupfer (0,2 %), Nickel (8,4 %), Blei (9,5 %) und Zink (0,5 %). Dies zeigt, daß durch erdverschmutztes Gärfutter auf diesem Standort besonders die Chrom-, Blei- und Nickelfrachten von den Grünlandflächen erhöht werden.

Tab. 5-26 gibt Aufschluß über die Schwermetallflüsse auf dem Grünland des biologisch-dynamisch bewirtschafteten **Betriebes 2** (Milchviehhaltung, $0,9 \text{ GV ha}^{-1}$). Die Schwermetalleinträge auf die Grünlandflächen dieses Betriebes lagen bei allen Elementen bedeutend niedriger als die auf die zuvor beschriebenen Flächen von Betrieb 1. Auf Dauer aber wird auch eine Kalkung des Grünlandes zur Ertragssicherung unumgänglich werden. Ungefähr je die Hälfte des Schwermetalleintrages stammte aus den Exkrementen der Weidetiere und dem ausgebrachten Mist. Im Vergleich zu den Ackerflächen dieses Betriebes lagen die

Schwermetalleinträge, mit Ausnahme von Chrom, auf das Grünland höher. Dennoch kam es mit Ausnahme von Cadmium zu signifikanten Eintragsüberhängen. Dies lag an den, gegenüber den konventionell wirtschaftenden Betrieben, geringeren Gesamtentzügen von den Flächen infolge des reduzierten Ertrages. Auffällig war dabei, daß die Austräge über 7 ha Heu z.T. erheblich über denen aus 6 ha Grassilage lagen. Dies traf v.a. für Cadmium zu, galt aber auch - mit Einschränkung von Kupfer - für die anderen Elemente. Ein Grund hierfür dürfte im späteren Zeitpunkt der Heumahd zu sehen sein. Sowohl die zeitlich längere Belastung durch Staubniederschlag als auch die längere Aufnahmemöglichkeit für Schwermetalle aus dem Boden sowie eine evtl. höhere Kontaminationsrate des Heus infolge der häufigeren Bearbeitung sind nicht auszuschließen.

Tab. 5-26: Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, biologisch dynamisch, 0,9 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Wirtschaftsdünger	Exkremente	0,42	6,18	37,08	5,37	4,77	167,30
	Jauche	0,02	0,35	1,2	0,32	4,61	7,4
	Mist	0,40	7,74	35,4	3,85	5,46	171,7
Summe Eintrag		0,84	14,3	73,7	9,54	14,8	346
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,34	6,48	30,4	4,04	8,56	143
Pflanzliche Erzeugnisse	Heuwerbung	0,45	1,66	8,3	1,47	1,26	58,8
	Silagewerbung	0,15	1,26	8,0	1,05	0,97	39,9
	Beweidung	0,12	1,13	12,93	1,19	1,09	66,80
Summe Austrag		0,72	4,05	29,2	3,71	3,32	166
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,21	1,32	8,45	1,27	0,95	57,3
Bilanzsaldo		0,12	10,3*	44,5*	5,83*	11,5*	180*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag)

Tab. 5-27 zeigt die durchschnittliche Schwermetallschlagbilanz des **Grünlandbetriebes 3**.

Tab. 5-27: Schlagbilanz, Grünland, Betrieb 3 (Milchviehhaltung, konventionell, 1,9 GV ha⁻¹)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g ha ⁻¹ a ⁻¹					
Mineraldünger	15-15-15+2	0,36	4,37	1,1	1,04	1,41	11,1
	KAS	0,09	1,44	2,3	1,04	8,47	15,0
	Kohlensauer Mg-Mergel	0,25	3,43	4,1	2,28	0,99	28,8
Wirtschaftsdünger	Exkremente	0,30	4,41	26,4	3,83	3,40	119,3
	Gülle	1,80	26,35	158,1	22,88	20,35	713,4
	Mist	0,11	5,09	11,5	3,47	2,15	73,1
Summe Eintrag		2,91	45,1	204	34,5	36,8	961
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,63	11,4	49,4	8,53	8,74	219,1
Pflanzliche Erzeugnisse	Beweidung	0,45	1,07	18,69	2,70	1,27	63,11
	Silagebergung	1,04	5,94	26,84	5,55	8,38	110,78
Summe Austrag		1,49	7,01	45,5	8,25	9,65	174
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,44	2,33	11,7	2,45	3,81	44,0
Bilanzsaldo		1,42*	38,1*	159*	26,3*	27,2*	787*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)

Die Nutzung des Grünlandes auf diesem Standort war hinsichtlich der Nutzungsintensität vergleichbar zu der von Betrieb 1 in der Niederrheinischen Tiefebene. Dies spiegelte sich auch im absoluten Schwermetallauftrag durch die vorgenommenen Düngemaßnahmen wieder. Gegenüber Betrieb 1 wurde allerdings zur unterstützenden mineralischen Düngung neben Kalkammonsalpeter auch Volldünger eingesetzt. Den überwiegenden Eintragsanteil für alle Schwermetalle wies aber die Gülle auf. Für den Eintrag an Kupfer, Nickel und Zink folgten Exkremente und Mist, welcher den zweithöchsten Chromeintrag verursachte. Trotz der nur geringen Einsatzmenge an Volldünger (durchschnittlich 95 kg ha⁻¹ a⁻¹) trug dieser noch vor den Exkrementen und Mist zum Cadmиеintrag bei. Blei wurde mit rd. 8,5 g ha⁻¹ a⁻¹ durch Kalkammonsalpeter eingetragen.

Die Austräge an den einzelnen Elementen bewegten sich für Chrom, Kupfer, Nickel und Blei zwischen den entsprechenden Austrägen der zuvor gezeigten Grünlandbilanzen. Die Tendenz lag dabei immer näher zu den Einträgen des ebenfalls konventionell bewirtschafteten

Betriebes 1. Lediglich Cadmium wurde über den Aufwuchs bei Betrieb 3 stärker ausgetragen als bei beiden anderen Betrieben 1 und 2. Der Zinkaustrag durch Nutzung lag dagegen mit rd. $174 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf ähnlichem Niveau wie der von Betrieb 2.

Alle Einträge an Schwermetallen überstiegen die Austräge signifikant.

5.1.1.4 Abschließende Beurteilung Pflanzenproduktion

Die zuvor gezeigten und diskutierten Ergebnisse werden in diesem Kapitel hinsichtlich der in der Fragestellung formulierten Untersuchungsaspekte abschließend betrachtet und dargestellt.

Um systematische Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten der Betriebe herauszustellen, wurden nachfolgend horizontale Vergleiche zwischen den Betrieben unternommen.

Die geringsten Unterschiede ergaben sich für den **Schwermetallaustrag durch Ernteprodukte**. Tab. 5-28 gibt hierüber für Ackerland, Tab. 5-29 für Grünland Auskunft.

Tab. 5-28: Schwermetallausträge der untersuchten Ackerflächen durch Ernteprodukte [$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]

SM-Austräge (Acker)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	$\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$					
Mittelwert \pm Stdabw.	$1,60 \pm 0,51$	$5,13 \pm 1,46$	$42,6 \pm 9,3$	$4,32 \pm 1,40$	$4,67 \pm 1,2$	215 ± 49
Median	1,69	5,26	40,65	4,31	4,76	216
Min.	0,68	2,15	31	2,14	2,11	117
Max.	2,3	7,21	61,5	6,70	6,45	278

Die Unterschiede unterlagen dabei keiner Systematik bezogen auf den Betriebstyp und/oder die praktizierte Fruchtfolge. Besonders gering konnte die Amplitude für Kupfer und Zink bezeichnet werden. Im absoluten Vergleich zu den Schwermetalleinträgen unterschieden sich die Austräge durch Ernteprodukte bei den Betrieben nur in geringem Ausmaß. Die differierenden Salden ergaben sich somit hauptsächlich aus den voneinander abweichenden Eintragssituationen, was auch für die Bewirtschaftung des Grünlandes galt.

Tab. 5-29 gibt einen Überblick der Schwermetallausträge durch Ernteprodukte (incl. Beweidung) der Grünlandstandorte.

Tab. 5-29: Schwermetallausträge der untersuchten Grünlandflächen durch Ernteprodukte [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]

SM-Austräge (Grünland)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$					
Mittelwert \pm Stdabw.	1,14 \pm 0,39	7,69 \pm 4,02	50,9 \pm 24,9	7,45 \pm 3,42	7,99 \pm 4,10	254 \pm 146
Median	1,21	7,01	45,5	8,25	9,65	174
Min.	0,72	4,05	29,2	3,71	3,32	166
Max.	1,49	12	78,1	10,4	11	423

Die Austräge durch Ernteerzeugnisse vom Grünland schwankten stärker als die von Ackerflächen. Dies galt besonders für Blei und Nickel. Grund hierfür dürften hauptsächlich erdige Verschmutzung des Rauhfutters sein (siehe 5.1.2.1.3). Für die Austräge der anderen Elemente durch Ernteprodukte ließen sich nur Vermutungen anstellen (siehe ebenfalls Kap. 5.1.2.1.3).

Für den **bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag** auf die untersuchten landwirtschaftlich genutzten Flächen spielte, abgesehen von Einzelfällen, die Düngung die entscheidende Rolle. Tatsächlich kristallisierten sich somit auch zwischen den einzelnen Betriebstypen klare Abgrenzungen hinsichtlich des Schwermetallumsatzes heraus. Die Salden der Schlagbilanzen stellen die Nettoeinträge durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen dar. Diese konnten mit Einträgen aus der Deposition, die überwiegend anderen anthropogenen Quellen (Industrie, Hausbrand und Verkehr) entstammen, verglichen werden.

Tab. 5-30 zeigt die ermittelten **Schwermetallsalden der Ackerflächen** der unterschiedlichen Betriebe. Mit Ausnahme des ökologisch wirtschaftenden Betriebes 2 wurden bei allen Betrieben für die Elemente Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink signifikante Eintragsüberhänge aus bewirtschaftungsbedingten Ein- und Austrägen ermittelt.

Sowohl das Cadmiumsaldo als auch die Kupfer- und Zinküberschüsse auf den Ackerflächen waren maßgeblich von der tierischen Produktion beeinflusst. Grundsätzlich trat in Betrieben, die Wirtschaftsdünger einsetzten, der geringste Cadmiumüberschuß durch Bewirtschaftungsmaßnahmen auf. Die schweinehaltenden Veredelungsbetriebe 6 und 8 erreichten sogar ein rechnerisches Cadmiumdefizit, welches unter ceteris paribus zu einer Cadmiumanreicherung führen würde. Bei den Futterbaubetrieben konnte nur bei Betrieb 4 (Bullenmast, $4,9 \text{ GV ha}^{-1}$) ein signifikanter Eintragsüberhang festgestellt werden, der mit $0,88 \text{ g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bedeutend geringer war, als das Cadmiumsaldo bei ausschließlicher Mineraldüngung im Gemüsebaubetrieb 11 während des Anbaues der Gemüsebaufruchtfolgeglieder mit $6,81 \text{ g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Für

Betrieb 11 muß aber wiederum bemerkt werden, daß mit den genannten Einträgen die Grunddüngung für zwei Fruchtfolgeglieder abgeschlossen war, so daß ein direkter Vergleich mit anderen Düngesystemen schwierig ist. Bei Betrieb 10b (Klärschlammdüngung) war das Saldo auch signifikant positiv. Dort, wo Geflügelmist gedüngt wurde (Betrieb 9, Putenmist und Betrieb 10a, Hühnertrockenkot und Putenmist), stellten sich zwar auch positive Cadmiumsalden heraus, diese lagen aber in beiden Fällen unterhalb des bewirtschaftungsbedingten Saldos bei Klärschlammdüngung.

Tab. 5-30: Salden der Gesamtschlagbilanzen (Ackerflächen)

Betrieb	Betriebstyp	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	Fut. (Milch)/Markt. (1,5 GV ha ⁻¹)	0,77	27,9*	828*	20,4*	24,6*	739*
2	Fut. (Milch)/Markt. (0,9 GV ha ⁻¹) Bioland	-0,05	37,2*	0,40	7,57	5,55	28,0
4	Fut. (Mastbullen)/Markt. (4,9 GV ha ⁻¹)	0,898*	21,1*	157*	29,0*	15,2*	746*
6	Ver. (Ferkelerz.)/Markt. (1,3 GV ha ⁻¹)	-1,13*	47,95*	520*	12,54*	11,9*	1427*
7	Ver. (Ferkelerz. + Smast)/Markt (1,3 GV ha ⁻¹)	-0,04	27,7*	370*	13,6*	34,2*	1142*
8	Ver. (Smast./Markt. (1,1 GV ha ⁻¹)	-0,58*	1101*	271*	14,7*	12,0*	363*
9	Ver. (Pmast./Markt. (0,8 GV ha ⁻¹)	0,93*	49,7*	286*	37,8*	91,7*	572*
10a	Markt./Geflügelmist	0,48	43*	136*	11,0*	8,65*	526*
10b	Markt./Klärschlamm	1,92*	64,7*	445*	23,5*	97,5*	967*
11	Freigem./Mineraldüngung	6,82*	113*	36,9*	36,6*	171*	247*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) Fut.: Futterbau Milch: Milchviehhaltung Markt.: Marktfruchtbau
Ver.- Veredelung Bioland: biologisch dynamische Wirtschaftsweise Ferkelerz.: Ferkelerzeugung
Smast: Schweinemast Pmast: Putenmist Grau unterlegt: Grunddüngung (P, K und CaO) für weitere
zwei Fruchtfolgeglieder nach Flächentausch abgeschlossen

Die Kupferüberschüsse (außer bei Betrieb 2) konnten lediglich der großen Gruppe aller Betriebe, die organische Düngemittel einsetzten, zugeordnet werden. Allerdings konnte innerhalb dieser Gruppe alleine aufgrund der Salden keine weitere systematische Kategorisierung nach Art des eingesetzten organischen Düngers und damit der verbundenen Tierhaltung vorgenommen werden, was aber an betriebsindividuellen Sonderbedingungen lag. Im Bereich der Futterbaubetriebe sei hier auf die hohen Kupferfrachten bei Betrieb 1 durch Kupfervitriol verwiesen (vgl. Tab. 5-46). Auch Betrieb 10b (Klärschlammdüngung) konnte in diese Gruppe eingeordnet werden.

Für die Zinksalden der Betriebe ließen sich dagegen, wie zuvor bei Cadmium, recht klare Grenzen zwischen den unterschiedlichen Betriebstypen, und damit zwischen ihren Düngestrategien ziehen.

Die höchsten Netto-Zinkeinträge durch Bewirtschaftungsmaßnahmen verzeichneten die Ferkelerzeuger 6 und 7. Den zweithöchsten Zinküberschuß verbuchte Betrieb 10 auf seinen mit Klärschlamm gedüngten Anbauflächen (10b). Gefolgt wurde er von den Futterbaubetrieben 1 (Milchvieh, konventionell) und 4 (Mastbullen, konventionell). Letztere lagen mit ca. 740 g Zink ha⁻¹ a⁻¹ gleich auf. Daran schlossen sich die Betriebe 9 und 10a an, die beide Geflügelmist als Grundlage ihrer Düngung einsetzten. Bei diesen beiden Betrieben bewegte sich das Zinksaldo innerhalb eines engen Bereiches.

Den geringsten bewirtschaftungsbedingten Zinküberschuß wies Betrieb 11 auf, der ausschließlich mineralisch düngte.

Tab. 5-31 faßt die Schwermetallsalden an den untersuchten Grünlandstandorten zusammen.

Tab. 5-31: Salden der Schlagbilanzen (Grünland) der untersuchten Betriebe

Betrieb	Betriebstyp	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	Fut. (Milch)/Markt. (1,5 GV ha ⁻¹)	0,40*	430*	895*	16,2*	18,0*	555*
2	Fut. (Milch)/Markt. (0,9 GV ha ⁻¹) Bioland	0,12	10,3*	44,5*	5,83*	11,5*	180*
3	Fut. (Milch) (1,9 GV ha ⁻¹)	1,42*	38,1*	159*	26,3*	27,2*	787*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) Fut.: Futterbau Milch: Milchviehhaltung Markt.: Marktfruchtbau
Bioland: biologisch-dynamische Wirtschaftsweise

Die unterschiedlichen Salden der drei Futterbaubetriebe auf ihren Grünlandflächen spiegelt die unterschiedlichen Düngestrategien wieder vgl. Tab. 5-31, so daß sich hier natürlicher Weise auch keine systematischen Zuordnungen bzw. Gemeinsamkeiten aufzeigen ließen. Auch gegenüber der Bewirtschaftung der Ackerflächen ließen sich dabei keine systematischen Abgrenzungen vornehmen. Es war lediglich festzustellen, daß sich aufgrund verstärkter Gaben an Wirtschaftsdüngern (incl. Exkremete) auf dem Grünland des Biobetriebes 2 auch signifikante Eintragsüberhänge für die Elemente Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink herausstellten.

Vor einer Diskussion über die relative Vorzüglichkeit des einen oder anderen Düngeverfahrens soll an dieser Stelle der **Entwurf der neuen DÜNGEMITTELVERORDNUNG DÜMV (2003)**, die seit 4. Dezember 2003 geltendes Recht ist und v.a. Schwermetallgehalte in

mineralischen Handelsdüngern regelt, gezeigt werden (siehe Tab. 5-32).

Tab. 5-32: Grenzwerte für bestimmte Elemente in Düngemitteln¹, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten oder Pflanzenhilfsmitteln nach Entwurf zur DÜMV (2003)

Element/Material		Kennzeichnung ab... mg/kg TM oder andere angegebene Einheit	Grenzwert ² mg/kg TM oder andere angegebene Einheit
1		2	3
Arsen		20	40
Blei		125	150
Cadmium		1,0	1,5 ³
	Für Düngemittel ≥ 5 % P ₂ O ₅	20 mg/kg P ₂ O ₅	70 mg/kg P ₂ O ₅ für Ausgangsstoffe 50 mg/kg für Düngemittel
Chrom (ges.)		300	
Chrom ^(VI) 4		1,5	2
Nickel		40	80
Quecksilber		0,50	1,0
Thallium		0,5	1,0
Kupfer		-	70
Zink		-	1000

Grau unterlegt: Regelung für Cadmium war lt. Entwurf vorgesehen, wird aber nicht in die Verordnung aufgenommen (EU behält sich eine gemeinschaftliche Regelung vor, mit der für 2005 zu rechnen ist (EMBERG, 2003))

¹ Wirtschaftsdünger, Klärschlämme und Bioabfälle sind ausgenommen

² Feuerraumaschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Rohholz sind von den Grenzwerten nach Spalte 3 ausgenommen, wenn durch deutliche Kennzeichnung auf ihre ausschließliche Rückführung auf forstliche Standorte hingewiesen wird.

³ Für naturbelassene Rinden gilt ein Grenzwert für Cadmium von 2,0 mg/kg TM, wenn durch deutliche Kennzeichnung auf eine Verwendung außerhalb von Flächen hingewiesen wird, die zur Produktion von Lebens- oder Futtermitteln vorgesehen sind.

⁴ Gilt nur für Düngemittel, die aus Verbrennungsprozessen stammen.

⁵ Düngemittel mit Spurennährstoffen des Abschnittes 4 sind von den Vorgaben unter Nr. 9 und 10 ausgenommen.

Nur einer der untersuchten Mineraldünger hätte die zulässigen Gehalte nach der DüMV überschritten, und zwar der Kupfergehalt des auf Betrieb 4 eingesetzten Rückstandskalkes aus der Wasserenthärtung (vgl. Tab. 5-5). Der auf Betrieb 9 eingesetzte Rückstandskalk aus der Sodagewinnung ist nach Inkrafttreten der DüngemVO aufgrund seines Gesamtchromgehaltes kennzeichnungspflichtig. Das gleiche gilt für Konverterkalk.

Nur Betrieb 11 praktizierte innerhalb seiner Fruchtfolge eine ausschließlich mineralische Düngung. Bei einem Düngeniveau von 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ a⁻¹ dürften demnach bei einer Düngestrategie mit ausschließlichem Mineraldüngereinsatz maximal 4 g Cadmium ha⁻¹ a⁻¹ mit eingetragen werden. Dieser Wert wurde aber weit überschritten, da das P-Düngeniveau erheblich höher lag. Auch nach Hinzunahme zwei weiterer Fruchtfolgeglieder ohne zusätzliche P-Grunddüngungsmaßnahme läge dieses noch bei 109 kg P₂O₅ ha⁻¹ a⁻¹.

Die derzeitig diskutierte gemeinsame **Konzeption des BMVEL und BMU „Gute Qualität**

und sichere Erträge“ (BMVEL & BMU, 2002) sieht neue Schwermetallgrenzwerte auch für die organischen Düngemittel Klärschlamm, Bioabfall sowie Schweine- und Rindergülle vor. Dabei werden die Grenzwerte dieser Düngemittel nach Bodenart differenziert. Die vorgesehenen Grenzwerte zeigt Tab. 5-33.

Tab. 5-33: Nach Bodenarten differenzierte Grenzwerte für Schwermetallgehalte von Düngemitteln [mg kg⁻¹ TM] (BMVEL & BMU, 2002)

Düngemittel	Bodenart	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Klärschlamm	Tonböden	1,4	74	80	0,8	60	80	450
	Lehmböden	0,9	45	70	0,5	45	60	390
	Sandböden	0,5	25	50	0,2	25	40	330
Bioabfall	Tonböden	1,6	100	75	1,0	75	105	270
	Lehmböden	1,0	70	45	0,6	50	75	210
	Sandböden	0,4	30	30	0,2	15	45	120
Schweinegülle	Tonböden	1,3	75	90	1,0	60	80	500
	Lehmböden	1,0	50	75	0,6	50	60	450
	Sandböden	0,6	25	60	0,3	20	40	400
Rindergülle	Tonböden	1,2	75	60	0,8	55	75	300
	Lehmböden	0,8	45	50	0,5	40	55	250
	Sandböden	0,4	25	35	0,2	15	35	200

Es ist festzuhalten, daß die Gülle aller untersuchten Schweinebetriebe die angestrebten Grenzwerte für Kupfer und Zink überschritten hätte (vgl. Tab. 5-54). Auch die festgestellten Cadmiumgehalte in der Mischgülle von Betrieb 6 hätten mit 0,49 mg Cadmium kg⁻¹ TM den vorgeschlagenen Grenzwert überschritten, sofern der Betrieb sandige Böden bewirtschaften würde. Die Fütterung der Schweine steht bei ausschließlichem Einsatz zugekaufter Alleinfuttermittel in keinem Zusammenhang mit den Bodeneigenschaften dieses Betriebes. Das Konzept würde de facto bedeuten, daß Tiere, die auf Betrieben leichter Standorte gehalten würden, geringer mit Spurenelementen versorgt werden dürften als Tiere, die auf Betrieben schwererer Standorte gehalten würden. Und dies, obwohl eine Ergänzung der Spurenelementgehalte gerade in Futtermitteln, die auf leichteren und damit sorptionsärmeren Standorten erzeugt werden, aus Sicht der ausreichenden Versorgung der Tiere umso wichtiger ist. Hier sei noch ein Beispiel aufgeführt, das diese Konzeption ad absurdum führt: GfE (1987) und NRC (1998) empfehlen zur Spurenelementversorgung von Schweinen Zinkgehalte von 40-100 mg kg⁻¹ TM im Futter. Bei den Untersuchungen auf den Schweinebetrieben konnte niemals ein Faktor ≤6 für das Verhältnis Zinkgehalt in Gülle zu Zinkgehalt im Alleinfutter beobachtet werden. Bei einem laut Konzeption vorgeschriebenen Höchstwert von 400 mg Zink kg⁻¹TM in der Gülle würde dies theoretisch einen

Maximalgehalt von ca. 55 mg Zink kg⁻¹ TM Alleinfutter bedeuten. Berücksichtigt man native Schwankungen in den Futterausgangsstoffen, ist dies kaum zu erfüllen und entspricht damit auch nicht der tiergerechten Fütterung.

Außerdem wurden in der Gülle der einzelnen Stallabteile geringere Cadmiumgehalte festgestellt als in der Gesamtgülle, was zumindest z.T. auf TM-Verluste infolge von Gärung zurückzuführen war. Alleine diese Tatsache zeigt schon die Unzulänglichkeit des vorliegenden Konzeptes, da sich Schwermetallgehalte in den Wirtschaftsdüngern während der Lagerung erhöhen können, ohne die mit ihrer Ausbringung verbundene Schwermetallfracht zu erhöhen (siehe auch folgende VDLUFA (2002)-Kritik).

Ähnlich wie die Schweinegülle der untersuchten Betriebe wären nach BMVEL & BMU (2002)-Konzept auch die Schwermetallgehalte in der Gülle der Rindviehbetriebe zu beurteilen. Die ermittelten Kupfergehalte in der Rindergülle (Tab. 5-43) hätten den Kupfergrenzwert erreicht bzw. überschritten. Unter Berücksichtigung der Bodenart und der vorgesehenen Zinkgrenzwerte dürfte lediglich Betrieb 3 seine Gülle ausbringen. Die festgestellten Cadmiumgehalte lägen ebenfalls in der Nähe der avisierten Grenzwerte.

Die ermittelten Gehalte für Chrom, Nickel und Blei im Flüssigmist der bilanzierten Schweine und Rindviehbetriebe würden nicht mit den Grenzwerten nach BMVEL & BMU (2002)-Konzept kollidieren.

Festmist bleibt in dieser Konzeption aus unerklärlichen Gründen vollkommen unberücksichtigt. Weitere Kritikpunkte an dieser Konzeption wurden Seitens des VDLUFA in einer Stellungnahme präzisiert (VDLUFA, 2002). Kernpunkte der Kritik sind u. a.:

Wertstoffanteile der Düngemittel bleiben unberücksichtigt

Zur Abschätzung von möglichen Belastungen der Böden sind Schwermetallfrachten wesentlich besser geeignet als Schwermetallgehalte in Düngemitteln.

Wichtige Erfordernisse der betriebsinternen Stoffkreisläufe von Wirtschaftsdüngern, im besonderen die Erfordernisse der Tierernährung (Mindestgehalte von Kupfer und Zink im Tierfutter) bleiben in der Konzeption unberücksichtigt.

In seiner Ganzheit ist das Konzept BMVEL & BMU (2002) daher abzulehnen, da es einer Berücksichtigung ganzheitlicher Betrachtungsweise von Bodenschutz und Tierernährung nicht ansatzweise gerecht wird. Zu diesem Urteil kommt neben dem Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs und Forschungsanstalten (VDLUFA, 2002) auch die Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (LAVES & GÄTH, 2003).

VDLUFA (2002) schlägt ein **alternatives Bewertungskonzept** vor: Nach einem Schlüssel, in den die Wertbestandteile Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel, Kalk und organische Substanz eingehen, wird eine Wertstoffbeurteilung der angesprochenen Düngemittel vorgenommen. Die so erzielte Beurteilung, NEQ-(Nährstoff- bzw. Wertstoffäquivalent) genannt, wird dann in Relation zu 2/3 der zulässigen Höchstfrachten nach BIOABFV (1998) gesetzt. Hieraus ergeben sich dann spezifische Grenzwerte für die Düngemittel, die in Tab. 5-34 dargestellt werden.

Tab. 5-34: Vorschläge für praktikable spezifische Grenzwerte für Schwermetallgehalte ausgewählter Düngemittel [mg kg⁻¹ TM] (VDLUFA, 2002); Alternativvorschlag zur BMVEL & BMU (2002)-Konzeption

Düngemittel	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹ TM						
Biokompost	1,0	80	100	0,8	30	100	400
Klärschlamm	2,5	200	550	2,0	80	200	1400
Schweine-/Rindergülle	2,5	200	550	2,0	80	200	1400

Nach VDLUFA (2002)-Konzept könnte die Mischgülle aus Schweinebetrieb 6 (spezialisierte Ferkelerzeugung) (Tab. 5-54) aufgrund der Kupfer und Zinkgehalte ebenfalls nicht mehr zur Düngung verwendet werden. Im Falle der Anwendung dieses Konzeptes wären die anderen Veredelungs- und Futterbaubetriebe nicht von einer zusätzlichen Begrenzung ihres derzeitigen Wirtschaftsdüngereinsatzes betroffen.

Zwar kann dieses Konzept aufgrund der Berücksichtigung der Kritikpunkte als weitaus ausgewogener als das BMVEL & BMU (2002)-Konzept gelten, es stellt sich aber die Frage, wie weit überhaupt Grenzwerte für Wirtschaftsdünger, die am Ende der tierischen Produktionskette stehen, sinnvoll sind. Dies wird durch folgendes Beispiel verdeutlicht: Ein schweinehaltender Veredelungsbetrieb verfügt über so viel Lagerkapazität für seine anfallende Gülle, daß er diese nach guter fachlicher Praxis optimal nur einmal pro Jahr im Frühjahr ausbringen kann. Durch die lange Lagerungsdauer erhöhen sich infolge von Vergärung und Atmung die Schwermetallkonzentrationen in der Gülle so weit, daß deren Einsatz durch Grenzwerte ausgeschlossen würde, obwohl die Schwermetallfracht durch den Gülleeinsatz unverändert bliebe. Folglich ist die Effektivität einer solchen Vorgehensweise anzuzweifeln. Zusätzlich würden Kosten für Probenahme, Überwachung und Dokumentation anfallen. Derzeit liegen die Kosten für eine Untersuchung von Gülle auf Schwermetalle nach AbfKlärV bei 55 € pro Probe (LUFA BONN, 2003). Sofern mehrere Düngelagerstätten vorhanden wären, in die die Gülle unterschiedlicher Haltungsgruppen einginge, wären dementsprechend auch mehrere Proben zu analysieren. Andere Maßnahmen, die schon im

Prozeß der Nutztierhaltung ansetzen oder die Düngung begrenzen sind als effektiver, einfacher und nicht zuletzt kostengünstiger anzusehen.

Für die Ermittlung von Grenzwerten ist es nicht nur korrekt sondern auch unerlässlich, Wertstoffaspekte bei der Bewertung von Düngemitteln umfassend zu berücksichtigen. Deshalb fordert auch GUTSER (1996) zukünftig auch Schadstoff/Nährstoffquotienten für die Qualitätsbeurteilung von Düngemitteln heranzuziehen. Dies gilt um so mehr, als gerade die Parameter „basisch wirkende Anteile“ und C-Gehalt unmittelbaren Einfluß auf das Verhalten von Schwermetallen in Böden haben.

Jedes Düngesystem muß in der Praxis allerdings unterschiedlichen Zielstellungen nachkommen. Beispielsweise besteht für einen Betrieb mit KM-WW Rotation kein weiterer Bedarf an humusreproduzierenden Düngemitteln wie dies z.B. bei einem Betrieb mit der Fruchtfolge ZR-Kart.-WW-WG mit Abfuhr der Nebenernterzeugnisse der Fall ist. Da in der Praxis allerdings der Einsatz einzelner Düngemittel immer Bestandteil einer Düngestrategie ist, ist es sinnvoll, die Gesamteinträge der Düngestrategie bzw. des gesamten Anbauverfahrens zu betrachten.

Um eine **Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Düngestrategien bzw. der Anbauverfahren** zu erreichen, wurden die auf die Flächen eingetragenen Gesamtfrachten in Relation zum P-Düngeniveau gebracht. Dabei erfolgte die Auswahl dieses Parameters als Bezugsgröße aufgrund folgender Fakten.

Nahezu das gesamte Cadmium gelangt nach SEVERIN (1999) über die Anwendung P-haltiger Düngemittel in landwirtschaftlich genutzte Böden.

Für den Einsatz von Düngemitteln war immer P der Hauptnährstoff, der das Einsatzvolumen am ehesten begrenzte. Auch Betriebe mit Rindviehhaltung und Ackerfutterbau verzichteten beim Maisanbau nicht auf den Einsatz von NP-Düngern als Unterfußgabe, wodurch auch für sie der geschilderte Umstand zutraf.

Ebenfalls sollte berücksichtigt werden, daß es sich zumindest bei einem **Teil der Schadstofffrachten aus Wirtschaftsdüngern um interne Stoffströme** handelt, die zuvor den Anbauflächen entzogen wurden. Daher macht es Sinn, unterschiedliche Düngesysteme auf Basis des Nettoimportes an Schwermetallen zu betrachten. Zu diesem Zwecke wurden diejenigen Schwermetallfrachten, die mit wirtschaftseigenen Futtermitteln und Einstreu in die Tierhaltung und damit in die Wirtschaftsdünger eingingen, von den Gesamtfrachten, die über die Wirtschaftsdünger auf die Acker- bzw. Grünlandflächen eingetragen wurden, subtrahiert. Dabei erfolgte eine **Bereinigung der Abzüge von wirtschaftseigenen Futtermitteln** um die

Beträge, die aus elementspezifischen Absorptionsraten der Tierkörper resultierten und die mit den Tierabgängen aus dem System ausgetragen wurden.

Da sich schon bei den einzelnen Gesamtschlagbilanzen gezeigt hatte, daß v.a. die Chrom-, Nickel- und Bleieinträge z.T. sehr stark durch den Einsatz des Kalkdüngemittel geprägt waren, wurden in einem zweiten Schritt die **Schwermetall/Phosphor-Quotienten** exkl. Kalkeinsatz errechnet und den incl. Kalkung errechneten Quotienten vergleichend zur Seite gestellt.

Tab. 5-35 zeigt die so kalkulierten durchschnittlich applizierten Frachten an **Cadmium, Kupfer und Zink** pro kg gedüngtem P_2O_5 bezogen auf das gesamte Anbauverfahren, welches hier bis auf wenige Ausnahmen, die erläutert werden, der **Düngestrategie** gleichzusetzen ist. Die gezeigten Quotienten werden folgend auch als Beifracht angesprochen.

Gegenüber der ausschließlichen Betrachtung der Salden und der Bruttoeinträge, gelangt man bei dieser Betrachtungsweise zu weiter differenzierten Erkenntnissen. Zudem können dadurch im weiteren auch Aussagen und Maßnahmenempfehlungen abgeleitet werden, die generell für unterschiedliche Produktionsrichtungen, beispielsweise Betriebe mit Milchviehhaltung, zu treffen sind. Dies gilt deswegen, weil der Einfluß des Standortes, und damit der betriebsinterne Schwermetallzyklus ausgeklammert wird, aus dem auch keine zusätzliche Schwermetallbelastung der Flächen resultieren kann.

Cadmium

Für Cadmium incl. und exkl. Kalkung wies der Biobetrieb mit Milchviehhaltung auf den Ackerstandorten die niedrigsten begleitenden Cadmumeinträge auf. Die zwangsläufig, bezogen auf kg P_2O_5 , mit applizierten Cadmiumfrachten lagen bei den anderen großviehhaltenden Betrieben 1, 4, 6, und 7 mit einer Besatzdichte $\geq 1,3$ GV/ha bei maximal rund $11 \text{ g kg}^{-1} P_2O_5$ (Betrieb 7). Die Düngestrategie dieser Betriebe erwies sich hinsichtlich des Cadmumeintrages pro gedüngtem kg P_2O_5 als relativ vorzüglich gegenüber allen anderen Düngestrategien. Diese Aussage bezieht sich besonders auf die Betriebe, die keine Düngemittel aus der tierischen Produktion eingesetzt hatten, also die Betriebe 10b (Klärschlamm Düngung) und 11 (ausschließliche Mineraldüngung). Betrieb 11 zeigte den am höchsten korrelierten Cadmumeintrag und damit die am meisten mit Cadmium belastende Düngestrategie (siehe auch Tab. 5-24). Auch zwei Folgejahre ohne P-Düngung, wie es durch Flächentausch bei diesem Betrieb praktiziert wurde, verringert nicht den hohen Quotienten, da die Bezugsgröße gleich bleibt.

Tab. 5-35: Mittleres Schwermetall/Phosphat-Verhältnis [mg SM pro kg P₂O₅] (um interne Stoffflüsse durch wirtschaftseigenes Futter bereinigt) der verschiedenen Düngestrategien auf den Acker- und Grünlandstandorten

Betrieb	Betriebstyp	Cd		Cu		Zn	
		Incl. Kalk	Exkl. Kalk	Incl. Kalk	Exkl. Kalk	Incl. Kalk	exkl. Kalk
mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅ ⁻¹							
1	Futterbau (Milch)/ Markt. (1,5 GV ha ⁻¹)	13	11	7832	7986	7622	7651
1	dito.	4	5	9315	11700	5780	7223
2	Futterbau (Milch)/Markt. (0,9 GV ha ⁻¹) Bioland-Richtlinie	2,0	1	252,1	151	2900,4	2836
2	dito.	-	17	-	2424	-	10626
3	Futterbau (Milch) (1,9 GV ha ⁻¹)	18	15	1999	1948	10041	9677
4	Futterbau (Mastbullen)/Markt. (4,9 GV ha ⁻¹)	10	9	1342	1277	6466	6362
6	Veredelung (Ferkelerz.)/Markt. (1,3 GV ha ⁻¹)	7	8	8554	8503	24452	24450
7	Veredelung. (Ferkelerz. + Smast)/Markt. (1,3 GV ha ⁻¹)	16	8	4960	4847	16052	15510
8	Veredelung (S-mast)/ Markt. (1,1 GV ha ⁻¹)	12	24	3099	6036	6164	12232
9	Veredelung (Mastputen)/Markt. (0,8 GV ha ⁻¹)	16	12	3427	3139	8390	7905
10a	Markt. Einsatz von Geflügelmist	21	17	1725	1529	7003	6536
10b	Markt. Einsatz von Klärschlamm	33	33	4413	4842	10521	11542
11	Freilandgemüseanbau ausschl. Mineraldüngung	41	39	309	212	1651	1420

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) Milch: Milchviehhaltung Markt.: Marktfruchtbau
 Bioland: biologisch dynamische Wirtschaftsweise Ferkelerz.: Ferkelerzeugung
 Smast: Schweinemast Pmast: Putenmast Grau unterlegt: Grünland

Der höhere Cd/P-Quotient bei den Betrieben 7 und 9 mit Kalkung dokumentiert den Cadmиеintrag durch Branntkalk bzw. durch den Rückstandskalk aus der Sodagewinnung. (vgl. Tab. 5-19 bzw. Tab. 5-21). Umgekehrt wirkt sich die Herausnahme der Kalkungsmaßnahme mit Konverterkalk aus der Berechnung zu Betrieb 8 aus. Die Verdoppelung aller gezeigten Quotienten bei diesem Betrieb lag in der, mit Ausnahme von Chrom, Schwermetall-begleitarmen P-Düngung durch dieses Düngemittel begründet.

Nach Korrektur auf Nettoeinträge der Ackerflächen stellten sich die schweinehaltenden Betriebe 6 und 7 gegenüber den rindviehhaltenden Betriebsformen 1 und 4 (konventionelle Betriebe) hinsichtlich des Cadmиеintrages nicht länger als relativ vorzüglich dar, wie dies

noch von SEVERIN (1999) kalkuliert war. Evtl. ist der P-Quotient für Cadmium auf Grünland zumindest bei Betrieb 2 zu hoch errechnet, weil hierfür die relativ hohen Cadmiumgehalte der Gülle von Betrieb 3 zugrunde liegen. Der P-Quotient für Cadmium auf den Ackerflächen der Futterbaubetriebe 1 und 4 wäre niedriger gewesen, wenn die Unterfußdüngung zu Mais geringer bemessen worden wäre. Angesichts der Tatsache, daß die sandigen Böden dieser Betriebe im Durchschnitt mit $22 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ Boden, schwerere Böden durchschnittlich mit $26 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ Boden versorgt waren, wäre dies ohne Ertragseinbußen möglich gewesen. Tatsächlich düngten Betrieb 1 $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ und Betrieb 4 $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ als Unterfußgabe mineralisch nach. Die Empfehlungen für die Unterfußdüngung in Mais liegen bei Gehalten von $21\text{-}25 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ Boden (CAL-Methode) auf Sandböden bei $40 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ und $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ auf schwereren Böden (JACOBS, 1998). In letzter Zeit wurden von den Landwirtschaftskammern Westfalen und Weser-Ems erfolgreiche Versuche zum Gölledrill als Unterfußdüngung vorgenommen, bei denen sich sogar eine höhere Wirkung als bei der Unterfußdüngung mit Diammonphosphat und Kalkammonsalpeter zeigte (LEISEN, 2003).

Die Cadmiumbeifrachten der Betriebe 8, 9 und 10a lagen auf einheitlichem Niveau ($21\text{-}24 \text{ mg Cadmium kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$) und befanden sich damit über dem der Betriebe 1, 4, 6 und 7 (auf Ackerflächen). Dies lag wesentlich an der geringeren Besatzdichte bzw. der geringeren gekauften Menge an Geflügelmist, was den höheren Ausgleich mit mineralischen Phosphordüngern nach sich zog.

Für den Eintrag von Cadmium ließen sich die **Einträge über Mineraldünger als entscheidende Eintragsgröße** festmachen. Als besonders ungünstig erwies sich dabei der Einsatz von Triplephosphat: Obwohl Betrieb 8 nur durchschnittlich $14 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ und Betrieb 10a/b $22 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ mit diesem Dünger ausbrachten, war dies maßgeblich für die Erhöhung des P-Quotienten (vgl. Tab. 5-20, Tab. 5-22, und Tab. 5-23). **Düngestrategien mit organischen Düngern aus der Tierhaltung waren hinsichtlich des Cadmiueintrages als weitaus günstiger anzusehen** als der Einsatz von Klärschlamm oder mineralische Düngung.

Kupfer

Der mit der Düngung korrelierte Kupfereintrag wurde nur unwesentlich von Kalkungsmaßnahmen beeinflusst. Dies galt auch für Betrieb 8, wo sich der Quotient nur aufgrund der

hohen begleitenden P-Düngung durch Konverterkalk veränderte. Daher sollte bei der Betrachtung des Cu/P-Quotienten das Augenmerk überwiegend auf der Spalte „incl. Kalk“ liegen.

Sofern durch organische Dünger mindestens 2/3 der Phosphatgabe abgedeckt war, resultierte der Kupfereintrag zu mindestens 90 % hieraus. Ausnahme war Betrieb 8, der eine zusätzliche Spurenelementdüngung durchführte. Darüber hinaus ließen sich innerhalb dieser Gruppe aber auch Verbindungen zur Art der eingesetzten organischen Dünger knüpfen. Die höchsten mit Düngung bzw. pflanzenbaulichen Maßnahmen verbundenen Einträge fanden sich beim spezialisierten Ferkelerzeugerbetrieb und nahmen gen Mastschweinebetrieb 8 ab. Exklusive der mineralischen Spurenelementdüngung beläuft sich der Quotient auf 1662 mg Kupfer pro kg P_2O_5 . Innerhalb dieser Spanne zwischen dem bewirtschaftungsbedingtem Kupfereintrag von Ferkelerzeuger (Betrieb 6) bis Schweinemäster (Betrieb 8) waren auch die Betriebe 10b (Klärschlammeinsatz) und 9 (Putenmist) in abfallender Reihenfolge angesiedelt. Aufgrund bedeutend geringerer Gehalte in Hühner- als in Putenmist, waren die Kupferbeifrachten bei Betrieb 10a (50 % Puten und 50 % Hühner trockenkot) gegenüber denen von Betrieb 9 (Putenmist) reduziert. Sie lag grob abgeschätzt im Bereich der Kupferbeifrachten der Futterbaubetriebe. Letztere waren davon beeinflusst, daß Kupferklauenbäder eingesetzt wurden, so daß sich innerhalb dieser Gruppe kein einheitlicher Trend nach Tierkategorien feststellen ließ. Die geringsten Kupferbeifrachten pro kg P_2O_5 konnten bei der Düngestrategie auf den Ackerflächen von Betrieb 11 festgestellt werden. Auch der Biobetrieb mit Milchviehhaltung konnte günstige Cu-/P-Quotienten aufweisen. Die Verwendung eines anderen Kalkes als Hüttenkalk hätte diesen zwar bei diesem Betrieb noch weiter senken können (vgl. exkl. Kalk), die Wahl von Hüttenkalk erscheint aber wegen der Sicherstellung einer ausreichenden Kupferversorgung als geeignet (vgl. Tab. 5-16).

Zink

Sehr ähnliche Verhältnisse wie bei Kupfer ergaben sich auch für die Beifrachten an Zink. Lediglich der Einsatz von Konverterkalk beeinflusste den errechneten Quotienten spürbar, aufgrund der mit ihm verbundenen Phosphordüngung (siehe auch zuvor bei Cadmium und Kupfer). Auch hier war zuvor konstatiert worden, daß den **organischen Düngemitteln der überwiegende Anteil beim Eintrag von Zink** auf Acker- und Grünlandflächen zukam. Noch deutlicher als bei Kupfer ließen sich hier die einzelnen **tierischen Produktionsverfahren** bzw. der Zukauf der organischen Dünger gegeneinander **abgrenzen**. So wies der

spezialisierte Ferkelerzeugerbetrieb 6 mit $24.452 \text{ mg Cu kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ den mit Abstand höchsten Quotienten auf. Mit zunehmenden Anteilen an Mastschweinen im Bestand nahm der Quotient ab. In diese Gruppe hinein ragte das Anbauverfahren von Betrieb 10b (Klärschlammeinsatz) gefolgt von Düngesystemen mit Geflügelmist (Betriebe 9 und 10a).

Die geringsten Beifrachten an Zink wies, wie auch bei Kupfer, Betrieb 11 auf (ausschließliche Mineraldüngung). Ein ebenfalls geringer P-Quotient stellte sich im Anbausystem auf den Ackerflächen vom Biobetrieb 2 dar. Der große Unterschied gegenüber der Bewirtschaftung der Grünlandflächen dieses Betriebes resultiert aus den relativ hohen Zinkgehalten, in der den Exkrementen zugrunde gelegten Gülle von Betrieb 3. Hier mag ebenfalls eine zu hohe Einstufung des Quotienten vorliegen.

Tab. 5-36 zeigt die kalkulierten durchschnittlich applizierten Frachten an **Chrom, Nickel und Blei** pro kg gedüngtem P_2O_5 bezogen auf das gesamte Anbauverfahren.

Chrom

Die Einträge an Chrom standen in einem bedeutend schwächeren systematischen Zusammenhang mit der Art der Phosphordüngung als dies für Cadmium, Kupfer und Zink zu beobachten war. Sofern Düngungsmaßnahmen mit Konverterkalk (Betrieb 1, Grünland; Betrieb 8 Ackerland) oder Hüttenkalk (Betriebe 2 und 6, beide Ackerland) durchgeführt wurden, überlagerten diese Eintragsquellen alle anderen Einflüsse auf den bewirtschaftungsdingten Chromeintrag. Auch das Kriterium konventionelle/ökologische Bewirtschaftungsweise hatte deshalb bei den hier untersuchten Betrieben nur einen untergeordneten Einfluß auf die Eintragsvolumina dieses Elementes (vgl. incl. und exkl. Kalk). Allerdings wies auch hier der Biobetrieb nach Abzug der Chromfracht aus Hüttenkalk den niedrigsten P-Quotienten auf. Demgegenüber zeigte Betrieb 10b (Klärschlamm Düngung) das ungünstigste Eintragsverhältnis für Chrom auf. Mit $470 \text{ mg Chrom kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ zeigte auch Betrieb 11 mit ausschließlicher Mineraldüngung infolge seiner P-Düngung ein vergleichsweise ungünstigeres Eintragsverhalten für Chrom. Die Chrombeifrachten in den Düngesystemen der anderen Betriebe wiesen keine weitere Abgrenzungsmöglichkeit untereinander auf. Eine Ausnahme, die Anlaß zur Spekulation bietet, war eine relativ hohe Chromfracht durch den Putenmist bei Betrieb 9 (vgl. Abb. 5-3 und Tab. 5-21). Hierauf wird im Kapitel 5.1.2.3.3 näher eingegangen. Festzuhalten bleiben aber auch die relativ hohen Chromeinträge durch Triplephosphat bei niedrigen Düngergaben (Betriebe 8, 10a und 10b).

Tab. 5-36: Mittleres Schwermetall/Phosphat-Verhältnis [mg SM pro kg P₂O₅] (um interne Stoffflüsse durch wirtschaftseigenes Futter bereinigt) der verschiedenen Düngestrategien auf den Acker- und Grünlandstandorten

Betrieb	Betriebstyp	Cr		Ni		Pb	
		Incl. Kalk	exkl. Kalk	Incl. Kalk	exkl. Kalk	Incl. Kalk	Exkl. Kalk
mg kg P ₂ O ₅ ⁻¹							
1	Fut. (Milch)/Markt. (1,5 GV ha ⁻¹)	267	227	200	193	237	225
1	“	4479	73	169	158	188	168
2	Fut. (Milch)/ Markt. (0,9 GV ha ⁻¹) Bioland	1173,1	209	246,0	93	181,9	173
2	“	-	453		319		450
3	Fut. (Milch) (1,9 GV ha ⁻¹)	550	507	333	304	343	330
4	Futterbau (Mastbullen)/Markt. (4,9 GV ha ⁻¹)	181	167	234	219	127	106
6	Veredelung (Ferkelerz.)/Markt. (1,3 GV ha ⁻¹)	800	193	251	157	258	256
7	Veredelung. (Ferkelerz. + S-mast)/Markt. (1,3 GV ha ⁻¹)	380	337	196	169	460	180
8	Veredelung (S-mast)/ Markt. (1,1 GV ha ⁻¹)	10906	356	190	171	159	55
9	Veredelung (Mastputen)/Markt. (0,8 GV ha ⁻¹)	578	381	438	118	1030	24
10a	Markt. Einsatz von Geflügelmist	478	385	163	137	140	102
10b	Markt. Einsatz von Klärschlamm	641	635	265	276	943	1039
11	Freilandgemüseanbau ausschl. Mineraldüngung	520	455	179	163	787	768

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) Milch: Milchviehhaltung Markt.: Marktfruchtbau
 Bioland: biologisch dynamische Wirtschaftsweise Ferkelerz.: Ferkelerzeugung
 Smast: Schweinemast Pmast: Putenmast Grau unterlegt: Grünland

Nickel

Dem ermittelten P-Quotienten für Nickel war **keine systematische Ordnung nach Betriebstypen** zu entnehmen. Auch hier war die Beifracht pro gedüngter Phosphoreinheit für Nickel exkl. Kalkeinsatz bei Biobetrieb 2 am geringsten.

Auffallende Eintragsquotienten (bzw. deren Veränderung zur Berechnung „exkl. Kalk“) resultierten aus dem Einsatz von Hüttenkalk (Betriebe 2 und 6) und wurden durch den Einsatz des Rückstandskalkes aus der Sodagewinnung übertroffen.

Den stärksten Einfluß auf den Nickeleintrag hatte demnach die Auswahl des Kalkes.

Blei

Die mit Abstand **höchsten begleitenden bewirtschaftungsbedingten Bleieinträge** pro eingesetztem kg P_2O_5 im Gesamtanbausystem traten bei Betrieb 10b (**Düngung mit Klärschlamm**) auf.

Desweiteren stellte der Rückstandskalk aus der Sodagewinnung bei Betrieb 9 ein erhebliches Eintragspotential für Blei dar, was durch die Vergleichskalkulation „exkl. Kalk“ belegt wurde. Der ebenfalls recht hohe P-Eintragsquotient für Blei bei Betrieb 11 resultierte zum überwiegenden Anteil aus dem hohen Bleieintrag durch Beregnung und Erdballen der Containerjungpflanzen (vgl. Abb. 5-5 und Tab. 5-24). Diese beiden Haupteintragsgrößen für Blei bei Betrieb 11 stellten die einzigen Fälle dar, wo von den erfassten bewirtschaftungsbedingten Einträgen nicht solche, die mit Düngemaßnahmen in Verbindung standen, die Haupteinträge darstellten.

Bei Betrieben die zur N-Düngung Kalkammonsalpeter oder Kalkstickstoff einsetzten, lag der P-Quotient auch immer höher als bei den Düngestrategien, wo als mineralische Ergänzung AHL oder Harnstoff eingesetzt wurde (Betriebe 4, 8, 9, 10a).

5.1.1.5 Optionen zur Senkung des Schwermetalleintrages in der Pflanzenproduktion

Abschließend können aus den Untersuchungen folgende Maßnahmenempfehlungen gegeben werden.

Festschreibung der Höchstgrenze für die Phosphordüngung auf $80 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (im Durchschnitt der gesamten Fruchtfolgerotation) mit Ausnahmen für die P-Versorgungsstufen A und B und dem Fruchtfolgeglied Mais.

Begründung: P-haltige Dünger wurden als Haupteintragsquelle für Cadmium ermittelt. Pro gedüngtem kg P_2O_5 war der Eintrag durch mineralische P-Dünger am höchsten. Ebenfalls wurden P-haltige Dünger als wichtige Eintragsquelle für Chrom ermittelt. Gleichzeitig lag das auf den Betrieben ermittelte P-Düngeniveau zumeist bei 100 bis $130 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Absenkung des P-Düngeniveaus würde daher auch eine effektive Senkung der Cadmium- und Chromeinträge in Agrarökosysteme erzielen. Um aber auch in Zukunft in Fruchtfolgen mit Maisanbau die ertragssichernde Komponente „Unterfußdüngung“ einsetzen zu können, erscheint für das Fruchtfolgeglied Mais eine zulässige Phosphordüngung von $100 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (bei 1/3 Fruchtfolgeanteil entsprechend rd. $87 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Durchschnitt) angebracht.

Förderung der Substitution von Mineraldünger durch Wirtschaftsdünger

Begründung: Der Einsatz von organischen Düngern aus der Tierhaltung zur Phosphorversorgung von Böden bzw. Nutzpflanzen erwies sich hinsichtlich des Schwermetalleintrages an Cadmium als grundsätzlich vorteilhaft gegenüber Mineraldüngereinsatz. Dies gilt um so mehr, als mit ihnen auch andere Wertstoffe wie andere Nährelemente und C zur Humusreproduktion gedüngt werden. Die mit dem Einsatz dieser organischen Dünger verbundenen Einträge, v.a. an den Spurenelementen Kupfer und Zink, sollten durch Maßnahmen in der Tierproduktion abgesenkt werden. Im Kapitel „Tierproduktion“ wird der Blick hierauf gerichtet.

Regelmäßiges **Monitoring eingesetzter Düngemittel** incl. Rückstandskalken hinsichtlich der Einhaltung der in der künftigen DüMV festgeschriebenen Grenzwerte und **evtl. Verschärfung der Grenzwerte derselben für Kalkdünger**.

Begründung: Kalkdünger konnten häufig als Haupteintragsquellen von Chrom, Nickel und Blei ausgemacht werden. Kalkdünger aus der Verbrennung sind über die extra vorgesehene Cr-(VI)-Regelung erfaßt (Konverter- und Hüttenkalk). Allerdings wurden durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen als Kalke ebenfalls nicht unerhebliche Einträge an Nickel und Blei auf landwirtschaftliche Flächen aufgetragen. Evtl. ist in der DüMV den höheren Einsatzmengen gerade dieser SERO-Kalkdünger Rechnung zu tragen. Hierzu würde sich der Einsatz von Schadstoff/Nährstoffquotienten, wie die DüngemittelVO dies für Cadmium/Phosphor vorsieht, anbieten.

Deklaration von Schadstoff/Nährstoff-Quotienten für alle im Handel befindlichen Düngemittel einschließlich der Sekundärrohstoffdünger.

Begründung: Dies würde dem Landwirt als exekutivem Entscheidungsträger eine Möglichkeiten an die Hand geben, die Schwermetallgehalte der Düngemittel als ein weiteres Entscheidungskriterium bei der Kaufentscheidung heranzuziehen. Der dadurch entstehende zusätzliche Marktdruck würde die Produzenten von Düngemitteln indirekt veranlassen, die Schwermetallgehalte in ihren Produkten zu minimieren. Dies könnte auch zu einer Verringerung der Schwermetallgehalte in Sekundärrohstoffdüngern wie Klärschlamm führen.

V. Forschung in folgenden Bereichen:

V.1 Möglichkeiten zu einem wettbewerbsfähigem **Nährstoff- v.a. P-Recyclings aus Klärschlamm** ohne eine Ausbringung desselben

Begründung: In jedem Falle stellt Klärschlamm hinsichtlich der Gesamtheit der mit ihm

eingetragenen Schwermetalle das ungünstigste Düngeverfahren dar. Der Kreislaufwirtschaftsgedanke darf aber angesichts der knappen Ressource P nicht außer Acht gelassen werden.

V.2 Reduktionsmöglichkeiten der Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern (besonders Kupfer und Zink).

Begründung: Die Düngung mit Wirtschaftsdüngern kann im Vergleich zur Mineraldüngung im Hinblick auf den Eintrag an Cadmium, Chrom, Nickel und Blei auf landwirtschaftliche Nutzflächen zumeist als vorteilhaft angesehen werden. Die Einträge an Kupfer und Zink durch organische Dünger aus der Tierhaltung sind gegenüber mineralischer Düngung erhöht. Der Ein- und Austrag von Schwermetallen in die Tierhaltung ist daher in einem nächsten Schritt zu evaluieren, um hier direkt zu Beginn des landwirtschaftlichen Produktionsverfahrens Möglichkeiten für eine Verminderung des Schwermetalleintrages in Agrarökosysteme zu identifizieren.

V.3 Reduktionsmöglichkeiten der Schwermetallgehalte in mineralischen Handelsdüngern

Begründung: Hier liegen evtl. weitere Reduktionspotentiale, die aber seitens der vorliegenden Arbeit nicht erfaßt werden können. Zu denken ist hier beispielsweise an die Frage, warum KAS hinsichtlich des Bleigehaltes sehr hohe Abweichungen aufweist und wie sich der Bleigehalt in diesem sehr wichtigen Stickstoffdünger senken läßt.

V.4 Konzentrierung von Nährstoffen in Wirtschaftsdüngern

Dies würde die Transportwürdigkeit dieser Düngemittel erhöhen, die oft wegen des geringen TM-Anteils nicht gegeben ist.

Die Auswirkungen der konkreten Maßnahme aus Option I. sollen später zusammen mit Handlungsoptionen aus der Tierproduktion geprüft werden, um eine Aussage über die Wirksamkeit treffen zu können.

5.1.2 Tierische Produktion

Die Schwermetallgehalte der eingesetzten Betriebsmittel werden vorab aller untersuchten Tierhaltungsformen (Rindvieh, Schweine, Puten) dargestellt.

Die Elementgehalte dieser Mittel sind im Falle der wirtschaftseigenen Futtermittel, des Wassers und der selbsterzeugten Einstreumaterialien sowie der verwendeten Mineralfuttermischungen betriebsindividuell und werden deshalb separat dargestellt.

Betriebsmittel, die überregional gehandelt und auf mehreren der untersuchten Betriebe einer Gruppe (Rindvieh-, Schweine-, Putenhaltung) eingesetzt wurden, wie z.B. Extraktionsschrote, werden zusammengefaßt dargestellt. Den so gemittelten Werten sind aber immer Herkunftsangaben zur Seite gestellt. Die gezeigten Gehalte in Milch und anfallenden Wirtschaftsdüngern sind dementsprechend auch separat nach Betrieb, z.T. darüber hinaus nach Haltungsgruppen separat aufgeführt. Die der Bilanzierung zugrunde gelegten Schwermetallgehalte der Tierkörper sind Tab. 4-4 zu entnehmen.

Darstellung und Auswertung aller im Bereich Tierproduktion genommenen Proben sind im Anhang zu finden.

5.1.2.1 Futterbaubetriebe mit Rindviehhaltung

5.1.2.1.1 Schwermetallgehalte

Die Schwermetallgehalte der **wirtschaftseigenen Futtermittel** sind Tab. 5-37 zu entnehmen.

Die gezeigten Werte waren vergleichbar zu den von SPIEKERS ET AL. (1991) und DOBERSCHÜTZ ET AL. (1994) beschriebenen Werten für wirtschaftseigene Futtermittel. Die ermittelten Gehalte gleicher Erzeugnisse von unterschiedlichen Betrieben befanden sich auf ähnlichem Niveau. Graserzeugnisse, unabhängig ob als Silage oder Rauhfutter, wiesen gegenüber Maissilage und CCM höhere Gehalte an Chrom, Nickel und Blei auf. Die höheren Bleigehalte von Gras, Grassilage und Heu könnten auf erdige Verunreinigungen bei der Bergung zurückzuführen sein. CCM enthielt die geringsten Werte an Cadmium und Blei. Gegenüber den anderen untersuchten wirtschaftseigenen Futtermitteln wies Kartoffelschlempe mit 40 mg kg^{-1} TM relativ höhere Kupfergehalte auf. Im Vergleich zu Futterkartoffeln von Betrieb 2 wies das Nebenprodukt aus der Brennerei für alle Elemente höhere Gehalte auf. Dabei ließ sich der Konzentrationsunterschied auf den Faktor 2-3 beziffern. Für Kupfer lag er dagegen bei 10.

Tab. 5-37: Schwermetallgehalte wirtschaftseigener Futtermittel (Rinderhaltung)

Betrieb	n	Futtermittel	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	12	Maissilage	0,13 ± 0,06	0,43 ± 0,25	5,33 ± 3,97	0,62 ± 0,49	0,58 ± 0,34	24,4 ± 13,5
4	13	Maissilage	0,13 ± 0,07	0,31 ± 0,12	3,23 ± 0,94	0,18 ± 0,12	0,45 ± 0,20	19,1 ± 4,9
5	1	Maissilage	0,07	1,41	4,12	0,25	0,51	12,2
1	12	Grassilage	0,14 ± 0,07	1,44 ± 0,57	6,50 ± 2,11	1,15 ± 0,50	1,27 ± 0,33	35,8 ± 16,9
2	6	Grassilage	0,13 ± 0,04	1,09 ± 0,50	6,88 ± 1,24	0,90 ± 0,51	0,84 ± 0,19	34,4 ± 22,7
3	12	Grassilage	0,27 ± 0,17	1,53 ± 1,43	6,91 ± 1,67	1,43 ± 0,99	2,16 ± 2,67	28,5 ± 8,0
5	10	Grassilage	0,12 ± 0,05	1,15 ± 0,06	6,15 ± 0,54	2,07 ± 1,95	0,71 ± 0,31	22,8 ± 2,6
1	10	CCM	0,02 ± 0,03	0,36 ± 0,58	2,51 ± 1,11	0,21 ± 0,14	0,20 ± 0,13	23,7 ± 11,6
4	4	CCM	0,04 ± 0,05	0,26 ± 0,38	4,18 ± 4,02	0,71 ± 1,26	0,42 ± 0,57	41,1 ± 19,3
2	13	Kartoffel (aussortierte Konsumkart.)	0,13 ± 0,08	0,29 ± 0,24	3,88 ± 0,71	0,28 ± 0,30	0,29 ± 0,39	12,5 ± 4,6
4	9	Kartoffelschlempe	0,22 ± 0,06	1,07 ± 0,28	40,1 ± 15,1	0,85 ± 0,54	0,58 ± 0,25	48,7 ± 14,6
2	11	GPS Gerste-Erbesen-Gem.	0,12 ± 0,05	0,98 ± 2,25	5,36 ± 2,20	0,53 ± 0,54	0,52 ± 0,72	21,0 ± 6,6
1	11	Heu	0,16 ± 0,07	2,39 ± 2,97	9,08 ± 5,71	1,64 ± 0,88	1,54 ± 1,33	46,5 ± 24,4
2	5	Heu	0,29 ± 0,09	1,07 ± 0,57	5,35 ± 1,20	0,95 ± 0,57	0,82 ± 0,27	38,0 ± 14,1
2	5	Gras 1. Schnitt	0,10 ± 0,00	0,93 ± 0,19	10,7 ± 1,84	0,98 ± 0,09	0,90 ± 0,06	55,0 ± 23,7
3	8	Gras 2. Schnitt	0,18 ± 0,08	0,43 ± 0,15	7,55 ± 0,94	1,09 ± 0,21	0,51 ± 0,09	25,5 ± 3,15

± Standardabweichung

In Tab. 5-38 werden Schwermetallgehalte von unterschiedlichen **Einstreumaterialien** gezeigt.

Bei den verschiedenen Stroharten traten keine größeren Abweichungen der Elementgehalte auf. Lediglich die niedrigeren Zinkgehalte im Weizen- und Triticalestroh des Betriebes 2 fielen im Vergleich zu denen des Betriebes 1 auf.

Sägemehl enthielt demnach ähnliche Anteile an den untersuchten Schwermetallen wie die untersuchten Stroharten. Lediglich die Cadmiumgehalte lagen bei Sägemehl über denen von Stroh, dies allerdings mit Schwankungen bis zu 60 % um den Mittelwert.

Tab. 5-38: Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien (Rinderhaltung)

Betrieb /-e	n	Einstreu	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
2	20	Roggenstroh	0,05 ± 0,02	0,49 ± 0,12	3,24 ± 4,04	0,72 ± 1,46	0,42 ± 0,15	13,0 ± 14,12
1,3	12	Sägemehl	0,30 ± 0,22	0,58 ± 0,37	1,69 ± 1,00	0,50 ± 0,37	1,70 ± 1,13	15,7 ± 5,2
1	4	Triticalestroh	0,09 ± 0,03	0,86 ± 0,35	3,53 ± 1,51	0,55 ± 0,32	0,73 ± 0,48	16,2 ± 7,3
2	9	Triticalestroh	0,04 ± 0,01	0,50 ± 0,05	2,57 ± 3,82	0,36 ± 0,12	0,42 ± 0,06	6,8 ± 1,4
5	15	Triticalestroh	0,09 ± 0,02	0,89 ± 0,18	2,64 ± 1,54	0,62 ± 0,18	0,73 ± 0,18	10,2 ± 10,0
1	7	Weizenstroh	0,17 ± 0,08	0,47 ± 0,11	2,81 ± 2,08	0,46 ± 0,28	0,63 ± 0,34	20,9 ± 16,1
2	14	Weizenstroh	0,09 ± 0,06	0,66 ± 0,19	2,08 ± 0,44	0,54 ± 0,32	0,41 ± 0,07	6,12 ± 3,50
5	19	Weizenstroh	0,14 ± 0,02	1,08 ± 0,67	2,59 ± 0,77	0,93 ± 0,67	0,69 ± 0,61	7,61 ± 2,34

± Standardabweichung

In Tab. 5-39 sind auf der folgenden Seite die Schwermetallgehalte in zugekauften Einzel- und Mischfuttermitteln zur Eiweiß- und/oder Energiesupplementierung dargestellt.

Preßschnitzel enthielten gegenüber den anderen Futtermitteln höhere Gehalte an den Elementen Cadmium, Chrom, Nickel und Blei. Sojaschrot wies mit ca. 4,11 mg kg⁻¹ TM die höchsten Nickelgehalte auf. Der Zinkgehalt in Kartoffelstärke lag gegenüber dem in gewaschenen Futterkartoffeln deutlich niedriger. Das mineralisierte Milchleistungsfutter hatte im Vergleich zu den anderen Futtermitteln entsprechend höhere Gehalte an den nutritiven Spurenelementen Kupfer und Zink aber auch höhere Gehalte an Chrom und Blei. Auch die zugekauften Ergänzungsfuttermittel zur Kälberaufzucht waren mineralisiert und enthielten höhere Gehalte an Kupfer und Zink.

Die in Tab. 5-40 gezeigten Schwermetallgehalte in **Mineralfuttermitteln** entsprachen bezüglich der Spurenelemente Kupfer und Zink mit 10-20 % Abweichung den Herstellerangaben laut Deklaration. Neben diesen zwei Spurenelementen waren gegenüber anderen Futtermitteln pflanzlichen Ursprungs auch höhere Gehalte an Cadmium, Chrom, Nickel und Blei festzustellen. Innerhalb der Gruppe der Mineralfuttermittel waren die Gehalte in Futterkalk, Viehsalz und Magnesiumoxid gering. Lediglich das bei Betrieb 4 eingesetzte Magnesiumoxid enthielt durchschnittlich rund 113 mg Nickel pro kg Trockenmasse bei allerdings sehr hoher Standardabweichung.

Tab. 5-39: Schwermetallgehalte in Zukauffuttermitteln zur Eiweiß- und/oder Energiesupplementierung (Rinderh.)

Betrieb /e	n	Futtermittel	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1,3,4	16	Sojaschrot	0,10 ± 0,06	1,22 ± 2,14	15,1 ± 4,8	4,11 ± 2,56	0,27 ± 0,34	46,5 ± 14,4
1,4	11	Rapsschrot	0,13 ± 0,07	0,64 ± 0,58	7,3 ± 3,5	1,27 ± 1,02	0,21 ± 0,14	66,2 ± 33,8
1	6	Weizenschrot	0,11 ± 0,03	0,38 ± 0,64	4,8 ± 1,7	0,21 ± 0,10	0,17 ± 0,14	45,6 ± 32,5
1,3	9	Milchleistungsfutter	0,07 ± 0,03	1,55 ± 0,41	20,7 ± 8,1	3,05 ± 1,75	0,90 ± 0,90	152,7 ± 79,4
1,3,4	28	Biertreber	0,08 ± 0,05	0,50 ± 0,44	15,0 ± 4,7	0,45 ± 0,43	0,26 ± 0,18	76,1 ± 39,8
4	5	Maiskleber	0,03 ± 0,01	1,54 ± 0,51	6,67 ± 0,48	3,78 ± 1,36	0,19 ± 0,07	61,7 ± 6,7
1	5	Kartoffeln (gewaschen)	0,16 ± 0,05	0,26 ± 0,29	4,37 ± 0,95	0,34 ± 0,10	0,29 ± 0,29	15,1 ± 3,5
2	13	Kartoffeln	0,13 ± 0,08	0,29 ± 0,24	3,88 ± 1,57	0,23 ± 0,16	0,18 ± 0,17	15,3 ± 4,4
4	11	Kartoffelstärke	0,04 ± 0,02	0,62 ± 0,86	1,19 ± 0,31	0,28 ± 0,36	0,29 ± 0,20	3,47 ± 1,10
4	4	Kartoffelschalen	0,22 ± 0,08	1,17 ± 0,97	7,24 ± 5,24	0,96 ± 0,41	0,44 ± 0,31	15,1 ± 4,2
1,3	13	Preßschnitzel	0,51 ± 0,17	1,92 ± 0,55	10,4 ± 10,2	1,47 ± 0,83	1,80 ± 0,81	41,4 ± 25,2
1,3	13	Milchaustauscher	0,03 ± 0,01	0,47 ± 0,53	7,8 ± 4,7	0,36 ± 0,26	0,17 ± 0,21	72,7 ± 34,0
1,4	7	Kälberaufzuchtfutter	0,10 ± 0,03	0,90 ± 0,27	16,1 ± 4,2	2,20 ± 0,84	0,45 ± 0,29	99,8 ± 36,9

± Standardabweichung

Rinderhalt.: Rinderhaltung

Tab. 5-40: Schwermetallgehalte in Mineralfuttermitteln (Rinderhaltung)

Betrieb /e	n	Futtermittel	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	13	Mineralfutter Kühe	0,46 ± 0,30	21,57 ± 12,15	1284 ± 238	13,54 ± 11,19	9,23 ± 10,87	8632 ± 1470
2	8	Mineralfutter Kühe I	0,31 ± 0,13	12,92 ± 9,92	441,4 ± 214,5	15,04 ±15,49	1,42 ± 0,96	3068 ± 1917
2	8	Mineralfutter Kühe II	0,92 ± 0,49	34,49 ± 8,03	906 ± 196	79,95 ± 33,82	16,31 ± 34,56	8111 ± 3136
3	6	Mineralfutter Kühe	0,94 ± 1,19	31,34 ± 41,57	301,7 ± 110,7	58,59 ± 83,05	6,14 ± 7,82	3257 ± 1370
1	3	Mineralfutter Bullen	0,30 ± 0,10	31,21 ± 6,69	988 ± 109	9,26 ± 3,40	8,56 ± 0,62	14081 ± 8359
4	7	Mineralfutter Bullen	0,61 ± 0,23	11,45 ± 4,06	362,0 ± 276,6	8,94 ± 3,20	38,02 ± 12,18	2210 ± 780
1,2,4	16	Futterkalk	0,06 ± 0,07	3,50 ± 1,62	8,09 ± 3,35	2,10 ± 2,43	5,25 ± 7,82	10,36 ± 12,07
1,2,3,4	11	Viehsalz	0,21 ± 0,23	0,13 ± 0,15	11,59 ± 26,49	0,17 ± 0,27	0,03 ± 0,04	14,31 ± 33,19
4	4	Magnesiumoxid	0,05 ± 0,10	10,15 ± 15,27	7,17 ± 2,04	113,39 ± 122,61	0,53 ± 0,64	2,89 ± 2,02

± Standardabweichung

Die untersuchten **Brunnenwasser**proben sind der Tab. 5-41 zu entnehmen. Mit Ausnahme von Zink (Betriebe 1 und 4) konnten keine Elementkonzentrationen nachgewiesen werden.

Tab. 5-41: Schwermetallgehalte in Wasser zur Tränke und Desinfektion (Rinderhaltung)

Betrieb	n	Wasser	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	3	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,06 ± 0,01
2	4	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
3	6	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
4	3	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,06 ± 0,01

± Standardabweichung n.n.: nicht nachweisbar

Tab. 5-42 zeigt die Schwermetallgehalte in **Kupfersulfat**. Neben dem im Kupfersulfat als Wirkstoff gebundenen Kupfer enthält dieses Produkt zur Klauendesinfektion als Verunreinigung auch sehr hohe Anteile an Nickel.

Tab. 5-42: Schwermetallgehalte in Kupfersulfat zur Klauenhygiene (Rinderhaltung)

Betrieb	n	Produkt	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	4	Kupfersulfat	0,72 ± 0,34	0,90 ± 0,32	275155 ± 72414	536 ± 762	65,29 ± 16,66	104 ± 60

± Standardabweichung

Die in Tab. 5-43 gezeigten Gehalte an Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink in **Rindergülle** lagen im Bereich der in der Literatur genannten Werte (BOYSEN, 1992; MENZI & HALDEMANN, 1993; LPB, 1997; KTBL, 2000; SCHAAF & JANßEN, 2000).

Tab. 5-43: Schwermetallgehalte in Flüssigmist (Rinderhaltung)

Betrieb	n	Wirtschaftsdünger	As (n=1)	Cd	Cr	Cu	Hg (n=1)	Ni	Pb	Zn
1	28	Gülle Milchvieh	n.n.	0,39 ± 0,05	4,15 ± 0,88	255 ± 128	0,001	5,58 ± 2,46	3,52 ± 0,65	252 ± 34
3	27	Gülle Milchvieh	n.u.	0,57 ± 0,11	8,36 ± 2,61	50,1 ± 23,0	0,048	7,25 ± 2,35	6,45 ± 2,43	226 ± 21,4
4	31	Gülle Mastbullen	n.u.	0,32 ± 0,07	3,57 ± 0,68	56,8 ± 7,5	0,007	8,33 ± 1,77	3,98 ± 0,85	290 ± 34

¹ As und/oder Hg (n=1)

n.n.: nicht nachweisbar

n.u.: nicht untersucht

Von diesen Werten lagen lediglich die Kupfergehalte in der Gülle von Betrieb 1 mit durchschnittlich mehr als 250 mg kg⁻¹ TM höher als die genannten Vergleichswerte. Die untersuchten Quecksilbergehalte in Gülle lagen unter dem Literaturwert von KTBL (2000). Das gleiche galt für die Arsenanalyse der Gülle von Betrieb 1.

Die ermittelten Schwermetallgehalte in **Festmist und Jauche** (Tab. 5-44) bewegten sich ebenfalls im Bereich der Literaturwerte von KTBL (2000).

Tab. 5-44: Schwermetallgehalte in Festmist (incl. Futterreste) und Jauche (Rinderhaltung)

Betrieb	n	Wirtschaftsdünger	As (n=1)	Cd	Cr	Cu	Hg (n=1)	Ni	Pb	Zn
1	36 ¹	Rindermist	n.n.	0,35 ± 0,15	8,65 ± 12,33	46,85 ± 71,90	0,018	5,36 ± 5,86	13,33 ± 22,65	131,3 ± 97,9
2	25 ¹	Rindermist	n.n.	0,26 ± 0,10	4,90 ± 7,04	22,38 ± 11,15	0,033	2,44 ± 1,26	3,46 ± 2,40	108,7 ± 73,2
3	8	Rindermist	n.u.	0,43 ± 0,13	19,07 ± 18,24	42,89 ± 31,77	n.u.	12,98 ± 10,41	8,04 ± 5,69	274,0 ± 167,7
2	9 ¹	Rinderjauche	1,38	0,30 ± 0,10	5,48 ± 5,41	18,01 ±10,1	0,005	4,97 ± 2,29	71,80 ± 191,30	114,48 ± 62,97

± Standardabweichung ¹ As und/oder Hg (n=1) n.n.: nicht nachweisbar n.u.: nicht untersucht

Bei Rindermist waren vereinzelt höhere Chromgehalte, bei Rinderjauche höhere Bleigehalte feststellbar. Die gemessenen Quecksilbergehalte blieben hinter dem Literaturwert von 0,04 mg kg⁻¹ (KTBL 2000) zurück.

Tab. 5-45 zeigt die gemessenen Schwermetallkonzentrationen in der **Frischmilch**.

Tab. 5-45: Schwermetallgehalte der Milch

Betrieb	n	Erzeugnis	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	9	Milch	n.n.	0,01 ± 0,02	0,23 ± 0,23	0,02 ± 0,04	0,05 ± 0,06	6,98 ± 2,38
2	5	Milch	n.n.	n.n.	0,37 ± 0,19	n.n.	n.n.	10,45 ± 3,50
3	4	Milch	n.n.	n.n.	0,02 ± 0,05	0,01 ± 0,01	n.n.	4,20 ± 1,54

± Standardabweichung n.n.: nicht nachweisbar n.u.: nicht untersucht

Die Standardabweichungen bei den Elementen Chrom, Kupfer, Nickel und Blei waren hoch. Die für diese Elemente ermittelten Gehalte lagen aber mit Ausnahme von Kupfer und Zink oft im Bereich der Nachweisgrenze oder konnten nicht nachgewiesen werden. Für Zink waren die Meßwerte mit maximalen Abweichungen von 30 % recht konstant.

5.1.2.1.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung

Über die Anteile der Betriebsmittel an den Schwermetalleinträgen in den Stall informiert Abb. 5.7.



Abb. 5-7: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in die Gesamtställe der rindviehhaltenden Futterbaubetriebe [%]

In der Gruppe der sonstigen Betriebsmittel wurden Klauendesinfektionsmittel, Einstreu-
produkte und Wasser zusammengefaßt.

Die Einträge an den Schwermetallen Cadmium, Chrom, Nickel, Blei und Zink in das System
Stall resultierten bei allen vier untersuchten Futterbaubetrieben zu über 90 % aus
Futtermitteln. Auf den Betrieben, in welchen die Tiere mit Stroh eingestreut wurden
(Betrieb 1: Abkalbebox, Trockensteher und Kälber; Betrieb 2: gesamter Tierbestand) entfielen
etwa zwei bis zehn Prozent der Einträge für Cadmium, Chrom, Nickel, Blei und Zink auf den
Eintragspfad „Stroh“, der in der Position „Sonstige Betriebsmittel“ enthalten ist. Betrieb 3
arbeitete nur im Saugkalbbereich mit Stroheinstreu. Sofern keine Klauendesinfektion mit
Kupfervitriol vorgenommen wurde (Betriebe 2 und 4), galten diese Feststellungen auch für
den Kupfereintrag in deren Ställe. Bei den Betrieben 1 und 3, die Kupfervitriol zur

Klauenhygiene einsetzen, machte der Anteil dieses Präparates, welches ebenfalls in der Position „Sonstige Betriebsmittel“ enthalten ist, am Kupfereintrag annähernd 70 bzw. 55 % aus.

Generell waren die Eintragsanteile der wirtschaftseigenen und der zugekauften Futtermittel sowie der Mineralfuttermittel der Betriebe 1 und 3 für alle Elemente sehr ähnlich. Lediglich der Anteil an eingetragenen Zink geschah bei Betrieb 1 stärker durch Mineralfuttermittel, bei Betrieb 3 dagegen vermehrt durch Milchleistungsfutter (Zukauffuttermittel Protein-/Energie). Der Anteil der wirtschaftseigenen Futtermittel am Schwermetalleintrag in das System „Stall“ lag bei diesen beiden konventionellen Milchviehbetrieben zwischen 24 % für Zink und 65 % für Blei. Beim Biobetrieb mit Milchviehhaltung (Betrieb 2), der lediglich Mineralfuttermittel zukaufte, resultierten zwischen 50 % (Zink) und 87 % (Cadmium) aus wirtschaftseigenen Futtermitteln.

Die der Fütterung der Mastbullen bei Betrieb 4 zuzuordnenden Eintragsanteile (wirtschaftseigene Futtermittel, Zukauffuttermittel und Mineralstoffe) wichen von der Verteilung bei den anderen Betrieben ab. Dabei fiel v.a. der geringere Anteil der wirtschaftseigenen Futtermittel am Schwermetalleintrag für alle untersuchten Elemente bei Betrieb 4 auf. Der überwiegende Anteil des Stalleintrags entfiel hier auf die Zukauffuttermittel einschließlich der Mineralfutter. Letztere machten bei Betrieb 4 einen Anteil von über 60 % des Eintrages von Blei in den Stall aus – bei den anderen Betrieben lag dieser Anteil zwischen rd. 15 (Betrieb 2) und ca. 35 % (Betrieb 3).

Im Stall des Betriebes 3 wurden die Einträge durch Korrosion und Abrieb an den verzinkten Stalleinrichtungen untersucht. Lediglich für Zink ergab sich ein Anteil von 5 % am Eintrag. Für alle anderen Elemente war dieser Eintragspfad unbedeutend.

Die Betriebe 1, 3 und 4 remontierten ihren Viehbestand aus externen Zugängen. Da die Mastbullenhaltung bei Betrieb 1 im Referenzjahr 2001 aufgegeben wurde, wurden diese Abgänge auch nicht mehr ergänzt. Auf den Schwermetalleintrag in den Stall hatte der Tierkörper nur eine untergeordnete Rolle. Bei Betrieb 4 lag dieser für Zink bei rund 5 % und für Cadmium bei ca. 1 %.

Gegenüber den schweinehaltenden Veredelungsbetrieben (vgl. Kap. 5.1.2.2.2) stellte Wasser aufgrund der geringeren Tränkemengen für keines der Schwermetalle eine erwähnenswerte Eintragsquelle dar.

Stallbilanzen

Da die Milchviehbetriebe 1, 2 und 3 Weidegang praktizierten, wurde die Weidefläche in diesen Fällen dem System Stall zugerechnet. Futteraufnahmen von diesen Flächen wurden dementsprechend dem Eintrag, Exkrementen, die auf diesen Flächen verblieben, analog dem Austrag zugewiesen. Um die Bilanzierung mit vertretbarem Aufwand durchführen zu können, wurden die Gehalte in den Exkrementen dabei denen in der Gülle gleichgesetzt. Hieraus resultierte ein systematischer Fehler, da die Gülle neben den Exkrementen der Tiere auch noch zusätzliche Abwässer aus Milchammer, Regenwasser, Klauenbädern sowie Einträge aus Korrosion und Abrieb der Stalleinrichtung enthielt. Diese Fehleinschätzungen der Austräge während bzw. durch Weidegang ließen sich für Kupfer mit max. 30 % und für die anderen Elemente mit max. 20 % beziffern. Außerdem wurden, da Betrieb 2 kein Flüssigmistsystem besitzt, die Gehalte der Gülle von Betrieb 3 als Exkrementgehalte eingesetzt. Die hieraus resultierenden Fehler bei der Kalkulation der Schwermetallausträge während des Weideganges der Tiere von Betrieb 2 wurden jedoch als vergleichsweise untergeordnet erachtet, da beide Betriebe (2 und 3) mit Ausnahme von Kupfer sehr ähnliche Eintragungssituationen bei den untersuchten Schwermetallen aufwiesen. Bei der Bewertung der Elementströme ist dies zu berücksichtigen.

Die Tabellen 5-46 bis 5-48 zeigen die Gesamtstallbilanzen der untersuchten Futterbaubetriebe mit **Milchviehhaltung** 1-3.

Wegen des gleichen Produktionsverfahrens ist es sinnvoll, die Bilanzen dieser drei Betriebe zuerst vorzustellen und dann auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede einzugehen.

Es fiel auf, daß sich diese Betriebe sowohl hinsichtlich der Einträge als auch der Austräge je GV analog zu ihren Produktionsrichtungen unterscheiden ließen. Die Betriebe 1-3 zeigten demnach mit Ausnahme der Elemente Kupfer und Zink vergleichbare Situationen auf.

Unterschiede hinsichtlich des Kupfereintrages bei den Milchviehbetrieben resultierten hauptsächlich aus der Verwendung von Kupfervitriol zur Klauendesinfektion bei den Betrieben 1 und 3. Bei diesen beiden Betrieben kam hierdurch ein Eintrag von 351 g bzw. 74 g Kupfer pro GV und Jahr zustande. Demzufolge waren auch die Austräge an Kupfer über die Wirtschaftsdünger aus diesen beiden Ställen am höchsten.

Durch unterschiedlich starke Supplementierung von Zink über Mineralfuttermittel ergab sich auch bei diesem Element eine divergierende Situation bei den Milchviehbetrieben 1 bis 3. So ergänzte Betrieb 1 293 g, Betrieb 2 ca. 193 g und Betrieb 3 lediglich 73 g. Letzterer ergänzte die Zinkversorgung aus der Grundration hauptsächlich durch die leistungsbezogene Zulage an

mineralisiertem Milchleistungsfutter, mit dem durchschnittlich 133 g Zink $\text{GV}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in den Stall eingetragen wurden. Zu berücksichtigen ist auch, daß lediglich bei Betrieb 3 Werte für Korrosion und Abrieb der Stalleinrichtungen auf der Eintragsseite berücksichtigt wurden. Für Zink betrug diese Position rund $19 \text{ g } \text{GV}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

Tab. 5-46: Stallbilanz, Betrieb 1 (Milchviehhaltung, Ackerfutterbau)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g $\text{GV}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$					
Wirtschaftseigene Futtermittel	Grassilage	0,35	3,07	12,7	2,41	2,53	61,0
	Grünland ²	0,07	0,65	7,2	0,66	0,64	38,2
	Maissilage	0,29	0,96	12,1	1,41	1,31	55,2
	Raygrasstroh	0,02	0,03	3,5	0,06	0,12	3,9
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Biertreber	0,03	0,15	5,6	0,16	0,12	37,7
	CCM	0,01	0,14	1,0	0,08	0,08	9,1
	Ergänz. Kälber ³	0,01	0,05	0,8	0,11	0,02	5,2
	Kartoffeln	0,03	0,05	0,8	0,06	0,05	2,8
	Milchaustauscher	<0,001	0,01	0,1	0,01	0,003	1,0
	MLF	0,01	0,30	3,7	0,57	0,15	22,7
	Preßschnitzel	0,25	0,91	7,8	0,71	0,8	28,4
	Rapsschrot	0,05	0,31	3,5	0,65	0,11	31,9
	Sojaschrot	0,04	0,17	7,0	1,86	0,06	22,1
	Weizen	0,04	0,13	1,7	0,07	0,06	15,8
Zukauffuttermittel (Mineral)	Futterkalk	0,012	0,02	0,05	0,03	0,14	0,03
	Mineralf. Bullen	0,001	0,06	1,9	0,02	0,02	26,9
	Mineralf. Kühe	0,01	0,66	39,5	0,42	0,28	265,7
	Viehsalz	0,002	0,001	0,03	0,001	<0,001	0,15
Sonstige Betriebsmittel	Kupfervitriol	0,001	0,001	239,5	0,47	0,06	0,1
	Sägemehl	0,02	0,08	0,2	0,07	0,14	2,2
	Stroh	0,11	0,30	1,8	0,29	0,40	13,2
	Wasser ⁴	0,00 ⁵	0,00 ⁵	0,00 ⁵	0,00 ⁵	0,00 ⁵	2,7
Zukauf Tier		0,002	0,02	0,45	0,07	0,03	6,06
Summe Eintrag		1,36	8,07	351	10,2	7,12	652
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,27	2,07	77,20	2,78	1,70	116,65
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,004	0,05	0,88	0,13	0,06	11,93
	Milch	0,01	0,09	2,0	0,21	0,42	62,4
Wirtschaftsdünger	Exkremente	0,03	0,27	16,6	0,36	0,23	16,4
	Gülle	0,87	9,20	566,0	12,39	7,82	559,3
	Mist	0,16	4,03	21,8	2,49	6,20	61,1
Summe Austrag		1,07	13,6	607	15,6	14,7	711
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,24	3,58	142	4,20	4,81	165
Bilanzsaldo		0,29	-5,53	-256*	-5,40	-7,61*	-59,0

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)

² Weidegang

³ Ergänzungsfutter für Kälber

⁴ Tränke, Reinigung

⁵ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Tab. 5-47: Stallbilanz, Betrieb 2 (Milchviehhaltung, Ackerfutterbau, biologisch-dynamisch)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Wirtschaftseigene Futtermittel	Gerste-Erbesen-GPS	0,05	0,37	2,0	0,20	0,2	7,9
	Grassilage	0,05	0,43	2,7	0,36	0,34	13,7
	Grünland ²	0,04	0,39	4,44	0,41	0,37	22,95
	Heu	0,16	0,57	2,8	0,51	0,43	20,2
	Kartoffeln	0,03	0,07	0,9	0,07	0,07	2,99
	Klee gras ²	0,20	0,75	29,6	0,9	1,79	88,6
	Klee grassilage	0,22	2,45	11,6	1,55	1,89	52,9
	Roggen	0,002	0,004	1,1	0,02	0,02	2,4
	Triticale	0,01	0,02	0,7	0,02	0,02	4,0
	Weizen	0,01	0,01	0,7	0,02	0,02	4,2
Zukauffuttermittel (Mineral)	Mineral 1 Kühe	0,01	0,27	9,1	0,31	0,03	63,0
	Mineral 2 Kühe	0,02	0,55	14,5	1,28	0,26	129,6
Sonstige Betriebsmittel	Stroh	0,09	0,75	3,4	0,76	0,54	11,6
	Wasser ³	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴
Summe Eintrag		0,89	6,63	83,5	6,41	5,98	424
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,26	2,57	24,6	2,39	2,36	112
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,002	0,02	0,39	0,06	0,03	5,24
	Milch	0,01	0,01	1,7	0,03	0,02	47,7
Wirtschaftsdünger	Exkremete	0,29	4,26	25,5	3,69	3,28	115,0
	Jauche	0,02	0,28	0,9	0,26	3,72	5,9
	Mist	0,59	11,33	51,8	5,65	8,00	251,6
Summe Austrag		0,91	15,9	80,3	9,69	15,1	425
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,35	6,96	30,0	3,80	7,79	150
Bilanzsaldo		-0,02	-9,27	3,20	-3,28	-9,12	-1,00

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)² Weidegang³ Tränke, Reinigung⁴ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Die größten Anteile am Cadmumeintrag wiesen die wirtschaftseigenen Futtermittel (Anwelksilagen, Maissilage, Heu und Frischgras) auf. Auf den Betrieben 1 und 3 trugen Preßschnitzel zu einem größeren Anteil zum Eintrag der Elemente Cadmium und Blei in den Stall bei. Dies galt ebenfalls für das eingesetzte Milchleistungsfutter auf Betrieb 3.

Die Chrom- und Nickeleinträge resultierten bei allen drei Milchviehbetrieben besonders aus dem Einsatz der Gras- bzw. Klee grassilagen. Aber auch das mineralisierte Milchleistungsfutter bei Betrieb 3 stellte eine größere Eintragsquelle für Chrom und Nickel dar.

Die Austräge wurden in erster Linie durch die Wirtschaftsdünger Gülle (Betriebe 1 und 3)

sowie Mist (Betrieb 2) bestimmt. Durch den bei den Betrieben 2 und 3 intensiver praktizierten Weidegang lag der Anteil der auf der beweideten Fläche verbliebenen Exkremente am Schwermetallaustrag höher. Der Austrag über die Jauche bei Betrieb 2 war lediglich mit $3,7 \text{ g GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für Blei erwähnenswert.

Tab. 5-48: Stallbilanz, Betrieb 3 (Milchviehhaltung, Grünland)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Wirtschaftseigene Futtermittel	Grassilage	0,59	3,36	15,2	3,14	4,74	62,6
	Grünland ²	0,25	0,60	10,6	1,52	0,72	35,7
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Biertreber	0,02	0,20	7,6	0,24	0,09	24,9
	Melasseschnitzel	0,09	0,47	1,0	0,70	0,53	5,7
	Milchaustauscher	<0,001	0,01	0,1	0,004	0,001	1,2
	MLF	0,07	1,16	16,5	2,35	0,75	132,9
	Preßschnitzel	0,27	1,10	2,4	0,83	1,10	13,0
	Sojaschrot	0,01	0,04	1,8	0,62	0,01	5,2
	Vollmilchergänzer	<0,001	0,001	0,1	0,001	<0,001	0,6
Zukauffuttermittel (Mineral)	Mineralfutter Kühe	0,02	0,67	6,4	1,25	0,13	69,3
	Mineralleckstein	0,004	0,16	0,5	0,03	0,04	3,7
	Viehsalz	0,001	0,003	0,5	0,003	<0,001	0,002
Sonstige Betriebsmittel	Kupfervitriol	<0,001	<0,001	73,70	0,14	0,02	0,03
	Sägemehl	0,06	0,09	0,3	0,08	0,32	2,4
	Stroh	0,004	0,03	0,1	0,02	0,03	0,4
	Wasser ³	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴	0,00 ⁴
Stalleinrichtung	Korrosion, Abrieb	<0,001	-	-	-	0,10	18,5
Zukauf Tier		0,001	0,01	0,12	0,02	0,01	1,61
Summe Eintrag		1,39	7,90	137	10,9	8,59	378
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,34	2,25	50,3	3,53	3,17	81,6
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,002	0,02	0,42	0,063	0,03	5,71
	Milch	0,01	0,01	0,1	0,05	0,03	26,8
Wirtschaftsdünger	Mist	0,07	2,88	6,5	1,96	1,21	41,4
	Gülle	1,02	14,90	89,4	12,94	11,51	403,3
	Exkremente	0,17	2,49	15,0	2,16	1,92	67,4
Summe Austrag		1,26	20,3	111	17,2	14,7	545
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,30	5,40	27,3	4,40	3,60	124
Bilanzsaldo		0,12	-12,41*	26,0	-6,30	-6,11*	-167

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag) ² Weidegang ³ Tränke, Reinigung ⁴/- kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konz./Gehalt (⁴eigene Messung/- INDUSTRIEVERBAND FEUERVERZINKEN, 2002)

Tierische Erzeugnisse waren gegenüber den Wirtschaftsdüngern nur zu einem geringeren Maße am Schwermetallaustrag beteiligt. Lediglich für Zink stellten sie ein bedeutendes Austragspotential dar. Bei den Milchviehbetrieben 1, 2 und 3 geschah dies, entsprechend der Produktionsrichtung, vornehmlich durch die verkaufte Milch.

Tab. 5-49 zeigt die Gesamtstallbilanz des **Bullenmastbetriebes 4**.

Die Stallbilanz dieses Produktionsverfahrens lag bei Betrieb 4 sowohl hinsichtlich seiner Ein- als auch seiner Austräge bei allen Elementen auf niedrigerem Niveau als bei den zuvor gezeigten Stallbilanzen der Milchviehbetriebe 1, 2 und 3.

Tab. 5-49: Stallbilanz, Betrieb 4 (Bullenmast)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Wirtschaftseigene Futtermittel	CCM	0,004	0,03	0,4	0,07	0,04	4,2
	Kartoffel-schlempe	0,002	0,01	0,4	0,01	0,01	0,5
	Maissilage	0,17	0,34	4,2	0,24	0,59	24,9
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Biertreber	0,01	0,07	1,5	0,04	0,03	7,7
	Kartoffelschalen	0,06	0,34	2,1	0,28	0,13	4,4
	Kartoffelstärke	0,09	0,14	0,3	0,06	0,07	0,8
	Maiskleber	0,003	0,20	0,9	0,49	0,03	8,1
	Rapsschrot	0,01	0,03	0,4	0,05	0,01	3,4
	Sojaschrot	0,01	0,06	2,3	0,62	0,02	7,4
Zukauffuttermittel (Mineral)	Futterkalk	0,001	0,06	0,1	0,03	0,11	0,1
	Magnesiumoxid	<0,001	0,03	0,02	0,32	0,001	0,01
	Mineral Bullen	0,02	0,44	13,8	0,34	1,45	84,3
Sonstige Betriebsmittel	Wasser	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,1
Zukauf Tier		0,003	0,03	0,6	0,08	0,05	7,6
Summe Eintrag		0,38	1,84	27,0	2,63	2,54	154
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		0,07	0,46	6,30	0,77	0,48	22,0
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,01	0,12	2,3	0,35	0,15	31,5
Wirtschaftsdünger	Gülle	0,21	2,32	37,0	5,41	2,58	188,1
Summe Austrag		0,22	2,44	39,3	5,76	2,73	220
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,02	0,32	5,10	0,86	0,35	29,8
Bilanzsaldo		0,16*	-0,60	-12,3*	-3,13*	-0,19	-66,0*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag) ² Tränke, Reinigung

³ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Die Haupteintragsspositionen entfielen für Cadmium auf Silomais und Kartoffelstärke, für Chrom auf Silomais, Kartoffelprodukte und Mineralstoffe, für Kupfer auf Mineralstoffe und Silomais, für Nickel auf Sojaschrot, Maiskleber und Kartoffelprodukte, für Blei auf Mineralstoffe und Silomais und für Zink auf Mineralstoffe und Silomais.

Analog zur Austragssituation aus den Ställen der Milchviehbetriebe stellte auch hier der Pfad „Wirtschaftsdünger“ den bedeutensten Anteil. Annähernd 15 % des Zinkaustrages kamen

beim Bullenmastbetrieb durch die Tierabgänge zustande, die für den Austrag der anderen Elemente von geringerer Bedeutung waren.

Die Abb. 5.8 zeigt die Gesamtein- und Gesamtausträge der Gesamtställe der milchviehhaltenden Betriebe 1, 2 und 3. Abb. 5.9 zeigt dies für den Gesamtstall des intensiven Bullenmastbetriebes 4.

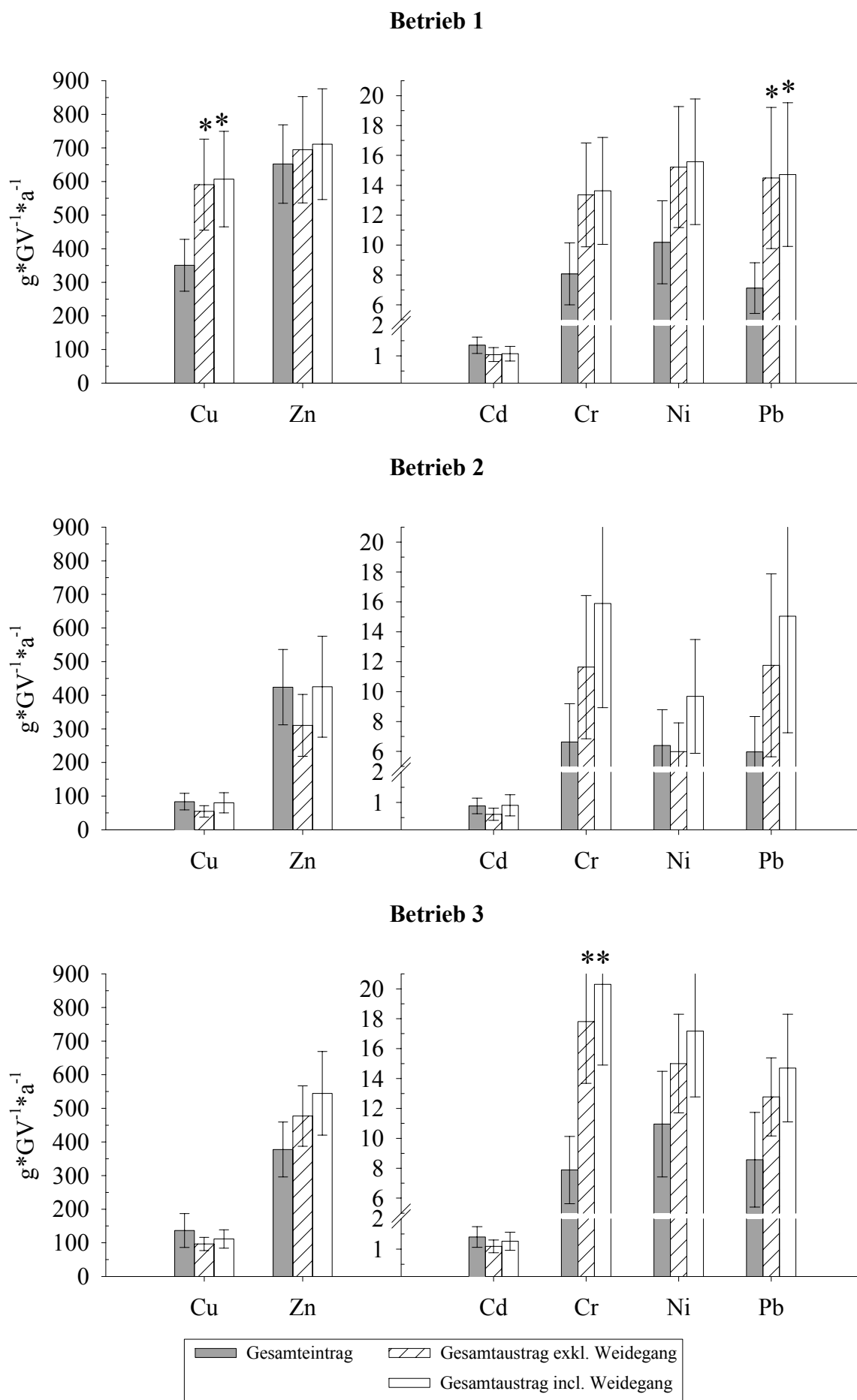


Abb. 5-8: Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtställen der Milchviehbetriebe 1, 2 und 3

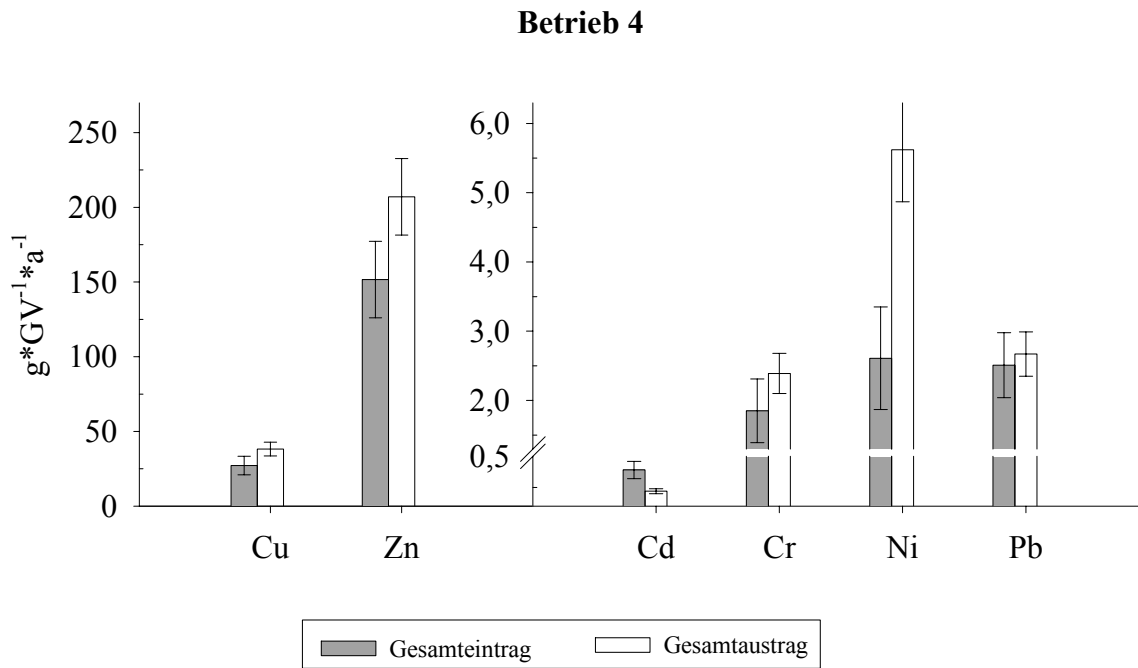


Abb. 5-9: Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtstall des Bullenmastbetriebes 4

Bei Betrieb 1 waren die Bilanzen mit Ausnahme derer von Kupfer und Blei ausgeglichen. In beiden Fällen lag der Austrag deutlich über dem ermittelten Eintrag. Der Grund hierfür konnte nicht ermittelt werden. Die Bilanzierung aller Schwermetalle ergab bei Betrieb 2 keine signifikanten Salden. Betrieb 3 wies bei Chrom einen signifikant höheren Austrag als Eintrag auf.

Im Falle des Bullenmastbetriebes 4 waren für die Ein- und Austräge an Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink signifikante Salden festzustellen. Für Kupfer, Nickel und Zink überstieg dabei der Austrag den Eintrag. Bei Cadmium überstieg der Eintrag dagegen den Austrag.

5.1.2.1.3 Abschließende Diskussion

Alle ermittelten **Ein- und Austräge an Schwermetallen** lagen **bei den Milchviehbetrieben** pro GV und Jahr **höher als bei dem intensiv wirtschaftenden Bullenmastbetrieb**. Der Grund hierfür ist in der bedeutend höheren Futteraufnahme des Milchviehs gegenüber den Masttieren zu sehen. Die Untersuchungen auf den Futterbaubetrieben zeigten darüber hinaus, daß mit Ausnahme von Kupfer bei den Betrieben 1 und 3, die **Schwermetalleinträge hauptsächlich aus der Fütterung** resultierten. Innerhalb des Eintragspfades „Fütterung“ stellte die Supplementierung der Spurenelemente **Kupfer und Zink durch Mineralfutter** für diese Elemente auch immer den höchsten Anteil am Eintrag dar. Insgesamt belief sich der Eintrag an Kupfer über die Futtermittel bei den Milchviehbetrieben zwischen rund

63 g GV⁻¹ a⁻¹ bei Betrieb 3 und 109 g GV⁻¹ a⁻¹ bei Betrieb 1. Für Zink waren es bei Betrieb 1 627 g GV⁻¹ a⁻¹ und bei Betrieb 3 355 g GV⁻¹ a⁻¹. GfE (1995/2001) und NRC (1996/2001) empfehlen eine Konzentration von 4-16 mg Kupfer kg⁻¹ und 20-65 mg Zink kg⁻¹ in der Trockenmasse von Alleinfuttermitteln für Wiederkäuer zur Bedarfsdeckung. Unterstellt man bei Betrieb 1 eine homogene Futteraufnahme der TMR und für Betrieb 3 eine durchschnittliche TM-Aufnahme von 16 kg (13,5 kg Grundfutter, 2,5 kg MLF), so enthielte das Futter von Betrieb 1 durchschnittlich 19 mg Kupfer und 108 mg Zink pro kg TM, das Futter von Betrieb 3 13 mg Kupfer und 72 mg Zink pro kg TM. Diese Kalkulation deckt sich mit unternommenen Kupfer- und Zinkanalysen bei zwei tatsächlichen Futterrationen von Betrieb 1: Bei einem Stichprobenumfang von n=16 wurden bei der Hochleistungsration 17 mg Kupfer und 97 mg Zink in der TM ermittelt. Die Niedrigleistendenration enthielt bei einem Stichprobenumfang von n=11 17 mg Kupfer und 102 mg Zink. Demnach könnte Betrieb 1 bei der Zinksupplementation Einsparungen vornehmen. Betrieb 3 läge, wie auch Betrieb 2, im von der GfE (1995/2001) empfohlenen Bereich. Beim intensiven Bullenmastbetrieb 4 lägen die theoretischen durchschnittlichen Konzentrationen (Annahme: durchschnittlich 7 kg TM-Aufnahme pro Tier) im gesamten Futter bei 14 mg Kupfer und 81 mg Zink pro kg TM. In 16 tatsächlichen Futtermischproben (TMR) wurden durchschnittlich 16 mg Kupfer und 70 mg Zink pro kg TM ermittelt. Diese Werte liegen somit ebenfalls in dem von der GfE (1995/2001) empfohlenen Bereich. All dies spricht dafür, daß die Ernährung des Rindviehs mit den essentiellen Spurenelementen Kupfer und Zink auf den hier untersuchten Futterbaubetrieben bedarfsgerecht gestaltet war. Lediglich Betrieb 1 könnte die Zinksupplementierung reduzieren. Allerdings müßten dann u.U. andere Mineralfuttermittel eingesetzt werden, um auch die bedarfsgerechte Versorgung mit anderen Elementen zu gewährleisten.

Nach LÜPPING (2002) kann im Gegensatz zur Nährstoff- und Calcium/Phosphorversorgung bei den Spurenelementen ein enger Zielkorridor nicht eingehalten werden, da die Spurenelemente nicht einzeln dosiert werden, sondern in Form von Mineralstoffmischungen dem Tier zur Verfügung gestellt werden. Lediglich eine **Entkoppelung von Mengenelement- und Spurenelementversorgung** könnte hier zu einer weiteren Optimierung und damit Reduzierung führen. Der Einsatz solcher Mikromineralien erscheint aber nur bei genauer Kenntnis der nativen Gehalte in den einzelnen Futtermitteln sinnvoll. Dies ist praktisch nur bei reiner Stallfütterung möglich. Will man Sicherheitszuschläge vermeiden, muß zudem auf moderne Fütterungstechnik gesetzt werden, die es ermöglicht, weitgehend homogene Futtermischungen zu erstellen. Die möglichst bedarfsgerechte Versorgung mit Makro- und

Mikromineralen erscheint auch vor dem Hintergrund der Minimierung des Eintrages der unerwünschten Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom und Nickel in das System Stall als erstrebenswert. So wurden wie auf Betrieb 4 große Anteile dieser Elemente über die Mineralfuttermittel (Mineralstoffmischungen) in den Stall eingetragen. Dies gilt im besonderen auch für die Frachten an erwünschten Spurenelementen und den anderen unerwünschten Schwermetallen, die über das Milchleistungsfutter in den Stall eingetragen werden. Nach LÜPPING (2002) sollten **Milchleistungsfutter** bedarfsgerecht mit Spurenelementen supplementiert sein, er nennt hier 10 mg Kupfer kg⁻¹ TM bzw. 50 mg Zink kg⁻¹. Da Milchleistungsfutter nach dem jeweiligen Laktationszustand zugeteilt werden, läßt sich hierüber keine präzise Mineralstoffsupplementierung für die gesamte Herde (bei unterschiedlichen Abkalbeterminen erreichen). Dementsprechend sollten sich die Spurenelementgehalte im Milchleistungsfutter an den für Alleinfuttermittel empfohlenen Werten orientieren. Die bei den Betrieben 1 und 3 ermittelten Zinkgehalte im Milchleistungsfutter überstiegen den genannten Wert von LÜPPING (2002) und den von GfE (1995/2001) empfohlenen Richtwert (20-65 mg kg⁻¹ Futtertrockenmasse) mit durchschnittlich 152 mg Zink kg⁻¹ TM allerdings erheblich.

Durch die Untersuchungen bei den Betrieben 1 und 3 wurde deutlich, daß ein erhebliches Reduktionspotential des Kupfereintrages in der Vermeidung und Verringerung des **Kupfervitrioleinsatzes zur Klauenhygiene** zu sehen ist. Dies gilt besonders dann, wenn, wie bei Betrieb 1, die verschmutzte Lösung, die als Klauenbad fungierte, über die Gülle entsorgt wird. Eventuell ist eine Applikation mittels Besprühen der Klauen, wie es bei Betrieb 3 praktiziert wurde, mit Blick auf die Vermeidung von Kupfer- aber auch Nিকেleinträgen in den Wirtschaftsdünger das zu bevorzugende Verfahren. Fraglich ist dann allerdings die komplette Benetzung der gesamten Klaue, die gewährleistet sein sollte. Zur Nachbehandlung und Prophylaxe von Dermatitis digitalis (Montellaro-Krankheit) sind Klauenbäder mit Desinfektionsmittellösungen geeignet (HERNANDEZ & SHEARER, 2000). Klauenbäder stellen aber keinen Ersatz für mangelhafte Hygiene dar (KOFLER, 2001). Da Dermatitis digitalis ansteckend ist, ist das Infektionsrisiko in größeren Herden höher als in kleineren (KOFLER, 2001). Andere Klauenbäder sind u. a. 10 - 20 %-ige Zinksulfatlösungen, die aber aus Sicht eines verminderten Schwermetalleintrages in das System keine Alternative darstellen. Sofern auf Klauenbäder mit Kupfer- oder Zinklösungen nicht gänzlich verzichtet werden kann, müßte in jedem Falle sichergestellt sein, daß die gebrauchte Restflüssigkeit nicht über die Wirtschaftsdünger entsorgt wird.

Die Rolle der **verzinkten Stalleinrichtung** für den bewirtschaftungsbedingten Schwermetall-

eintrag in das System spielte dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Lediglich für Zink ist er als erwähnenswert anzusehen. Zwar sind hierzu auf den Betrieben 1, 2 und 4 keine Untersuchungen angestellt worden, angesichts der recht ähnlichen Aufstellungsform bei den Betrieben 1 und 2 ist hier nicht von wesentlich abweichenden Eintragspotentialen auszugehen. Besonders hohe Abnutzung der Legierungsschicht trat demnach v.a. dort auf, wo das Material korrosiven Stoffen wie Harn, Kot und feuchten Futtermitteln ausgesetzt waren. Am gravierendsten waren die Abtragsraten an solchen Stellen, die dauerhaft feucht blieben und z.B. aufgrund von Kotverschmutzungen nicht mehr abtrocknen konnten. Dort wo Gummierungen das Metall schützten, war keine Abnutzung der Verzinkung zu registrieren. Üblicherweise fanden sich diese an Übergängen einbetonierter Elemente in den freien Raum. Dabei handelte es sich immer um ummantelte Rohreisen. Hingegen waren U-Eisen nie durch Gummierung geschützt. Der Grund hierfür liegt darin, daß sich die beim Einbau angelegten Gummimanschetten nicht problemlos an die Profilform anpassen lassen. Würde man aber vom Werk her gummierte U-Profile einsetzen, erscheint dies unproblematisch. Auch an Freßgitterelementen, die der starken mechanischen Belastung durch Reibung mit dem Tierkörper ausgesetzt waren (Klappbügel und Nackenrohr) war die Legierung dementsprechend z.T. vollständig abgenutzt. Auch hier könnte die Ummantelung mit geeigneten Plastikmaterialien den Verschleiß der Verzinkung verhindern bzw. einschränken.

Der überwiegende Anteil am Eintrag der unerwünschten Schwermetalle Cadmium, Chrom, Nickel und Blei resultierte aus dem **Einsatz wirtschaftseigener und zugekaufter Futtermittel**. Dabei trugen die Zukauffuttermittel besonders zum Eintrag der Elemente Chrom und Nickel (v.a. Sojaschrot) bei. Sofern Preßschnitzel eingesetzt wurden (Betriebe 1 und 3), wurden hierüber auch zu den Einträgen aus Grundfuttermitteln vergleichbare Mengen an Cadmium und Blei in den Stall eingetragen. Auf die Rolle der Milchleistungsfutter wurde bereits zuvor eingegangen.

Die in den Stall gelangenden Schwermetallfrachten über wirtschaftseigene Futtermittel sind als **interner Stoffkreislauf** zu betrachten. Sie führen also nicht zu einer Anreicherung auf der landwirtschaftlichen Produktionsfläche. Allenfalls kann es über die Wirtschaftsdünger zu Umverteilungen des Rückflusses auf die Fläche kommen, sofern der/die Wirtschaftsdünger alle betriebsintern verwertet werden. Die über wirtschaftseigene Futtermittel eingetragenen Schwermetallfrachten sind daher in erster Linie aus Sicht der Tierernährung und -gesundheit einschließlich einer evtl. auftretenden Rückstandsproblematik in tierischen Erzeugnissen kritisch zu betrachten. Lokal können hier tatsächlich Probleme auftreten, wie z.B. in der Mechnicher Trias Bucht, wo in der Vergangenheit infolge hoher Bleigehalte in den

Aufwüchsen beim Weidevieh immer wieder toxische Indikationen mit häufig letalem Verlauf (besonders direkt nach Frühjahrsauftrieb) auftraten. Durch landwirtschaftliche Fachberatung, den Einsatz moderner Futterbergetechnik sowie den Anbau von Silomais anstatt den sehr stark schmutzbehafteten Futterrüben konnte das Problem in den letzten 20 Jahren minimiert werden. Für Blei, Cadmium und Nickel waren die wirtschaftseigenen Futtermittel (sofern Grasprodukte verfüttert wurden) die Haupteintragsquelle. Aber auch für Chrom stellen sie bei der Verfütterung von Grasprodukten (unabhängig ob als Saft- oder als Rauhfutter) ein relativ hohes Eintragspotential dar. Je mehr Grasprodukte also gefüttert wurden, desto höher lag auch der Beitrag der wirtschaftseigenen Futtermittel an den Einträgen dieser Elemente in den Stall. Ein wesentlicher Grund sind die höheren Rohaschegehalte infolge höherer Schmutzanteile bei den Anwelksilagen und Heu gegenüber den anderen hier eingesetzten wirtschaftseigenen Futtermitteln. Laut Futteruntersuchung der LUFA-BONN (1999-2001) wurden für Anwelksilagen dieser Futterbetriebe durchschnittliche Rohaschegehalte von 9,5 % in der TM ermittelt. Für der Futtermitteluntersuchung zugeführte Maissilagen wurden durchschnittlich lediglich 4,2 % Rohasche in der TM festgestellt. Damit entsprachen die hier untersuchten Wirtschaftsfuttermittel den Ziel- und Orientierungswerten der LUFA-BONN (2000).

Für die signifikant höheren Kupferaus- als Kupfereinträge bei Betrieb 1 liegt die Vermutung nahe, daß die Verwendung von Kupfersulfat unregelmäßiger war als die vorliegenden Einkaufsbelege dieses widerspiegeln. Für die bei Betrieb 3 signifikant höheren Austräge an Chrom kommt als Erklärungsansatz der Materialabrieb, der durch die Verwendung eines Futterentnahmegertes mit Verteilfräse sowie Kratzboden und Entnahmeschere geschah, in Frage. Dieser lag bei dieser Futterentnahmetechnik und dem starken Rauhfuttereinsatz wahrscheinlich höher als bei den anderen Betrieben. Auch die anderen Betriebe, v.a. 1 und 2, zeigten tendenziell höhere Chromausträge als Chromeinträge. Diese ließen sich allerdings nicht statistisch absichern. Bei Betrieb 4, dessen Entnahmetechnik bei ausschließlicher Verwendung von Mais- und Nebenprodukten aus der Nahrungsmittelproduktion nicht stark strapaziert wurde, war das Saldo der Chrombilanz dagegen sehr gering. Auch dieser Umstand nährt die Vermutung des Chromeintrages durch Abrieb an Geräten für die Futterentnahme/-mischung und/oder -vorlage. Der signifikant höhere Austrag an Blei gegenüber dem Eintrag bei Betrieb 1 sowie die ebenfalls signifikant höheren Austräge für Zink und Nickel bei Betrieb 4 können nicht abschließend geklärt werden. Denkbar wären in diesem Zusammenhang zusätzliche, nicht erfaßte Einträge wie eingeleitete Wässer von befestigten Hofflächen. Diese Position dürfte aber kaum einen ausreichenden Erklärungsansatz bieten. Folgende Simulationen wurden hierzu bei Betrieb 1 vorgenommen: Es wurde davon

ausgegangen, daß durch Waschwasser von Landmaschinen 100 kg standortüblicher Ackerboden über die Regenwassereinleitung in die Gülle gelangt. Für Blei hätte dies lediglich einen Anstieg des Austrages um weniger als 1 % zur Folge. Ebenfalls dürfte sich bei einer potentiellen Zinkabtragsrate von $10 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{a}$ an den verzinkten Dachrinnen von Betrieb 1 dies mit maximal $1 \text{ g Zink GV}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ nur unwesentlich auswirken. Ebenfalls ungeklärt bleibt der signifikant niedrigere Austrag gegenüber dem Eintrag an Cadmium bei Betrieb 4.

5.1.2.2 Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung

5.1.2.2.1 Schwermetallgehalte

Die in die Veredelung fließenden ackerbaulichen Erzeugnisse von Betrieb 7 zeigt Tab. 5-50. Dieses beinhaltet sowohl die als Futtermischungskomponenten **eingesetzten Getreidearten** einschließlich **CCM**, als auch das zur Einstreu verwendete Weizen- und Gerstenstroh.

Tab. 5-50: Schwermetallgehalte wirtschaftseigener Futtermittel und Stroh (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Erzeugnis	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
7	8	Winterweizen	0,16 ± 0,04	0,12 ± 0,11	3,06 ± 0,51	0,11 ± 0,14	0,18 ± 0,22	26,2 ± 8,4
7	6	Triticale	0,08 ± 0,02	0,05 ± 0,03	3,89 ± 2,09	0,43 ± 0,33	0,10 ± 0,08	37,2 ± 9,3
7	5	Gerste	0,04 ± 0,01	0,11 ± 0,06	2,47 ± 1,56	0,11 ± 0,05	0,15 ± 0,04	32,8 ± 15,0
7	9	Hafer	0,10 ± 0,01	0,35 ± 0,38	3,71 ± 0,43	0,71 ± 0,23	0,15 ± 0,02	29,5 ± 4,7
7	5	CCM	0,16 ± 0,01	0,07 ± 0,03	2,84 ± 4,20	0,18 ± 0,14	0,07 ± 0,02	22,9 ± 5,0
6	35	Weizenstroh	0,17 ± 0,06	0,49 ± 0,10	2,38 ± 0,43	0,49 ± 0,51	0,58 ± 0,20	6,98 ± 2,44
7	14	Weizenstroh	0,28 ± 0,09	0,67 ± 0,26	3,05 ± 0,76	0,63 ± 0,16	0,56 ± 0,12	17,0 ± 14,0
7	15	Gerstenstroh	0,09 ± 0,02	0,87 ± 0,41	4,55 ± 3,21	0,66 ± 0,41	0,65 ± 0,09	9,96 ± 2,24

± Standardabweichung

Insgesamt waren die ermittelten Gehalte vergleichbar mit denen der Literatur (WILCKE & DÖHLER, 1995; BRÜGGEMANN, 1999). Die Gehalte der essentiellen Elemente Kupfer und Zink in den Körnern der unterschiedlichen Getreidearten lagen in der gleichen Größenordnung. Die Bleigehalte im Weizen- und Gerstenstroh waren im Vergleich zu denen der Körner bedeutend höher.

Betrieb 6 setzte keine wirtschaftseigenen Futtermittel ein. Schlecht zu vermarktende Absetzer

wie Kümmerer oder Zwitter wurden selbst im Betrieb auf Einstreu ausgemästet.

Tab. 5-51 sind die Schwermetallgehalte der **zugekauften Einzelfuttermittel und Mineralfutter** zu entnehmen, die auf Betrieb 7 eingesetzt wurden.

Tab. 5-51: Schwermetallgehalte in zugekauften Einzelfuttermitteln, Mineralfuttermitteln und mineralisiertem Eiweißergänzer, Betrieb 7 (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Futtermittel	Cd	Cr	mg kg ⁻¹ TM			Zn
					Cu	Ni	Pb	
7	5	Sojaschrot	0,06 ± 0,04	0,66 ± 0,21	12,9 ± 8,3	3,51 ± 2,66	0,21 ± 0,06	51,5 ± 6,4
7	4	Fischmehl	0,40 ± 0,21	1,47 ± 0,95	4,32 ± 4,23	1,64 ± 0,55	0,84 ± 0,83	89,6 ± 0,5
7	5	Weizenkleie	0,13 ± 0,02	0,60 ± 0,25	10,4 ± 3,3	0,55 ± 0,19	0,41 ± 0,20	87,0 ± 20,1
7	3	Mineralisierter Eiweißergänzer für Mastschweine	0,14 ± 0,02	2,43 ± 2,44	125 ± 10	4,02 ± 1,28	0,55 ± 0,27	392 ± 132
7	4	Mineralstoff für Sauen	1,56 ± 0,97	55,0 ± 29,0	734 ± 387	14,3 ± 2,3	3,60 ± 0,77	2361 ± 120
7	3	Mineralstoff für Ferkel	0,29 ± 0,27	24,0 ± 30,6	3133 ± 104	11,6 ± 7,3	6,91 ± 3,25	3648 ± 688
7	2	Mineralstoff für Mastschweine	0,76 ± 0,10	17,8 ± 0,2	818 ± 625	16,6 ± 8,4	3,72 ± 2,64	4818 ± 479

± Standardabweichung

Die Mineralstoffe und das mineralisierte proteinhaltige Ergänzungsfuttermittel (Eiweißergänzer) wiesen die höchsten Gehalte an den Spurenelementen Kupfer und Zink auf. Die Proben der Mineralstoffe zeigten darüber hinaus auch höhere Gehalte an den Schwermetallen Nickel und Blei, besonders aber an Chrom, auf.

Die Standardabweichungen bei den Einzelfuttermitteln lagen zum Teil sehr hoch, wie z.B. beim Kupfergehalt der Fischmehlproben (Variationskoeffizient > 90 %). Obwohl diese Schwankungen sowohl bei den zugekauften als auch den wirtschaftseigenen Futtermitteln auftraten, waren die Standardabweichungen bei den Schwermetallgehalten in den Futtermischungen bzw. **Alleinfuttermitteln** vergleichsweise gering (Tab. 5-52).

Die höchsten Zinkgehalte waren in der Gruppe der Futtermittel zu finden, die während der Säugeperiode eingesetzt werden. Die in der Mast, insbesondere die im Endmastbereich eingesetzten Futtermittel, wiesen tendenziell geringere Mengen an Zink auf.

Sehr deutlich waren die Abstufungen der Kupfergehalte bei den unterschiedlichen Haltungsgruppen. Die Kupfergehalte in Ergänzungsfuttermitteln für Saugferkel (Prestarter) waren am höchsten, gefolgt von den Gehalten in den Alleinfuttermitteln für Aufzuchtferkel. Dieser Trend setzte sich bei den zwei eingesetzten Mastfuttern von Betrieb 7 fort: Mit

zunehmendem Gewicht der Tiere waren die Kupfergehalte in den Futtermischungen niedriger. Gemäß den futtermittelrechtlichen Vorschriften gelten ab der 17. Lebenswoche geringere Kupfergehalte in Alleinfuttermitteln für Mastschweine.

Betrieb 6 setzte für die Fütterung der wenigen selbst gemästeten Tiere ausschließlich Alleinfutter für die Endmast ein.

Die Kupfergehalte befanden sich bei den entsprechenden Haltungsgruppen der Betriebe auf gleichem Niveau (siehe Prestarter- und Endmastfutter). Lediglich das selbstgemischte Sauenfutter und das ebenfalls selbstgemischte Vormastfutter enthalten bei Betrieb 7 höhere Kupfergehalte als die zugekauften Sauenfutter von Betrieb 6 bzw. das Vormastfutter von Betrieb 8 (allerdings kleiner Stichprobenumfang n=3)

Tab. 5-52: Schwermetallgehalte in zugekauften (Betrieb 6) und selbstgemischten (Betrieb 7) Alleinfuttermitteln (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Fütterungsgruppe	mg kg ⁻¹ TM					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
6	4	Saugferkel (Prestarter)	0,15 ± 0,02	0,95 ± 0,11	181 ± 8	1,04 ± ,12	0,15 ± 0,08	204 ± 18
7	2	Saugferkel (Prestarter)	0,13 ± 0,02	1,48 ± 1,38	185 ± 8	1,72 ± 0,29	0,287 ± 0,08	273 ± 34
6	5	Aufzuchtferkel (Absetzer)	0,11 ± 0,03	1,51 ± 0,70	104 ± 47	2,13 ± 1,68	0,60 ± 0,23	185 ± 36
7	6	Aufzuchtferkel (Absetzer)	0,13 ± 0,05	1,38 ± 0,77	117 ± 60	1,32 ± 0,69	0,34 ± 0,18	149 ± 49
6	5	Sauen (güst/tragend)	0,11 ± 0,03	0,60 ± 0,28	33,4 ± 3,8	1,11 ± 0,39	0,60 ± 0,34	193 ± 22
6	5	Sauen (laktierend)	0,10 ± 0,03	0,97 ± 0,38	38,2 ± 22,9	2,17 ± 1,29	0,50 ± 0,19	231 ± 42
7	5	Sauen (gesamt)	0,18 ± 0,08	1,91 ± 1,47	79,8 ± 44,4	1,29 ± 0,22	0,42 ± 0,18	169 ± 44
7	6	Vormast	0,14 ± 0,04	1,46 ± 0,58	79,4 ± 56,4	1,55 ± 0,64	0,26 ± 0,09	247 ± 92
8	3	Vormast	0,13 ± 0,01	0,10 ± 0,14	34,2 ± 3,0	1,38 ± 0,21	0,28 ± 0,02	173 ± 10
6	3	Endmast	0,09 ± 0,01	1,21 ± 1,33	39,8 ± 3,0	1,37 ± 0,87	0,72 ± 0,38	114 ± 7
7	5	Endmast	0,12 ± 0,02	0,97 ± 0,27	31,7 ± 6,5	1,22 ± 0,24	0,17 ± 0,07	148 ± 29
8	6	Endmast	0,08 ± 0,01	1,09 ± 0,24	30,5 ± 5,9	1,54 ± 0,48	0,25 ± 0,10	149 ± 11

± Standardabweichung

Das auf beiden Veredelungsbetrieben genutzte hofeigene **Brunnenwasser** wies nahezu identische Schwermetallkonzentrationen auf (Tab. 5-53). Als nennenswerte Anteile sind nur Zink und Blei, vermutlich aus der Verrohrung, zu nennen.

Tab. 5-53: Schwermetallkonzentrationen in Wasser zur Tränke und Desinfektion (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Wasser	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
6	5	Brunnenwasser	n.n.	0,01 ± 0,00	n.n.	0,01 ± 0,02	0,03 ± 0,08	0,22 ± 0,10
7	6	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	0,01 ± 0,02	n.n.	0,03 ± 0,04	0,24 ± 0,11
8		Brunnenwasser	n.n.	n.n.	0,01 ± 0,02	n.n.	0,03 ± 0,04	0,24 ± 0,11

± Standardabweichung

n.n.: nicht nachweisbar

Die Tabellen 5-54 und 5-55 zeigen die Schwermetallgehalte in den **Wirtschaftsdüngern**. Für die später folgende Stallbilanzierung wurde jeweils mit den Wirtschaftsdüngern aus dem Gesamtstall gerechnet, weil nur darüber eine genaue Mengenermittlung vorlag.

Tab. 5-54 gibt Auskunft über untersuchte Schwermetallgehalte in **Flüssigmist**.

Tab. 5-54: Schwermetallgehalte von Flüssigmist (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Wirtschaftsdünger/ Tiergruppe	As (n=1)	Cd	Cr	Cu	Hg (n=1)	Ni	Pb	Zn
6	19 ¹	Gülle Gesamtstall	1,58	0,49 ± 0,13	14,6 ± 7,1	736 ± 102	0,06	11,5 ± 4,0	11,8 ± 5,9	2061 ± 343
6	3 ¹	Gülle Absetzer	n.u.	0,33 ± 0,02	3,47 ± 1,30	1123 ± 17	n.u.	11,1 ± 5,8	5,08 ± 1,41	1597 ± 217
6	3 ¹	Gülle Sauen (säugend)	n.u.	0,22 ± 0,01	1,95 ± 0,75	167 ± 16	n.u.	6,51 ± 3,37	4,16 ± 1,07	1220 ± 97
6	5 ¹	Gülle Sauen (güst/trag.)	n.u.	0,38 ± 0,11	2,77 ± 1,98	123 ± 46	n.u.	4,67 ± 1,55	2,78 ± 0,96	897 ± 93
8	17 ¹	Gülle/Mastschweine	n.n.	0,61 ± 0,09	12,4 ± 6,4	216 ± 8	0,02	12,6 ± 1,8	3,67 ± 0,94	1113 ± 156

± Standardabweichung

¹As und/oder Hg (n=1)

n.u.: nicht untersucht

n.n.: nicht nachweisbar

trag.: tragend

Auffällig war, daß der Flüssigmist des Gesamtstalles von Betrieb 6 höhere Chrom- und Zinkgehalte aufwies als die Einzelgülle der Tierkategorien. Dies galt abgeschwächt auch für die Elemente Cadmium und Blei. Der Zinkgehalt in der Mischgülle des Gesamtstalles von Betrieb 6 überstieg auch die bei KERSCHBERGER ET AL. (2001) aufgeführten Spannweiten. Die Gülle aus den einzelnen Stallabteilen, die damit nach Tierkategorie unterschieden werden konnten, wurde bei Ablassen aus dem Stall in einer Vorgrube aufgefangen. Bis zur Beprobung der Gesamtgülle bei Ausbringung vergingen noch mehrere Monate, so daß die erhöhten Gehalte in der Gesamtgülle wahrscheinlich infolge von Aufkonzentration durch Gärung und Atmung während der Lagerung zustande kamen.

Die Elementgehalte von Gülle spezifizierter Tierkategorien bewegten sich in ähnlichen Größenordnungen wie die genannten Spannweiten von KERSCHBERGER ET AL. (2001).

Darüber hinaus war festzustellen, daß nach Haltungsgruppen systematische Differenzierungen hinsichtlich des Schwermetallgehaltes vorlagen. Die Kupfergehalte in den Wirtschaftsdüngern nahmen ebenso wie bei den Alleinfuttermitteln, mit zunehmendem Lebensalter der Tiere ab. Dies war auch für die Zinkgehalte in der unterschiedlichen Gülle von Betrieb 6 und 7 zu beobachten. Die Zinkgehalte in der Gülle der Aufzuchtferkel (Betrieb 6) waren höher als die Gehalte in der Sauengülle.

Die gemessenen Arsen- und Quecksilbergehalte der Gesamtgülle von Betrieb 6 deckten sich mit denen von KTBL (2000). Die Quecksilbergehalte in der Mastschweinegülle von Betrieb 8 lag unter dem genannten Wert von durchschnittlich $0,05 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ dieser Literaturstelle.

Tab. 5-55 zeigt die gemessenen Schwermetallgehalte der untersuchten Festmist- und Jaucheproben.

Tab. 5-55: Schwermetallgehalte in Festmist und Jauche (Schweinehaltung)

Betrieb	n	Wirtschaftsdünger/ Tiergruppe	As (n=1)	Cd	Cr	Cu	Hg (n=1)	Ni	Pb	Zn
7	10 ¹	Mist Gesamtstall	0,3	0,49 ± 0,13	10,3 ± 9,2	152 ± 83	0,08	5,37 ± 5,61	2,96 ± 2,16	508 ± 216
7	11 ¹	Mist Absetzer	n.u.	0,40 ± 0,16	6,53 ± 1,50	452 ± 396	n.u.	6,15 ± 2,55	1,90 ± 1,90	626 ± 686
7	13 ¹	Mist Sauen (säugend)	n.u.	0,246 ± 0,10	4,36 ± 1,85	65,3 ± 75,2	n.u.	3,79 ± 2,05	1,52 ± 0,86	350 ± 318
7	9 ¹	Mist Sauen (güst/tragend)	n.u.	0,35 ± 0,07	4,62 ± 2,03	80,2 ± 18,7	n.u.	3,00 ± 1,27	2,02 ± 1,42	294 ± 66
6	1	Mist Sauen (güst/tragend)	n.u.	0,29	3,21	99,0	n.u.	3,75	1,79	394
7	13 ¹	Mist Vormast	n.u.	0,36 ± 0,13	17,0 ± 39,7	207 ± 110	n.u.	5,15 ± 3,68	1,07 ± 0,41	505 ± 192
7	13 ¹	Mist Endmast	n.u.	0,31 ± 0,05	34,4 ± 71,2	153 ± 239	n.u.	5,24 ± 4,21	1,97 ± 2,07	464 ± 147
7	3 ¹	Jauche	n.u.	0,64 ± 0,21	14,5 ± 4,6	119 ± 104	n.u.	10,9 ± 1,7	9,55 ± 4,15	538 ± 245

± Standardabweichung ¹As und/oder Hg (n=1) n.u.: nicht untersucht

Die hohen Chromgehalte im Schweinemist aus den Bereichen „Vor- und Endmast“ (Betrieb 7) waren auffällig. Sie resultierten aus hohen Gehalten in den Proben eines einzelnen Beprobungstermines. Im Nachhinein stellte sich heraus, daß der Landwirt nach der Grundsäuberung und Desinfektion der Ställe vor Neubelegung die Stallungen mit Hütten- oder Konverterkalk einstreute. Dies erklärt die hohen Gehalte in den Mistproben dieses Termines. In der auf Betrieb 7 anfallenden Jauche wurden in der Trockenmasse höhere Cadmium-, Nickel- und Bleigehalte als in Festmist festgestellt. Zu beachten ist allerdings der geringe Stichprobenumfang.

Die festgestellte Quecksilberkonzentration in der untersuchten Mistprobe war im Vergleich zu einem bei KTBL (2000) erwähnten Gehalt von $0,02 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ als hoch anzusprechen.

5.1.2.2.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung

Abb. 5-10 gibt Auskunft über die prozentualen Anteile der Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in die Gesamtställe der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe (Betrieb 6: **Ferkelerzeugung**; Betrieb 7: **Ferkelerzeugung und Schweinemast im geschlossenen System**; Betrieb 8: **Schweinemast**).

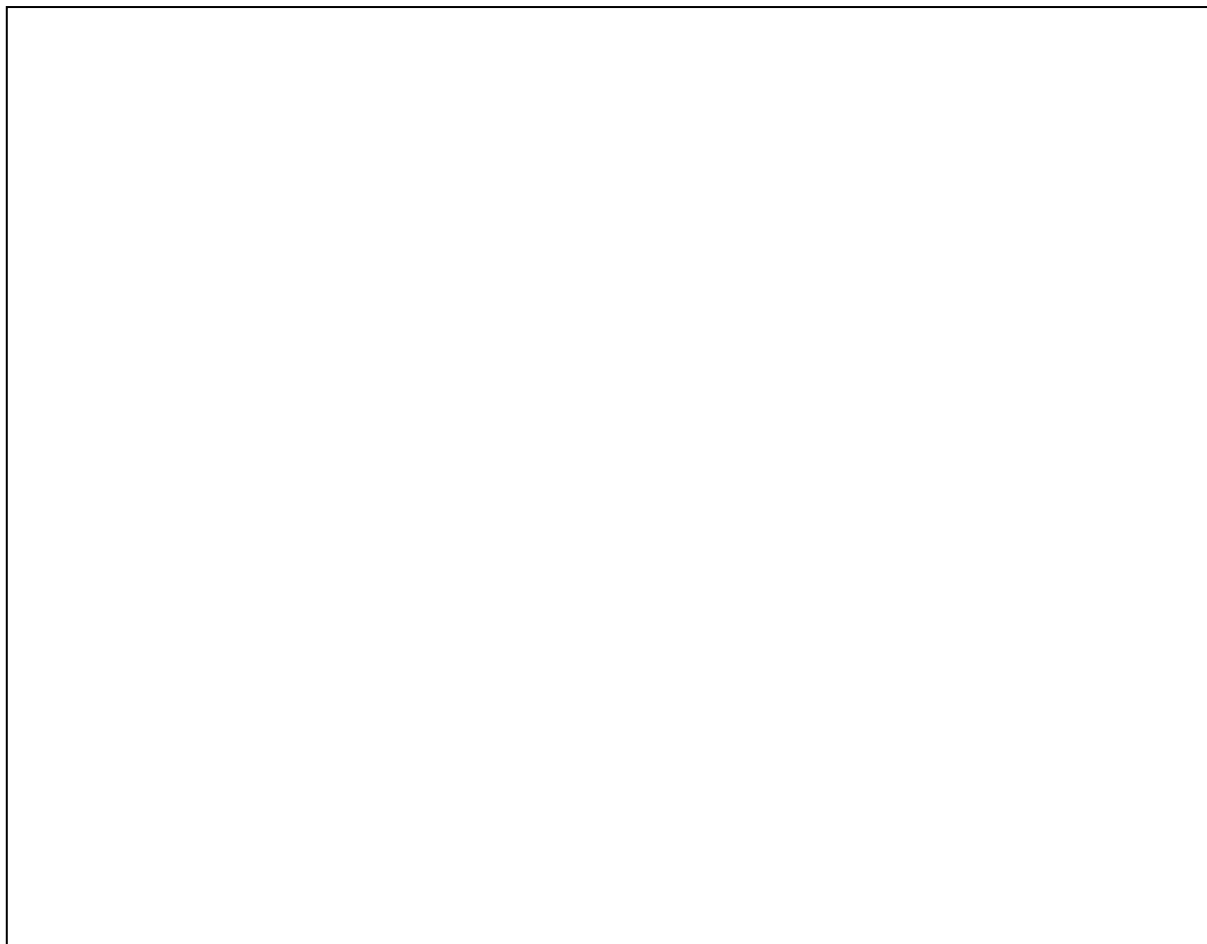


Abb. 5-10: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in die Gesamtställe der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe [%]

Bei Betrieb 6 (Ferkelerzeugung) und Betrieb 8 (Mastschweine) wurden ausschließlich zugekaufte Mischfuttermittel eingesetzt. Ihr Anteil am Schwermetalleintrag in den Stall überwog. Betrieb 8 arbeitete gänzlich ohne Einstreu, bei Betrieb 6 wurden lediglich die im Deckzentrum aufgestellten Sauen eingestreut, weshalb auch die Anteile des Weizenstrohs am Schwermetallinput gering waren. Lediglich das verwendete Brunnenwasser zur Tränke und Desinfektion war mit ca. 15 - 20 % am Bleieintrag in die Ställe dieser beiden Betriebe

beteiligt. Dies galt auch für Betrieb 7 (vgl. Tab. 5-56 und 5-57). Bei Betrieb 7 trug das verwendete Weizen- und Gerstenstroh mit Anteilen von rund 40 % für Cadmium und 30 % für Blei am bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag in den gesamten Stall bei und findet sich im Eintragspfad „Sonstige Betriebsmittel“ wieder. Der Anteil der wirtschaftseigenen Futtermittel am Schwermetallinput war bei Betrieb 7, mit Ausnahme von Kupfer und Zink, geringer als der über das Stroh. Die Zukauffuttermittel besaßen bei den Elementen Chrom und Nickel Anteile von weit über 50 %, bei Kupfer und Zink von über 90 % des bekannten Schwermetalleintrages in den Stall. Da es sich bei den zugekauften protein- und energiehaltigen Futtermitteln zu einem nicht unerheblichen Anteil um eine bereits mineralisierte Eiweißvormischung (proteinhaltiges Ergänzungsfuttermittel für die Endmast) handelte, ist der Anteil der Mineralfuttermittel an den Eintragspfaden als höher anzusehen, als dies durch Abb. 5-10 deutlich wird. Gegenüber den beiden ferkelerzeugenden Betrieben fiel die Remontierung bei Mastbetrieb 8 stärker ins Gewicht. Sie hatte für den Bleieintrag ihren maximalen Anteil von ca. 5 %.

Stallbilanzen

Tab. 5-56 zeigt die einzelnen bekannten Ein- und Austragswege verschiedener Schwermetalle für die Stallbilanz des **Betriebes 6 (spezialisierte Ferkelerzeugung)** [g GV⁻¹ a⁻¹].

Auffallend waren bei Betrieb 6 besonders die Eintragsmengen der einzelnen zugekauften Mischfuttermittel. Die Einträge über das Ergänzungsfuttermittel für Saugferkel (Prestarter) waren aufgrund der geringen Futtermenge fast zu vernachlässigen. Das größte Eintragspotential für alle Schwermetalle unter den Zukauffuttermitteln besaß das Alleinfuttermittel für Aufzuchtferkel; hinsichtlich der Kupfereinträge lag der Anteil dieses Futtermittels bei über 65 % des Gesamteintrages. Lediglich Zink gelangte zu einem noch höheren Maße durch das Alleinfutter für güste/tragende Sauen in das System Stall. Die Position „Zukauf Tier“ spielte für den Eintrag nur eine untergeordnete Rolle.

Die Gülle stellte den Hauptaustragspfad für die Schwermetalle aus dem Stall dar. Da der Stallmist auf diesem Betrieb nur in geringen Mengen anfiel, waren die ausgetragenen Schwermetallmengen geringer, lagen aber dennoch beispielsweise bei 86 g Zink GV⁻¹ a⁻¹.

Der Tierkörper war hinsichtlich des Schwermetallaustrages für die Elemente Nickel und Blei mit ca. 5 bis 10 %, bei Zink mit 4 % und bei Chrom noch mit 2 % am Gesamtaustrag beteiligt. Für Kupfer betrug dieser Anteil dagegen weniger als 1 %.

Tab. 5-56: Stallbilanz, Betrieb 6 (Ferkelerzeugung)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Alleinfutter Aufzuchtferkel	0,18	2,45	169,3	3,46	0,98	300,5
	Alleinfutter Endmast	0,02	0,27	7,0	0,31	0,16	25,7
	Alleinfutter Sauen (säugend)	0,07	0,65	25,8	1,46	0,34	156,0
	Alleinfutter Sauen (güst/tragend)	0,18	0,97	38,5	1,79	0,97	311,9
	Ergänzungsfutter Saugferkel (Prestarter)	0,001	0,01	1,0	0,01	0,001	1,7
Sonstige Betriebsmittel	Stroh	0,05	0,13	0,7	0,13	0,16	1,9
	Wasser ²	0,00 ⁴	0,21	0,00 ⁴	0,15	0,80	6,7
Zukauf Tier		0,002	0,01	0,2	0,04	0,02	2,9
Summe Eintrag		0,50	4,70	243	7,35	3,43	807
<i>Gesamtfehler Eintrag</i>		<i>0,07</i>	<i>1,09</i>	<i>53,5</i>	<i>2,12</i>	<i>1,02</i>	<i>71,4</i>
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,04	0,18	3,3	0,63	0,36	49,8
Wirtschaftsdünger	Mist ³	0,06	0,70	21,5	0,81	0,39	85,6
	Gülle	0,26	7,79	394,4	6,16	6,32	1103,9
Summe Austrag		0,36	8,67	419	7,60	7,07	1239
<i>Gesamtfehler Austrag³</i>		<i>0,10</i>	<i>2,66</i>	<i>115,2</i>	<i>2,13</i>	<i>2,13</i>	<i>336,8</i>
Bilanzsaldo		0,14	-3,96*	-176*	-0,25	-3,64*	-432*

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag) ² Tränke, Reinigung ³ mittlerer Fehler für Stallmist: 20 %

⁴ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Betrieb 7 lieferte durch die hofeigenen Futtermischungen ein detailliertes Bild über die Schwermetalleinträge der einzelnen Futterkomponenten in den Stall. Tab. 5-57 zeigt die Schwermetallbilanz des Gesamtstalles von **Betrieb 7 (Ferkelerzeugung und Mast im geschlossenen System)**.

Die Mineralfuttermittel trugen hohe Mengen an Chrom, Kupfer und Zink ein. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang auch das mineralisierte Ergänzungsfuttermittel (Eiweißergänzer), das in der Endmast eingesetzt wurde und über das die höchsten Einträge an Chrom, Kupfer, Nickel und Zink in den Stall erfolgte. Bei den wirtschaftseigenen Futtermitteln fielen lediglich die eingetragenen Frachten an Cadmium und Zink (Gerste und Weizen) auf. Durch den Proteinträger Sojaschrot gelangte außerdem ein relativ großer Anteil von ca. 1,4 g Nickel GV⁻¹ a⁻¹ in den Stall. Bei den Austrägen zeigte sich, daß die im Betrieb 7 anfallende Jauche gegenüber dem Stallmist und dem Tierkörperaustrag nur eine untergeordnete Rolle spielte; nur ungefähr 2 g GV⁻¹ a⁻¹ Kupfer wurden hierüber ausgetragen. Der Mist wies für alle Elemente die größten Austräge aus dem Stall von Betrieb 7 auf.

Tab. 5-57: Stallbilanz, Betrieb 7 (Ferkelerzeugung, Schweinemast)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Wirtschaftseigene Futtermittel	CCM	0,002	0,01	0,3	0,02	0,01	2,2
	Gerste	0,05	0,14	3,1	0,13	0,19	41,6
	Hafer	0,01	0,04	0,4	0,08	0,02	3,5
	Triticale	0,01	0,01	0,7	0,07	0,02	6,3
	Weizen	0,23	0,17	4,4	0,16	0,26	37,6
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Fischmehl	0,02	0,07	0,2	0,08	0,04	4,7
	Gerste	0,02	0,06	1,4	0,06	0,09	18,7
	Ergänzer Endmast ¹	0,10	1,68	86,4	2,78	0,38	270,8
	Sojaschrot	0,02	0,27	5,2	1,42	0,08	20,8
	Weizenkleie	0,01	0,03	0,5	0,03	0,02	4,1
Zukauffuttermittel (Mineral)	Mineral Ferkel	0,01	0,64	83,7	0,31	0,10	63,1
	Mineral Sauen	0,05	1,77	23,6	0,46	0,22	117,2
	Mineral Vormast	0,03	0,64	29,5	0,60	0,13	173,3
Sonstige Betriebsmittel	Stroh	0,37	1,41	6,9	1,2	1,12	25,9
	Wasser ²	0,00 ³	0,00 ³	0,2	0,00 ³	0,72	5,1
Zukauf Tier		0,001	0,004	0,1	0,01	0,01	1,1
Summe Eintrag		0,93	6,94	247	7,41	3,41	796
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		<i>0,14</i>	<i>2,38</i>	<i>42,7</i>	<i>1,77</i>	<i>0,92</i>	<i>121</i>
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,05	0,23	4,3	0,82	0,47	64,9
	Wirtschaftsdünger						
	Mist	0,96	20,04	295,2	10,43	5,76	986,9
	Jauche	0,003	0,06	0,5	0,04	0,04	2,1
Summe Austrag		1,01	20,3	300	11,3	6,27	1054
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		<i>0,22</i>	<i>7,01</i>	<i>79,9</i>	<i>4,16</i>	<i>1,84</i>	<i>250,2</i>
Bilanzsaldo		-0,08	-13,4*	-53,0	-3,89	-2,86*	-258

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)² Tränke, Reinigung¹ Eiweißergänzungsfutter (mineralisiert) Endmast³ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Tab. 5-58 zeigt den Schwermetallumsatz im **Mastschweinestall** von Betrieb 8.

Die Gesamteinträge lagen bei allen Elementen auf niedrigerem Niveau als bei den ferkelerzeugenden Betrieben. Ursächlich hierfür waren die geringeren Frachten via Fütterung. Für die essentiellen Spurenelemente Kupfer und Zink lag der Eintrag bei rund der Hälfte bzw. rund $\frac{3}{4}$ des Eintrages der Betriebe 6 und 7. Die höchsten Eintragsanteile resultierten aus dem am längsten verabreichten Mastfutter (Phase II). Auch bei Betrieb 7 (geschlossenes System) steuerte dieser Handlungsabschnitt aufgrund der mengenmäßig am stärksten eingesetzten Futtermittel (mineralisiertes proteinhaltiges Ergänzungsfuttermittel) den höchsten Eintragsanteil für die Spurenelemente Kupfer und Zink bei. Auch die Bleifracht, die über das verwendete Tränke- und Reinigungswasser zustande kam, lag mit $0,23 \text{ g GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bedeutend niedriger als bei den beiden anderen schweinehaltenden Veredelungsbetrieben

Tab. 5-58: Stallbilanz, Betrieb 8 (Schweinemast)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Mastfutter	0,11	0,86	29,4	1,18	0,24	148,9
	Phase I						
	Mastfutter	0,24	3,24	91,0	4,59	0,76	444,8
	Phase II						
Sonstige Betriebsmittel	Wasser ²	0,00 ³	0,02	0,00 ³	0,02	0,23	1,8
Zukauf Tier		0,01	0,04	0,7	0,14	0,08	10,8
Summe Eintrag		0,36	4,16	121	5,93	1,31	606
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,03	0,49	10,9	0,79	0,26	37,1
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,03	0,14	2,7	0,50	0,29	40,0
Wirtschaftsdünger	Gülle	0,29	5,85	102,3	5,94	1,74	526,6
Summe Austrag		0,32	5,99	105	6,44	2,03	567
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,06	1,40	21,2	1,27	0,40	112
Bilanzsaldo		0,04	-1,83	16,0	-0,51	-0,72*	39,0

* signifikantes Saldo (Eintrag \neq Austrag)² Tränke, Reinigung³ kein Stoffstrom aufgrund nicht nachweisbarer Konzentration

Die geringeren Einträge in den Stall von Betrieb 8 spiegelten sich auch in dessen Austrägen wider. Am stärksten fiel dieser Sachverhalt für Kupfer auf, wo der Austrag lediglich rund 105 g GV⁻¹ a⁻¹ betrug. Diese Größenordnung kommt den festgestellten Austragsvolumina im Milchviehbereich (Betrieb 3) nahe.

Anhand Abb. 5-11 lassen sich die Gesamtein- und Gesamtaustragsgeschehen in den Ställen der schweinehaltenden Betriebe noch einmal deutlich spezifizieren.

Der Umsatz von Cadmium war auf allen drei schweinehaltenden Betrieben niedrig und bewegte sich zwischen ca. 0,3 g GV⁻¹ a⁻¹ (Betrieb 6) und ca. 1 g GV⁻¹ a⁻¹ (Betrieb 7). Die Betriebe 6 und 7 (beide hatten einen Betriebszweig Ferkelerzeugung) wiesen in Bezug auf den Eintrag der Spurenelemente Kupfer und Zink ähnliche Ergebnisse auf. Diese beliefen sich für Kupfer auf 243 g GV⁻¹ a⁻¹ (Betrieb 6) und 247 g GV⁻¹ a⁻¹ und lagen für Zink bei 807 g GV⁻¹ a⁻¹ (Betrieb 6) und 796 g GV⁻¹ a⁻¹ (Betrieb 7). Bei Betrieb 6 lagen darüber hinaus die Austräge an Kupfer und Zink signifikant über den Einträgen. Bei beiden Betrieben (6 und 7) lagen die Austräge an Chrom und Blei signifikant über den Einträgen. Die Schwermetallausträge aus dem Stall von Betrieb 7 (Festmistssystem) lagen bei Chrom, Nickel

und Blei höher als die bei Betrieb 6 und 8 (beide Flüssigmistsystem). Betrieb 8 (Schweinemast) wies mit Ausnahme von Blei für alle Elemente ausgeglichene Bilanzen auf. Besonders die Einträge an Kupfer und Zink in den Gesamtstall lagen erheblich unter denen der Betriebe mit Ferkelerzeugung (Betriebe 6 und 7).

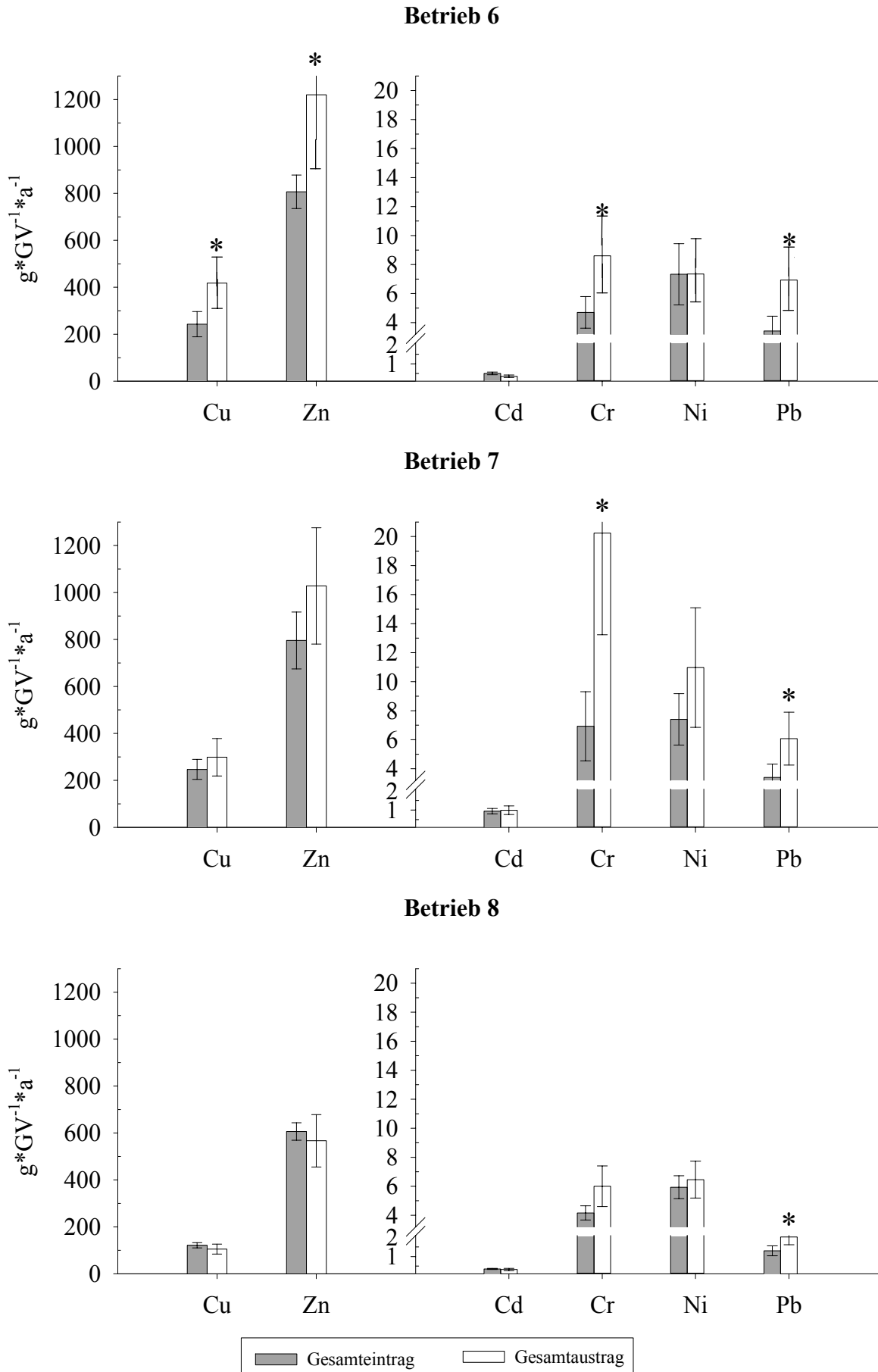


Abb. 5-11: Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtställen der schweinehaltenden Veredelungsbetriebe (6-Ferkelerzeugung, 7-Ferkelerzeugung und Schweinemast, 8-Schweinemast)

5.1.2.2.3 Abschließende Diskussion

Die Untersuchungen zeigen, daß die Fütterung in der Schweinehaltung eine zentrale Rolle für den Schwermetalleintrag und -umsatz im Stall spielt (vgl. Abb 5-10). Die zugekauften Alleinfuttermittel von Betrieb 6 (Ferkelerzeugung) und Betrieb 8 (Mastschweine) stellten mit Ausnahme von Blei immer mindestens 90 % des Schwermetalleintrages dar. Um dieses Ergebnis mit den verschiedenen Eintragsquellen bei Betrieb 7 für die Schwermetalle zu vergleichen (Abb 5-10), müssen dort die Anteile aller Futterkomponenten am Input, also die des wirtschaftseigenen und des zugekauften Futtermittel incl. der Mineralstoffe summiert werden. Demzufolge waren die **Futtermittel** bei Betrieb 7 mit **über 90 %** am bekannten Eintrag der Elemente **Kupfer und Zink** beteiligt. Die absoluten fütterungsbedingten Einträge waren bei beiden ferkelerzeugenden Betrieben (6 und 7) sehr ähnlich. Dies ist insofern auffallend, als die Haltungsdauer der Tiere bei Betrieb 7 im geschlossenen System erheblich länger war. Aufgrund der Tatsache, daß die Kupfergehalte im Futter der älteren Schweine, z.B. im Endmastfutter, deutlich abgesenkt waren, läge nahe, daß der Eintrag an Kupfer pro GV und Jahr bei Betrieb 7 geringer gewesen wäre als der bei Betrieb 6. Dies ist aber nicht der Fall. Vielmehr wiesen beide Betriebe einen jährlichen Eintrag von ca. 250 g pro GV und Jahr auf. Ein Unterschied in der Fütterungsstrategie der beiden Betriebe bestand darin, daß das zugekaufte Alleinfutter bei Betrieb 6 Phytase enthielt. Dies war weder in der hofeigenen Mischung von Betrieb 7 noch im zugekauften Alleinfutter von Betrieb 8 der Fall. Ob eine bessere Futtermittelverwertung infolge Phytaseeinsatzes bei Betrieb 6 zu den sehr ähnlichen Ergebnissen wie bei Betrieb 7 (geschlossenes System) führte, kann nicht abschließend beurteilt werden. Zwar waren die absoluten Einträge über das Endmastfutter am höchsten (Tab. 5-57), dies erklärt sich aber daraus, daß dieses Futtermittel am längsten und in den größten Mengen an die Tiere verfüttert wurde. Auch im Mastbetrieb 8 verursachte dieser Fütterungsabschnitt die höchsten Schwermetalleinträge. Bei Betrieb 7 waren auch die Kupfereinträge über das Vormastfutter mit $29,5 \text{ g GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aus dem entsprechenden Mineralfutter recht hoch. Hinzu kam, daß Betrieb 7 nur eine Mischung für laktierende und güste/tragende Sauen herstellte, welche höhere Gehalte an Kupfer besaß als die beiden zugekauften fertigen Mischungen für Sauen bei Betrieb 6. Dies deutet auf ein Einsparpotential für die Kupferergänzung bei Betrieb 7 hin. Der spezialisierte Mastbetrieb 8 wies dagegen bedeutend geringere Einträge durch Fütterung an Kupfer und Zink auf.

Das größte Potential zur Reduzierung des Schwermetalleintrages liegt offenbar in der **Reduktion der supplementierten Spurenelemente**, da die Gehalte der pflanzlichen Rohkomponenten denen von BRÜGGEMANN (1999) glichen. Bestätigt wurde dies durch die

hofeigenen Futtermischungen von Betrieb 7. Da sich hofeigene Mischungen hinsichtlich der eingesetzten Komponenten nicht von Mischungen aus Kraftfutterwerken unterscheiden, gilt die Feststellung, daß die Einträge an Kupfer und Zink, aber auch an Chrom, hauptsächlich aus der Mineralsupplementierung resultieren, für beide "Mischsysteme". Nähere Betrachtungen bei Betrieb 7 ergaben, daß die Einträge der Elemente Chrom und Nickel, besonders aber Cadmium und Blei, zu großen Anteilen aus dem Einsatz des wirtschaftseigenen **Strohs** resultierten. Für Cadmium und Blei beliefen sich diese Anteile auf 40 bzw. 30 %. Für Schwermetallgehalte in Stroh und in wirtschaftseigenen Futtermitteln muß allerdings berücksichtigt werden, daß diese in einem **betriebsinternen Kreislauf** geführt werden. Mit einer Akkumulation im System wäre dann zu rechnen, wenn die atmosphärischen Einträge über Stäube (und bei Schwermetallen insbesondere von Aerosolen der Größenklasse $<1\mu\text{m}$) im Betrieb signifikant sind. Eine Senkung der betrieblichen Belastung wäre daher nur durch eine Immissionsminderung zu erreichen.

Die Tabellen 5-59 und 5-60 zeigen Untersuchungsergebnisse für Kupfer bzw. Zink in den verwendeten Alleinfuttermitteln. Diese wurden den Versorgungsempfehlungen und zulässigen Höchstgehalten an Kupfer und Zink in Alleinfuttermitteln gegenübergestellt.

Tab. 5-59: Kupfergehalte im Alleinfutter für Schweine, empfohlene Bedarfsmengen und nach FMV (2000) zulässige Höchstmengen [mg kg^{-1}] bei 88 % TM

Futtermittel	Empfohlene Cu-Menge zur Bedarfsdeckung ¹⁾	Gemessener Cu-Gehalt		zulässige Cu-Höchstmenge in Alleinfuttermitteln ²⁾
		Betrieb 6	Betrieb 7	
Pre-Starter	6	181 (n=4)	185 (n=2)	175
Absetzer		104 (n=5)	122 (n=5)	
Vormast	4-5	-	79 (n=6)	35
Endmast		40 (n=3)	34 (n=4)	
Sauen (gesamt)	8-10	-	80 (n=5)	35
Sauen (güst/tragend)		33 (n=5)	-	
Sauen (säugend)		38 (n=5)	-	

¹⁾ GFE zit. in KIRCHGESSNER (1997)

²⁾ FMV (2000)

Demnach orientierten sich die in den Futtermischungen enthaltenen **Kupfer- und Zinkmengen i.d.R. an den laut Futtermittelverordnung zulässigen Höchstmengen** und nicht an den empfohlenen Mengen zur Bedarfsdeckung. Auch FRÜCHTENICHT (2002) kommt für den Bereich der Schweinehaltung zu diesem Ergebnis. Angesichts dieser Feststellungen, die auf ein großes Verminderungspotential hindeuten, fand im Rahmen des UBA F+E-Vorhaben FKZ 299 72 104 der **KTBL-Workshop "Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern"** im April 2002 in Göttingen statt.

Tab. 5-60: Zinkgehalte im Alleinfutter für Schweine, empfohlene Bedarfsmengen und nach FMV (2000) zulässige Höchstmengen [mg kg⁻¹] bei 88 % TM

Futtermittel	Empfohlene Zn-Menge zur Bedarfsdeckung ¹⁾	Gemessener Zn-Gehalt		zulässige Zn-Höchstmenge in Alleinfuttermitteln ²⁾
		Betrieb 6	Betrieb 7	
Pre-Starter	80-100	204 (n=4)	273 (n=2)	250
Absetzer		185 (n=5)	157 (n=5)	
Vormast	50-60	-	247 (n=6)	
Endmast		114 (n=3)	156 (n=4)	
Sauen (gesamt)	50	-	169 (n=5)	
Sauen (güst/tragend)		193 (n=5)	-	
Sauen (säugend)		231 (n=5)	-	

¹⁾ GFE zit. in KIRCHGESSNER (1997)

²⁾ FMV (2000)

Die geringen Standardabweichungen bei den Schwermetalluntersuchungen der selbstgemischten Alleinfuttermittel von Betrieb 7 lassen im Vergleich zu den hohen Standardabweichungen bei den Messungen der einzelnen Futterkomponenten auf einen guten Homogenisierungs- und Mischeffekt der eingesetzten Mahl- und Mischtechnik schließen.

Über die höheren Austräge für die Elemente Kupfer, Chrom, Blei und Zink gegenüber den Einträgen in der Bilanz von Betrieb 6 kann nur gemutmaßt werden. Es ist aber für alle Schwermetallgehalte in der Gülle ein Konzentrationsanstieg infolge von Trockenmasseverlusten während der Lagerung (aerober und anaerober Abbau) anzunehmen, wofür auch die höheren Gehalte der anderen Elemente in der Gesamtgülle und die zeitliche Verzögerung zwischen Probenahme der Gülle der einzelnen Haltungsgruppen und der Gesamtgülle sprechen. So enthielt bei Betrieb 6 die Mischgülle des Gesamtstalles mehr Zink als die Absetzergülle, die die höchsten Gehalte der Einzelstallgüllen aufwies. Nach Angaben von TRIMBORN (2003) und WULF & CLEMENS (2003) beläuft sich der Trockenmasseverlust während der Lagerung von Gülle zwischen 2-13 % während einer Lagerungsdauer von 100 Tagen. Da der Landwirt den überwiegenden Teil seiner Gülle zur Getreidedüngung im Frühjahr einsetzte, die Gülleproben der einzelnen Stallabteile aber im Hochsommer genommen wurden war der Zeitraum erheblich länger. Demnach wäre beispielsweise eine Zunahme des Bleigehaltes in dieser Gülle um 20 % während der Lagerung durchaus denkbar. Für Zink, dessen Eintragsüberhang alleine aus der Lagerungsdauer und dem damit verbundenen Trockenmasseverlust nicht erklärt werden kann, könnte auch ein Eintrag über die Abnutzung von verzinkten Aufstallungseinrichtungen bedeutend sein. Allerdings deuteten die Untersuchungen zu Korrosion und Abrieb von verzinkten Stalloberflächen im Milchviehbetrieb 3 nicht darauf hin, daß aus diesem Eintragspfad höhere Anteile resultieren könnten. Möglicherweise wurde die Gülle darüber hinaus durch das Überpumpen mit einer

Kreiselpumpe durch ein rund 20 m langes verzinktes Rohr in den Güllebehälter mit Zink angereichert. Dies wurde mit einer Abtragsschätzung geprüft. Der Eintrag hieraus war aber als gering einzustufen. Wahrscheinlich sind gruppenweise Behandlungen mit zinkhaltigen Fütterungsarzneimitteln, die nach SCHENKEL & BREUER (2002) erhebliche Einträge verursachen können, der Grund für die aufgetretenen Austragsüberhänge. Dies wurde vom Landwirt (Betrieb 6) allerdings nicht bestätigt.

Bei Betrieb 7 traten für Chrom und Blei signifikante Austragsüberhänge auf, die sich höchstwahrscheinlich auf die Verwendung von Konverter- oder Hüttenkalk zur Desinfektion nach der Naßreinigung zurückführen lassen. Dies wurde später seitens des Landwirts von Betrieb 7 bestätigt, hingegen dementierten die Leiter von Betrieb 6 und Betrieb 8 den Zusammenhang. Deshalb bleibt/bleiben die Ursache(n) für die signifikanten Austragsüberhänge an Chrom und Blei (Betrieb 6) bzw. an Blei (Betrieb 8) diffus.

5.1.2.3 *Veredelungsbetrieb mit Putenmast*

5.1.2.3.1 Schwermetallgehalte

Der hier beschriebene Betrieb 9 mästete seine Tiere mit zugekauften Alleinfuttermitteln. Dabei wurde die in der Putenmast übliche Phasenfütterung praktiziert. Für Hennen erfolgte diese fünf-phasig, Hähne wurden in sechs Fütterungsabschnitten auf Endgewicht gemästet. Zu diätischen Zwecken wurde außerdem in geringen Mengen Muschelgriert zugefüttert. Über die festgestellten Schwermetallgehalte in den **Futtermitteln** informiert Tab. 5-61.

Die ermittelten Gehalte an den Spurenelementen Kupfer und Zink lagen bei allen eingesetzten Mischfuttermitteln auf gleichem Niveau, unabhängig davon, in welchem Entwicklungsstadium sich die Tiere bei der Verfütterung der einzelnen Futtermittel befanden. Die GfE (1999) empfiehlt für Geflügel Kupfergehalte von 6-8 mg kg TM⁻¹ und Zinkgehalte von 30-70 mg kg TM⁻¹. Für Kupfer wurden diese empfohlenen Werte bei weitem überschritten. Die gemessenen Zinkgehalte rangierten am oberen Ende der genannten Spanne.

Der zum Untersuchungszeitpunkt zulässige Höchstgehalt von 35 mg Kupfer kg⁻¹ Alleinfutter wurde bei Phasenfutter 6 annähernd erreicht. Auch die anderen Mischfuttermittel nutzen diese Vorgabe weitgehend aus.

Tab. 5-61: Schwermetallgehalte der eingesetzten Allein- und Einzelfuttermittel (Putenmast)

Betrieb	n	Futtermittel	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
9	4	Putenfutter Phase 1	0,17 ± 0,20	2,49 ± 2,71	23,6 ± 12,2	2,62 ± 2,46	0,83 ± 0,64	68,3 ± 17,2
9	8	Putenfutter Phase 2	0,08 ± 0,01	0,87 ± 0,15	28,0 ± 3,9	1,28 ± 0,25	0,52 ± 0,13	75,4 ± 34,8
9	3	Putenfutter Phase 3	0,10 ± 0,05	0,49 ± 0,25	23,0 ± 17,1	1,43 ± 0,27	0,31 ± 0,15	63,5 ± 45,0
9	2	Putenfutter Phase 4	0,08 ± 0,01	0,62 ± 0,25	28,2 ± 0,6	1,33 ± 0,07	0,51 ± 0,01	12,1 ± 1,4
9	3	Putenfutter Phase 5	0,07 ± 0,01	0,51 ± 0,28	29,3 ± 3,4	1,13 ± 0,24	0,37 ± 0,08	39,3 ± 49,7
9	3	Putenfutter Phase 6	0,05 ± 0,02	0,90 ± 0,59	34,7 ± 1,0	1,15 ± 0,32	0,69 ± 0,34	79,5 ± 7,8
9	2	Muschelgriet	0,02 ± 0,03	0,97 ± 0,52	11,8 ± 11,2	0,87 ± 0,16	0,69 ± 0,10	4,03 ± 2,85

± Standardabweichung

Die Einstreu der Tiere, die als Eintagsküken eingestallt wurden, erfolgte für die ersten drei Wochen mit Hobelspänen. Danach wurden die Tiere auf Kurzstroheinstreu gehalten. Neben dem wirtschaftseigenen Stroh kaufte der Betrieb Stroh ab Feld zu. Letzteres wurde aus dem angrenzenden Umland bezogen und beides gemischt gelagert. Somit konnte bei der Probenahme nicht mehr vom selbsterzeugten Stroh unterschieden werden. Tab. 5-62 zeigt die Analysenergebnisse der eingesetzten **Einstreumaterialien**.

Tab. 5-62: Schwermetallgehalte in Einstreumaterialien (Putenmast)

Betrieb	n	Einstreu	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
9	2	Hobelspäne	0,18 ± 0,16	0,49 ± 0,45	3,16 ± 2,66	0,42 ± 0,46	0,49 ± 0,57	47,1 ± 51,6
9	37	Triticalestroh	0,09 ± 0,04	0,85 ± 0,40	2,24 ± 0,77	0,35 ± 0,17	0,81 ± 0,50	15,5 ± 9,7
9	8	Weizenstroh	0,13 ± 0,06	0,67 ± 0,21	2,29 ± 0,65	0,36 ± 0,13	0,55 ± 0,23	9,50 ± 7,62

± Standardabweichung

Die Schwermetallgehalte in den untersuchten Strohproben lagen auf gleichem Niveau wie die zuvor beschriebenen Gehalte im Stroh der anderen Betriebe (1, 2, 4, 6 und 7). Die Gehalte in den zwei Proben von Hobelspänen waren den Werten der in den untersuchten Milchviehbetrieben eingesetzten Sägemehlen sehr ähnlich.

Tab. 5-63 zeigt die untersuchten **Wasserproben**. Gegenüber den zuvor untersuchten Wasserproben konnten keinerlei relevante Unterschiede bezüglich der Schwermetallkonzentrationen festgestellt werden.

Tab. 5-63: Schwermetallgehalte im Brunnenwasser zur Tränke und Desinfektion (Putenmast)

Betrieb	n	Wasser	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
mg l ⁻¹								
9	4	Brunnenwasser	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,01 ± 0,01	0,10 ± 0,02

± Standardabweichung

n.n.: nicht nachweisbar

Über die ermittelten Schwermetallgehalte in **Putenmist** informiert Tab. 5-64.

Tab. 5-64: Schwermetallgehalte in Putenmist

Betrieb	n	Wirtschaftsdünger	As (n=1)	Cd	Cr	Cu	Hg (n=1)	Ni	Pb	Zn
mg kg ⁻¹ TM										
9	27 ¹	Putenmist	0,55	0,58 ± 0,21	15,2 ± 8,7	129,8 ± 53,8	0,029	5,17 ± 1,76	2,58 ± 1,24	349 ± 125

± Standardabweichung ¹ As und/oder Hg (n=1)

Die auf Betrieb 9 untersuchten Proben vom anfallenden Putenmist deckten sich nur bedingt mit Analysen aus vorherigen Untersuchungen, wie sie in der Übersicht von KERSCHBERGER ET AL. (2001) gezeigt werden. Die hier untersuchten Proben wiesen einen im Durchschnitt viel höheren Chromgehalt auf. LABO (2000) berichtet von gemessenen Chromgehalten in Putenmist um 4,4 mg kg⁻¹ TM. Der hier ermittelte Durchschnittsgehalt von 15,23 mg kg⁻¹ resultierte allerdings aus sehr hohen Werten beim letzten Probennahmetermin. An diesem wurden die meisten Proben genommen. Bei den davor genommenen Proben (an drei Probennahmeterminen) lag der Chromgehalt des Putenmistes durchschnittlich bei 2,80 mg kg⁻¹ TM. Auch die durchschnittlichen Cadmiumgehalte der letzten Probenahme erhöhen den bis dahin literaturkonformen Gehalt von 0,28 mg kg⁻¹ TM auf 0,58 mg kg⁻¹ TM. Allerdings ermittelt auch FRÜCHTENICHT (2002) einen Chromgehalt von 13,2 mg kg⁻¹ TM.

Der Arsengehalt der Mistprobe war vergleichbar zu einer Analyse von Hühnergülle (0,49 mg kg⁻¹) aufgeführt bei KTBL (2000). Da es sich aber in beiden Fällen um Einzelproben handelte, ist eine Wertung dieser Abweichung schwierig. Die ermittelte Quecksilberkonzentration lag im Bereich der Angabe von LABO (2000) zu Geflügelkot.

5.1.2.3.2 Schwermetalleinträge und -bilanzierung

Die auf der Eintragsseite in das System Stall eingehenden Betriebsmittelflüsse waren aufgrund der alleinigen Verfütterung von zugekauften Mischfuttermitteln sehr gut dokumentiert. Wegen betriebsindividuellen Organisationsstrukturen und seuchenhygienischen Vorsichtsmaßnahmen, die keine eigenen Erhebungen über den Anfall von

Putenmist im Stall zuließen, erfolgte die Kalkulation des anfallenden Putenmistes ausschließlich über theoretische Rechenmodelle wie den von PETERSEN (2003). Diese Rechenmodelle sind aber im Produktionsverfahren „Putenmast“ als sehr zielsicher anzusehen, weil, Gesundheit und Vitalität der eingestellten Tiere vorausgesetzt, noch engere Korrelationen als in der Schweinemast zwischen Futteraufnahme, tierischer Leistung und Anfall von Mist bestehen. Die Schwermetallgehalte im Tierkörper wurden über die Futtermittelverwertung und angenommene Retention ebenfalls theoretisch kalkuliert (siehe Tab. 2-21).

Abb. 5-12 gibt Auskunft über die Anteile des Schwermetalleintrages in den Putenstall von Betrieb 9.



Abb. 5-12: Anteile der einzelnen Betriebsmittel am Schwermetalleintrag in den Gesamtstall des Putenmastbetriebes [%]

Auch bei diesem Typ der tierischen Veredelung wurden die Hauptanteile des Schwermetalleintrages in den Stall hauptsächlich durch die Fütterung der Tiere bedingt. Wie auch schon bei der Schweinehaltung gezeigt, wurden speziell **Kupfer und Zink fast ausschließlich über die Fütterung** der Tiere eingetragen. Lediglich Cadmium, Chrom und Blei gelangten auch zu Anteilen $\geq 10\%$ durch sonstige Betriebsmittel (Einstreu) in den Stall.

Die Remontierung durch Eintagsküken spielte für den Schwermetalleintrag in den Stall keine Rolle.

Tab. 5-65 zeigt die spezifische Ein- und Austragsituation im genannten Mastputenstall. Dabei zeigte sich, daß die einzelnen Phasen der Fütterung (Hähne sechsphasig, Hennen fünfphasig) zu unterschiedlich starken Einträgen führen. Diese sind hauptsächlich in der Einsatzmenge der jeweiligen Futtermittel zu sehen. Lediglich während Futterphase 6 wurde auch durch höhere Schwermetallgehalte im verwendeten Futtermittel eine höhere Menge an Chrom, Kupfer, Blei und Zink eingetragen (vgl. Tab. 5-61).

Tab. 5-65: Stallbilanz, Betrieb 9 (Putenmast)

Einträge/Austräge		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		g GV ⁻¹ a ⁻¹					
Zukauffuttermittel (Protein/Energie)	Putenfutter 1	0,03	0,38	3,6	0,40	0,13	10,5
	Putenfutter 2	0,03	0,33	10,7	0,49	0,20	28,8
	Putenfutter 3	0,16	0,77	35,9	2,23	0,48	99,3
	Putenfutter 4	0,13	1,04	47,3	2,24	0,85	20,3
	Putenfutter 5	0,14	0,97	55,1	2,13	0,70	74,1
	Putenfutter 6	0,11	1,83	70,2	2,33	1,39	160,7
Zukauffuttermittel (Mineral)	Austernschalen	0,05	0,39	1,2	0,44	0,47	2,6
Sonstige Betriebsmittel	Stroh	0,19	1,20	3,76	0,59	1,04	18,61
	Hobelspäne	0,02	0,05	0,3	0,05	0,05	5,2
	Wasser	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,00 ³	0,02	0,2
Zukauf Tier		0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,1
Summe Eintrag		0,86	6,96	228	10,9	5,33	420
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		0,12	1,95	27,6	1,55	1,11	125
Tierische Erzeugnisse	Fleisch	0,05	0,11	6,7	0,20	0,23	35,4
Wirtschaftsdünger	Mist	1,28	33,88	288,9	11,50	5,75	775,4
Summe Austrag		1,33	34,0	296	11,7	5,98	811
<i>Gesamtfehler Austrag</i>		3,07	7,80	63,9	2,47	1,32	172
Bilanzsaldo		-0,47	-27,0*	-68,0	-0,80	-0,65	-391*

* signifikantes Saldo (Eintrag ≠ Austrag) ² Tränke, Reinigung ³ kein Stoffstrom aufgrund nicht n.n. Konz.

Der Schwermetallaustrag resultierte fast ausschließlich aus Putenmist. Über den Tierkörper wurde lediglich für Zink ein Austrag von annähernd 5 % erreicht.

Abb. 5-13 verdeutlicht die Verhältnisse Eintrag-Austrag im Stall von Betrieb 9.

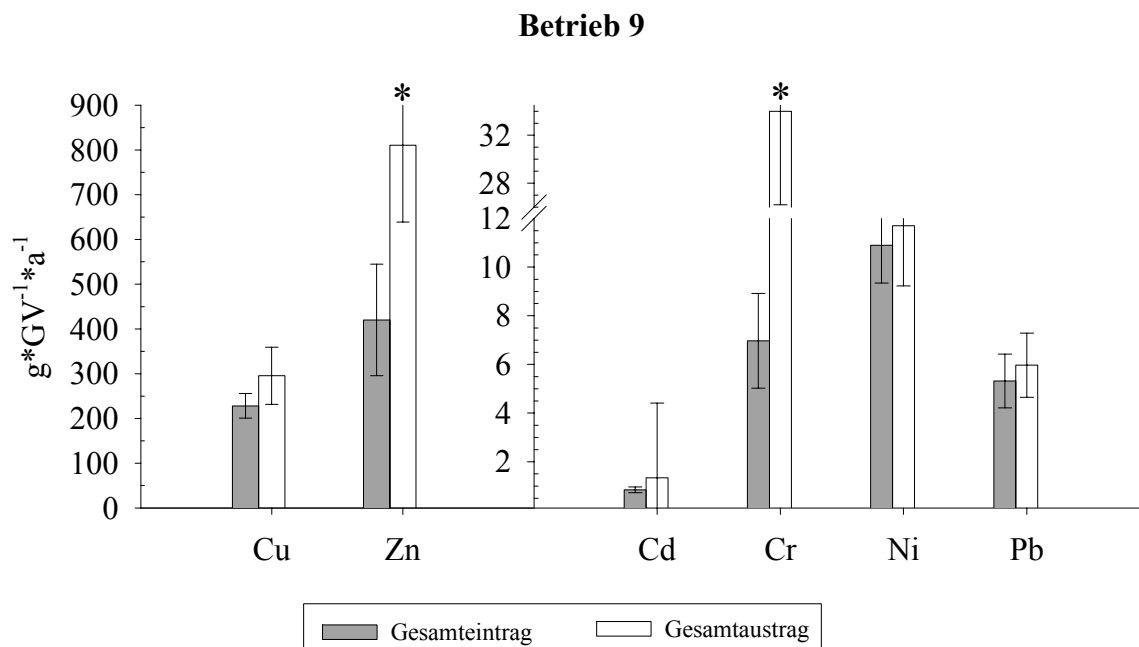


Abb. 5-13: Ein- und Austräge an Schwermetallen in den Gesamtstall des Putenmastbetriebes 9

Die Schwermetallausträge überstiegen die -einträge lediglich bei Zink und Chrom signifikant. Der Austrag an Chrom lag ca. 4,5 mal über dem Eintrag an diesem Element.

5.1.2.3.3 Abschließende Diskussion

Da die Puten wie auch die Schweine der zuvor beschriebenen Veredelungsbetriebe auf Getreidebasis gefüttert wurden, wird hier ein vertikaler Vergleich dieser beiden Tierhaltungssysteme unternommen:

Der Eintrag in den untersuchten Putenstall lag für Cadmium, Chrom, Nickel und Blei durchschnittlich 30 % höher als in die Ställe der schweinehaltenden Betriebe. Da diese Elemente nicht nach Bedarf supplementiert werden, spiegelt diese Feststellung den bedeutend höheren Futtermittelverbrauch in der Putenmast pro gehaltener GV gegenüber der Schweinehaltung wieder. Der Eintrag von Kupfer in den Stall lag im Bereich zwischen dem der Ferkel erzeugenden Betriebe (6 und 7) und dem des Betriebes 8 (Schweinemast). Die hohen Kupfergehalte in den für die Ferkelerzeugung verwendeten Futtermitteln waren für die

höheren Austräge pro gehaltener GV verantwortlich (vgl. Tab. 5-32 und Tab. 5-61). Da die in der Schweinemast eingesetzten Futtermittel im Vergleich nicht so viel höhere Kupfergehalte als die Putenfuttermittel aufwiesen, kompensierte die größere Futtermenge in der Putenmast die höheren Gehalte im Schweinemastfutter. Somit erklären sich auch die geringeren Kupfereinträge und damit auch die -austräge aus der Schweinemast im Vergleich zur Putenmast. Der bekannte Eintrag von Zink in den Putenstall war zwar geringer als der in alle untersuchten Schweineställe, allerdings rangierte der Austrag des Putenstalles oberhalb des Schweinemaststalles von Betrieb 8.

Wodurch die beiden signifikant höheren Austräge an Chrom und Zink zustande kamen, konnte nicht geklärt werden. Nach dem Ausstallen wurden die einzelnen Ställe gründlich unter Einsatz von Desinfektionsmitteln gereinigt. Die dabei nach Angabe des Landwirtes verwendeten Präparate auf Jod- und Aldehydgrundlage erklären die signifikant höheren Austräge dieser beiden Elemente nicht. Nach SCHÜRMAN (2003) werden die Stallflächen häufig vor der Neubelegung zur zusätzlichen Hygienisierung mit Kalken eingestreut. Dabei kommen sowohl kohlen-saure als auch Branntkalk zum Einsatz. Nach eigenem Kenntnisstand war dies hier zwar nicht der Fall, dennoch ist es sehr wahrscheinlich, daß zur Hygienisierung Kalk eingesetzt wurde. Bei Verwendung von 4 g Konverterkalk m⁻² könnten somit rund 10 g Chrom GV⁻¹ a⁻¹ in den Stall gelangt sein, was die signifikante Bilanzlücke klären könnte. Die Bilanzlücke bei Zink ließe sich durch den Einsatz zinkhaltiger Arzneimittel, die kurzzeitig über das Futter oder das Tränkewasser verabreicht wurden, erklären. Schließlich konnten allerdings beide signifikanten Austragsüberhänge (Chrom und Zink) nicht mit Gewißheit geklärt werden.

5.1.2.4 Optionen zur Senkung des Schwermetalleintrages in der Tierproduktion

Um mögliche Potentiale der Fütterung hinsichtlich der Reduktion von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern unter Berücksichtigung der Aspekte Tiergesundheit und tierische Leistung bewerten zu können, wurde im Rahmen des UBA-Verbundprojektes im April 2002 der KTBL-UBA-Workshop "Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern" durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Workshops lagen den im Endbericht (SCHULTHEISS ET AL., 2003) und den in dieser Arbeit formulierten Ausführungen zu Maßnahmen im Bereich der Fütterung zugrunde. Ebenfalls werden Empfehlungen hinsichtlich möglicher Reduktionspotentiale für den Schwermetalleintrag in den Stall in den Bereichen Stalleinrichtung und Futtertechnik

gegeben.

Demnach können abschließend für den Bereich **Tierproduktion folgende Handlungsempfehlungen** gegeben werden.

Herabsetzung der Spurenelementsupplementierung in der Fütterung von Mastschweinen und Geflügel

Begründung: Die Untersuchungen haben gezeigt, daß Kupfer- und Zinksupplemente auch mit anderen Schwermetallen verunreinigt sein können (vgl. MITTENDORF, 2000; MÜLLER & EBERT, 2002). Eine Reduzierung des Kupfer- und Zinkeinsatzes würde daher gleichzeitig zu einer Reduzierung des Eintrages anderer unerwünschter Schwermetalle führen. Nach GRAFE & WESTENDARP (2002) konnten in den Ausscheidungen der Versuchsgruppe (Mastschweine mit reduzierter Kupfer- und Zinksupplementierung in der Ration) erwartungsgemäß auch geringere Kupfer- und Zinkgehalte festgestellt werden. Für den Bereich Schweinemast sind dabei keine Minderleistungen zu erwarten (MEYER, 2002). Nach RICHTER (2002) kann auch bei Geflügel die Kupfer- und Zinksupplementierung zum Alleinfutter risikofrei für Gesundheit und Leistung der Tiere reduziert werden. Dagegen führt eine Reduktion der Spurenelementgehalte in der Ferkelaufzucht zu verringerten tierischen Leistungen aufgrund nicht mehr nutzbarer ergotroper Effekte (MEYER, 2002; PECHER & MELOSCH, 2002). Das seit dem 01.01.2003 bestehende Verbot des Einsatzes von Antibiotika als leistungsfördernde Futterzusatzstoffe führen vor allem bei dieser Tierkategorie zur Forderung nach Alternativen (SCHULTHEIß ET AL., 2003) (siehe V 3.).

Seit 25. Juli dieses Jahres ist die **VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003** in Kraft. Die aus dieser Verordnung resultierenden neuen, zumeist abgesenkten **Höchstgehalte an Spurenelementen für Alleinfuttermittel** sind den z.Zt. der Untersuchung noch geltenden Höchstgehalten nach FMV (2000) in Tab. 5-66 vergleichend zur Seite gestellt.

Tab. 5-66: Höchstgehalte für Kupfer und Zink in Alleinfuttermitteln für Rinder, Schweine und Geflügel (88 % TM) nach (FMV, 2000) und nach VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 vom 25. Juli 2003

FMV (2000)			VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 vom 25. Juli 2003		
Haltungsabschnitt	mg Cu kg ⁻¹	mg Zn kg ⁻¹	Haltungsabschnitt	mg Cu kg ⁻¹	mg Zn kg ⁻¹
Kälber MAT ¹	30	250	Kälber MAT ¹	15	200
Kälber Alleinfutter	50		Kälber Alleinfutter	15	150
Andere Rinder	35		Andere Rinder	35	
Mastschweine bis 16. Lebenswoche	175	250	Ferkel bis 12 Wochen	170	150
Mastschweine ab 17. Lebenswoche	35		Andere Schweine	25	
Zuchtschweine	35				
Geflügel	35	250	Geflügel	25	150

¹MAT: Milchaustauschfutter

Inwieweit diese Senkungen der Höchstgehalte in Alleinfuttermitteln sich auf die Schwermetallgehalte in den Wirtschaftsdüngern und damit auf die aus ihnen resultierenden Schwermetallfrachten auf die LF sinken werden, bleibt zumindest für Cadmium, Chrom, Nickel und Blei abzuwarten.

II. Einrichtung eines Rücknahmesystems für benutzte Klauenbadflüssigkeit

Begründung: Der Eintrag von Kupfer durch diesen Eintragspfad stellte die Haupteintragsquelle in die Milchviehställe der Betriebe 1 und 3 dar. Mangels alternativer umweltschonenderer Verfahren, die aus veterinärmedizinischer Sicht ausreichende Wirkung bieten, kann derzeit nicht generell auf den Einsatz dieser Präparate verzichtet werden (vgl. Kap. 5.1.2.1.3). Daher ist für die Zeit bis zur Stellung von Alternativen (vgl. III, 2.) nur der Weg einer anschließenden Entsorgung bzw. eines Recyclings ein gangbarer Weg, um v.a. den Kupfereintrag aus diesem Bereich drastisch zu reduzieren. Vorstellbar wäre ein Rücknahmesystem nach Vorbild der Gebinderücknahme von Pflanzenschutzmitteln durch den Handel. Hier ist unter Einbeziehung von Praktikern nach Lösungen zum Entleeren der Klauenbäder zu suchen.

III. Milchleistungsfutter lediglich bedarfsgerecht mit Mineralstoffen anreichern

Begründung: Die ermittelten durchschnittlichen Gehalte in den eingesetzten Milchleistungsfuttern waren weit über den Bedarf mit Zink ergänzt. Eine bedarfsgerechte Spurenelementversorgung der Tiere sicherzustellen und gleichzeitig eine Überversorgung zu

vermeiden, kann über den Einsatz mineralisierter Milchleistungsfutter nur bei Fütterung einer bestimmten Einsatzmenge erfolgen. Da Milchleistungsfutter aber leistungs- und somit laktationsbezogen verabreicht werden, ist von einer Spurenelement-verabreichung für die gesamte Ration über das eingesetzte Milchleistungsfutter abzusehen (vgl. Kap. 5.1.2.1.3). LÜPPING (2002) nennt als anzustrebende Gehalte von **10 mg Kupfer bzw. 50 mg Zink pro kg Milchleistungsfutter**. Eine generelle Reduktion der Versorgungsempfehlungen zur Spurenelementsupplementierung im Bereich der Rinderhaltung erscheint aber aufgrund vieler nicht einzuschätzender Wechselwirkungen mit anderen Stoffen im Futter mehr als fraglich. Nach LÜPPING (2002) sollte zunächst versucht werden, auf Sicherheitszuschläge zu verzichten.

IV. Anweisung der Officialberatung zur Empfehlung der **Entkoppelung von Mengen- und Spurenelementsupplementierung bei Rind-/Milchvieh** in größeren Tierbeständen

Begründung: Hierin liegt ein hohes Potential zur Absenkung der Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern (SCHULTHEIB ET AL., 2003). Die Versorgung durch native, im Grundfutter enthaltene Kupfer- und Zinkgehalte können stark schwanken. Da die Mineralfuttermittel nach dem Calcium- und Phosphorergänzungsbedarf eingestellt sind, um eine Anpassung an einzelne Betriebstypen zu erreichen, sich die Spurenelementgehalte aber kaum unterscheiden, kann es bei den Spurenelementen zu Luxuskonsum kommen (LÜPPING, 2002) (vgl. Betrieb 1 Kap. 5.1.2.13). Der aus diesem Zusammenhang zu folgernde Einsatz sog. Mikromineralfuttermittel ist aber nur auf Betrieben mit großen einheitlichen Fütterungsgruppen in Abhängigkeit von der technischen Ausstattung möglich. Nach LÜPPING (2002) ist die Anwendung solcher Mikromineralfutter in Norddeutschland bereits praxisüblich.

V. Anweisung der Officialberatung zur Empfehlung von **Phytaseeinsatz in Schweine- und Geflügeldiäten**

Begründung: Neben der besseren Ausnutzung des Phosphors aus Getreide und Getreideprodukten kann durch Phytasezugabe ebenfalls eine bessere Verwertung nativer Kupfer- und Zinkgehalte dieser Produkte erreicht werden (WINDISCH & KIRCHGESSNER, 1996; PALLAUF & RIMBACH, 1997). Hierdurch ist eine Verringerung der Kupfer- und Zinksupplementierung möglich, die nach WINDISCH (2002) zu signifikant niedrigeren Kupfer- und Zinkfrachten aus der Schweinehaltung führen könnte. Der Einsatz von Phytase bewirkt generell beim Monogastrier eine erhöhte Bioverfügbarkeit von Kupfer und Zink (WAGNER & HÜFFMEIER, 1999). Somit sollte sowohl aus Sicht der Phosphorminimierung bei den

Ausscheidungen dieser Tiergruppen (Schweine und Geflügel) aber auch hinsichtlich einer minimierten Kupfer- und Zinkausscheidung zum Einsatz dieser Maßnahme geraten werden. Während bereits über $\frac{3}{4}$ der gehandelten Mischfuttermittel in der Schweinemast Phytase enthalten, sind dies im Bereich der Mineralfuttermittel nur rund 30 % (RWZ, 2003). Hofeigene Mischungen werden dementsprechend selten mit Phytasezusatz gefüttert. Zur Einschätzung der Bioverfügbarkeit nativer Elemente aus Grundfuttermitteln besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf (SCHULTHEIß ET AL., 2003).

VI. Minimierung des Schwermetalleintrages aus **Stalleinrichtungsmaterialien**

Begründung: Verzinkte Stalleinrichtungen konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit als eine Zinkquelle mit maximal 6 % Eintragsanteil in den Stall identifiziert werden. Möglichkeiten zur Verminderung der Abtragsraten durch Korrosionsschutz bei metallischen Materialien incl. der Verzinkung selbst sind Stand der Technik. Da der Stallbau und hier besonders die Montage von Aufstallungseinrichtungen häufig als Eigenleistung landwirtschaftlich Beschäftigter ausgeführt wird, ist die landwirtschaftliche Bauberatung hier gefordert.

Forschung in folgenden Bereichen:

VII.1 **Alternativen zu kupfer- und zinkhaltigen Trägersubstanzen in Fütterungsarzneimitteln**

Begründung: Zumindest für den Bereich der Ferkelaufzucht ist von einem großen Minderungspotential für den Eintrag an Kupfer und Zink über diesen Eintragspfad auszugehen (vgl. ungeklärten Zinkaustrag Stall von Betrieb 6, Kap. 5.1.2.2.3). Aufgrund des ungenügenden Kenntnisstandes, vor allem hinsichtlich alternativer Behandlungen, können entsprechende Maßnahmen nicht als praxisreif beurteilt werden.

VII.2 **Ersatz von Kupfervitriol und ZnSO₄-Lösungen zur Klauendesinfektion in der Rinder-/Milchviehhaltung**

Begründung: Gäbe es wirkungsvolle und umweltschonendere Alternativen, könnte der bürokratische Aufwand eines Rücknahmesystemes (siehe II) umgangen werden.

VII.3 **Organische Säuren mit leistungsförderndem Potential**

Begründung: Organische Säuren können den leistungssteigernden Effekt von Kupfer teilweise ersetzen (WINDISCH & ROTH, 2002) und gewinnen daher an Bedeutung (KIRCHGESSNER &

ROTH, 1998). Allerdings liegen noch keine ausreichenden Ergebnisse aus Untersuchungen unter Praxisbedingungen vor, um die Praxisreife sicherzustellen.

VII.4 Einsatz von Spurenelementverbindungen mit hoher Bioverfügbarkeit

Begründung: Organisch gebundene Spurenelementverbindungen (Komplexe und Chelate mit Aminosäuren und Proteinen) gewinnen in der praktischen Schweinefütterung zunehmend an Bedeutung (FLACHOWSKY, 1997; SCHENKEL, 2000; GRAFE & WESTENDARP, 2002, WINDISCH, 2002). Der Vorteil dieser Verbindungen wird in der teilweise besseren Bioverfügbarkeit in Gegenwart von Phytat und anderen Komplexbildnern gesehen. Dadurch könnte die Kupfer- und Zinkversorgung auf einem niedrigerem Niveau sichergestellt werden als dies durch anorganische Quellen der Fall ist (SCHULTHEIß ET AL., 2003). Allerdings existieren unter den anorganischen Bindungsformen durchaus solche (Sulfate, Chloride) die der Bioverfügbarkeit vieler organischer Kupfer- und Zinkquellen vergleichbar sind (WINDISCH, 2002). Gesicherte Empfehlungen sind bisher nicht abzuleiten. Allerdings ist das Potential durch den gezielten Einsatz von Spurenelementverbindungen als geringer anzusehen (SCHULTHEIß ET AL., 2003).

VII.5 Einsatz gering verunreinigter Spurenelementverbindungen

Begründung: Ein Teil der Cadmium-, Chrom-, Nickel- und Blei-konzentrationen in den unterschiedlichen Mineralfuttermitteln läßt sich vermutlich auf Verunreinigungen der Rohstoffe zurückführen. Nach SCHULTHEIß (2003) ist zu prüfen, inwieweit durch die Verwendung gering verunreinigter Rohstoffe und die Optimierung der Herstellungsprozesse weitere Möglichkeiten zur Reduktion von unerwünschten Schwermetall-einträgen erschlossen werden können.

VII.6 Untersuchung von **Farben/Lacken** auf ihren Beitrag zum Schwermetallinput

Begründung: Nicht bzw. noch nicht ausreichend erforscht erscheinen die Beiträge dieser Materialien am Schwermetalleintrag in den Stall, bzw. in die Wirtschaftsdünger. Die daraus zu erzielenden Minderungspotentiale können aber nach SCHULTHEIß ET AL. (2003) als eher gering angesehen werden.

VII.7 Verwendung **schwermetall- bzw. abriebarmer Materialien in Maschinen und Geräten** zur Futterbergung, -verarbeitung, -entnahme und -vorlage.

Begründung: Der Eintrag über diesen Pfad könnte für den Eintrag von Chrom von Bedeutung sein (vgl. Betrieb3, Kap. 5.1.2.1.3). Auch UHLEIN (2001) berichtet im Rahmen des gemeinsamen UBA-F+E Vorhabens von einem signifikanten Anstieg der

Chromkonzentrationen durch Schrotten einer Getreidemischung. Allerdings ist fraglich, ob hier ein nennenswertes Potential zur Verminderung des Eintrages vorliegt, ohne andere Nachteile in Kauf zu nehmen.

Die Optionen I-IV können **kurz- bis mittelfristig** zu einer Verringerung der Schwermetalleinträge in Wirtschaftsdünger bewirken, der Bereich VII (Forschung) kann langfristig hierzu dienen.

5.2 Deposition

Neben bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleinträgen wurden auf ausgewählten Betrieben auch Proben des Staubniederschlages genommen und auf Schwermetalle untersucht. Die ermittelten Ergebnisse sind Tab. 5-67 zu entnehmen.

Tab. 5-67: Schwermetallfrachten durch Staubniederschlag im Außenbereich untersuchter Betriebe

Betrieb	As	Cd	Cr	Cu g ha ⁻¹ a ⁻¹	Ni	Pb	Zn
2	3,1	0,7	19,6	n.u.	17,2	27,5	214
3	1,5	1,0	9,6	n.u.	15,3	29,5	201
4	3,0	1,1	12,7	n.u.	10,6	41,0	231
6	n.u.	1,6	n.u.	n.u.	7,9	25,4	354
11	1,4	0,8	12,8	n.u.	18,8	25,2	137

Die gezeigten Ergebnisse lagen alle im Bereich zuvor gezeigter Literaturdaten (vgl. Tab. 2-22). Die Betriebsstandorte 2 und 4 befanden sich in relativer Nähe zum nördlichen Ruhrgebiet. Dies könnte eine Erklärung für die an diesen Standorten gemessenen höheren Arsenfrachten durch Deposition darstellen. Neben Kupferverhüttung stellt auch Kohleverbrennung eine erhebliche Quelle für Immissionen von Arsen dar (ALLOWAY, 1999).

Warum am Standort 6 die höchsten Cadmium- und Zinkfrachten ermittelt wurden, konnte nicht abschließend geklärt werden. Ein Zusammenhang zu den im Stall gemessenen Depositionen ist aber zu vermuten (vgl. Tab. 5-38). Vergleicht man die geschilderten Ergebnisse mit den zuvor ermittelten Salden aus Bewirtschaftungsmaßnahmen (Tab. 5-30 und 5-31), so kommt man durchschnittlich zu folgenden Ergebnissen:

Die Einträge an den Elementen Cadmium und Nickel stammten ungefähr zu gleichen Anteilen aus landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen und Deposition. Mit zunehmender Substitution von organischen Düngern aus der Tierhaltung durch Mineraldünger oder Klärschlamm stieg der Anteil landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen wie bei Betrieb 11 auf ein vielfaches des Eintrages durch Deposition. Dies galt auch für Nickel.

Für den Chromeintrag waren vorwiegend landwirtschaftliche Bewirtschaftungstätigkeiten verantwortlich. Der Faktor zwischen Deposition und Landwirtschaft als Eintragsverursacher schwankte dabei stark.

Auch bei Blei variierte die Situation sehr stark. Teilweise war der landwirtschaftlich bedingte Flächenauftrag nur halb so groß wie der durch Deposition verursachte (Betrieb 4). Aber auch bei diesem Element überstieg der landwirtschaftliche Anteil den aus Deposition teilweise um

ein vielfaches (Betriebe 9, 10b und 11).

Die Einträge an Zink durch Deposition lagen nur im Falle der ausschließlich mineralischen Düngung auf gleichem Niveau wie die Einträge aus Bewirtschaftung. Letztere wiesen für Zink sonst immer ein höheres Eintragsaufkommen auf als die Deposition.

Für Kupfer wurden keine eigenen Erhebungen durchgeführt. Legt man aber Depositionsmeßdaten des UBA aus dem Jahre 1999 über 11-13 g Kupfer ha⁻¹·a⁻¹ zugrunde (BANNICK ET AL., 2001), so wird dieses Element auf konventionell genutzten landwirtschaftlichen Flächen um ein Vielfaches durch Bewirtschaftungsmaßnahmen aufgetragen.

Die Ergebnisse zeigen, daß, wenn der Schwermetalleintrag auf landwirtschaftlich genutzte Flächen gesenkt werden soll, Schwermetalleinträge aus Deposition und Bewirtschaftungsmaßnahmen zu reduzieren sind.

Um Aufschlüsse über Schwermetalleinträge während der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung zu gewinnen, wurden auch in den Stallungen von Betrieb 3 und 6 Depositionsmessungen unternommen. Da sie teilweise in Verbindung zu den Ergebnissen der Außenmessungen zu sehen sind (vgl. v.a. Betrieb 6), werden sie ebenfalls an dieser Stelle angezeigt.

Tab. 5-68 zeigt Schwermetallfrachten innerhalb der Stallungen.

Dabei zeigte sich, daß aufgrund der bedeutend höheren Staubbelastung im Schweinestall dort auch größere Mengen an Schwermetallen abgelagert wurden als im Boxenlaufstall von Betrieb 3. Da sich der Schweinestall von Betrieb 6 in Ortslage befindet, lag die Entfernung des Stalles vom Außenmeßpunkt (Tab. 5-31) in relativer Nähe (ca. 30 m), worüber sich die zuvor erwähnten relativ hohen Gehalte im Außenbereich erklären könnten. Der Vergleich zur Außenluft deutet aber auch darauf hin, daß die untersuchten Stallungen nur in ihrer unmittelbaren Umgebung als relevante Emissionsquelle für Schwermetalle bzw. Zink anzusehen sind. KÖLLNER UND GÄRTNER (2002) führen derzeit Untersuchungen zur Feinstaubbelastung durch Stallanlagen durch.

Tab. 5-68: Schwermetallfrachten im Staubniederschlag der Stallluft untersuchter Betriebe

Betrieb	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
				µg m ⁻² d ⁻¹			
3	n.u.	0,3	n.u.	n.u.	4,7	7,7	893,8
6	n.u.	0,7	n.u.	n.u.	11,3	30,8	4768

6 Kontrolle der Handlungsoptionen

Um die in den Kapiteln 5.1.1.5 (pflanzliche Produktion) und 5.1.2.4 (tierische Produktion) vorgeschlagenen Maßnahmen zur Verringerung des Schwermetall-eintrages während der untersuchten Produktionsprozesse hinsichtlich ihrer Wirksamkeit einzuschätzen, wurden für die milchviehhaltenden Futterbaubetriebe 1 und 3 sowie für die schweinehaltenden Veredelungsbetriebe 6 und 7 Modellkalkulationen vorgenommen. Diese zeigen, um **wieviel Prozent die jeweilige Maßnahme den Schwermetalleintrag auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen senken (-) bzw. unter Umständen erhöhen (+) würde.**

Sofern bei einem Betrieb mehrere Maßnahmen Einfluß auf die Schwermetalleinträge der bewirtschafteten Flächen hätten, wird ebenfalls die Summe der relativen Veränderung aus den einzelnen Maßnahmen angegeben (Σ der Maßnahmen [%]).

Ebenfalls wird der zu erwartende Schwermetalleintrag bei Durchführung aller jeweils angeführten Reduktionsmaßnahmen gezeigt (Ist nach Reduktion [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]).

Für Maßnahmen, die im Bereich der Tierproduktion ansetzen, wurde von der Annahme ausgegangen, daß die Eintragsanteile der Pfade auch ihrem Anteil an den Austragspfaden (Wirtschaftsdünger) entsprechen. Zwar liegt auch hierin eine Fehlerquelle, da Bilanzlücken bei den Gesamtstallbilanzen, wie gezeigt, z.T. nicht geschlossen bzw. erklärt werden konnten, allerdings kann durch das hier angewandte Verfahren eine geeignete Abschätzung der Effizienz der einzelnen Maßnahmen erfolgen.

Folgende Handlungsoptionen werden überprüft und **nachfolgend wie in Klammern abgekürzt:**

Höchstgrenze für P-Düngung (P-red.)

Keine Klauenbadflüssigkeit in Wirtschaftsdünger (Klauenbad)

Bedarfsgerecht mineralisiertes Milchleistungsfutter (MLF)

Spurenelementgehaltabsenkung in Alleinfuttermitteln für Schweine nach VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 (Grenzwerte EG)

Wie zuvor beschrieben, werden die Potentiale der vorgeschlagenen Handlungsoptionen anhand der Tabellen 6-1 für Betrieb 1 (Acker), 6-2 für Betrieb 3 (Grünland), 6-3 für Betrieb 6 (Acker) und 6-4 für Betrieb 8 (Acker) verdeutlicht. Diese werden vorab der Handlungsoptionen zusammen gezeigt, da die Handlungsoptionen häufig Einfluß auf mehrere Betriebe haben.

Tab. 6-1: Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Futterbaubetriebes 1

Maßnahme	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	bewirkt Reduktion ¹ des Eintrages [%]					
P red.	12	9	<1	<1	+ 10 ¹	-
Klauenbad	-	-	64	3	<1	<1
MLF	n.ü.	n.ü.	<1	n.ü.	n.ü.	2
∑ der Maßnahmen	12	9	~ 64	<4	+ <11	<3
Ist nach Reduktion [g ha-1 a-1]	2,15	30,9	318	26,0	34,0	974

¹ Zunahme resultiert aus kompensierender KAS-Gabe für verringerten DAP-Einsatz (bei P-red.)
n.ü.: nicht überprüfbar - keine bzw. unwesentliche Auswirkung

Tab. 6-2: Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Grünlandflächen des Futterbaubetriebes 1

Maßnahme	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	bewirkt Reduktion des Eintrages [%]					
Klauenbad	-	-	49	<1	-	-
MLF	n.ü.	n.ü.	6	n.ü.	n.ü.	21
∑ der Maßnahmen	-	-	55	<1	-	21
Ist nach Reduktion [g ha-1 a-1]	2,91	45,1	92,9	34,2	36,7	760,8

n.ü.: nicht überprüfbar - keine bzw. unwesentliche Auswirkung

Tab. 6-3: Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Veredelungsbetriebes 6

Maßnahme	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	bewirkt Reduktion des Eintrages [%]					
Grenzwerte EG	n.ü.	n.ü.	4	n.ü.	n.ü.	21
∑ der Maßnahmen	n.ü.	n.ü.	4	n.ü.	n.ü.	21
Ist nach Reduktion [g ha-1 a-1]	0,55	52,7	541	16,7	17,2	1276

n.ü.: nicht überprüfbar

Tab. 6-4: Angenommene Auswirkungen ausgesuchter Optionen auf den durchschnittlichen Gesamtschwermetalleintrag auf die Ackerflächen des Veredelungsbetriebes 8

Maßnahme	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	bewirkt Reduktion des Eintrages [%]					
P-Red.	67	25	2	20	23	3
Grenzwerte EG	n.ü.	n.ü.	7	n.ü.	n.ü.	3
∑ der Maßnahmen	67	25	9	20	23	6
Ist nach Reduktion [g ha-1 a-1]	0,41	830	289	15,6	12,5	592

n.ü.: nicht überprüfbar

1. Höchstgrenze für P-Düngung (P-red.)

Diese Maßnahme würde bei den Betrieben 1 und 8 greifen, deren P-Düngung hierdurch limitiert werden würde. Die Auswirkung dieser Maßnahme zeigt für Betrieb 1 Tab. 6-1 und für Betrieb 8 Tab. 6-4. Der Verwendung wirtschaftseigener Dünger wurde bei diesen Kalkulationen Priorität eingeräumt, so daß Reduktionen der Einträge aus verringerten mineralischen P-Düngergaben resultieren. Ebenfalls wurde davon ausgegangen, daß bei Betrieb 1 die verringerte N-Düngung durch DAP durch Einsatz von KAS substituiert würde, wodurch es zu einem Anstieg des Bleieintrages käme.

P-red. kann v.a. für die **Reduktion des Cadmumeintrages** als wirksam angesprochen werden (12-67 % Reduktionspotential). Dies gilt ebenfalls abgeschwächt für Chrom. Auch für Nickel und Blei kann diese Maßnahme einen Beitrag zur Reduktion leisten. Die die Eintragsverringering an Cadmium fällt dabei um so stärker aus, je mehr mineralische P-Dünger eingespart werden (siehe Betrieb 8).

Für eine Reduktion des Kupfer- und Zinkeintrages ist diese Maßnahme als minimal effektiv anzusehen. Letzteres gilt, sofern sich das P-Limit ausschließlich auf den Einsatz mineralischer P-Düngemittel auswirkt, was bei diesen Betrieben der Fall wäre.

2. Keine Klauenbadflüssigkeit in Wirtschaftsdünger (Klauenbad)

Die Vermeidung des Eintrages von Klauenbadflüssigkeit in Wirtschaftsdünger stellt eine äußerst effiziente Maßnahme zur **Reduktion der Kupfereinträge** auf die LF der untersuchten Milchviehbetriebe 1 (Tab. 6-1) und 3 (Tab. 6-2) dar. Ein als gering einzuschätzendes Reduktionspotential liegt auch für den Nickeleintrag vor.

3. Bedarfsgerecht mineralisiertes Milchleistungsfutter (MLF)

Diese Maßnahme wird anhand der Betriebe 1 (Tab. 6-1) und 3 (Tab. 6-2) demonstriert. Die Grundvoraussetzung einer bedarfsgerechten Kupfer- und Zinkversorgung der Tiere ist dabei als gegeben anzusehen, da die Grundration nach vergleichenden Berechnungen und Analysen als bedarfsgerecht einzustufen ist (vgl. Kap. 5.1.2.1.3.). Da Betrieb 1 infolge einer TMR-Fütterung nur geringe Anteile Milchleistungsfutter einsetzte, würde diese Maßnahme bei diesem Betrieb ohne relevante positive Auswirkung bleiben. Bei Betrieb 3 hingegen könnte v.a. der Zinkeintrag auf die LF um mehr als 20 % verringert werden. Da der überwiegende Anteil der Milchviehhalter Milchleistungsfutter einsetzt, erscheint diese Maßnahme daher als geeignet, v.a. die **Zinkfrachten** zu **verringern**. Eine konkrete Aussage zu Auswirkungen

dieser Maßnahme auf die Elementfrachten an Cadmium, Chrom, Nickel und Blei kann nicht konstatiert werden. Auch für diese Elemente, insbesondere für Cadmium, ist aufgrund der Vergesellschaftung mit Zink von einem z.Zt. nicht näher definierbaren Reduktionspotential auszugehen.

4. Spurenelementgehaltabsenkung in Alleinfuttermitteln für Schweine nach VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 (Grenzwerte EG)

Diese Maßnahme ist bereits geltendes Recht. Allerdings liegen über die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Schwermetallfrachten auf LF noch keine Daten vor. Hier wird eine Abschätzung für Kupfer und Zink gegeben.

Die durch die neue Verordnung gesetzten Grenzwerte dürften auf den Betrieben 6 (Ferkelerzeugung, Tab. 6-3) und 8 (Schweinemast, Tab. 6-4) zu einer **moderaten Verringerung der Kupfereinträge** (<10 %) auf die LF führen. Lediglich für den Ferkelerzeuger (Betrieb 6) würde aus dieser Maßnahme eine rechnerische **Reduktion des Zinkeintrages** um 21 % resultieren.

Über eine einhergehende Reduktion anderer Schwermetallfrachten können auch hier keine konkreten Angaben gemacht werden (siehe MLF). SCHULTHEISS ET AL. (2003) gehen, bezogen auf den Gesamteintrag über alle eingesetzten Futtermittel in einem schweinehaltenden Veredelungsbetrieb mit geschlossenem System, von folgenden Eintragsanteilen der Mineralfuttermittel aus: Cadmium 23 %, Chrom 80 %, Nickel 55 % und Blei 45 %.

7 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die mit unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsweisen verbundenen Schwermetalleinträge und –austräge in/aus Böden zu erfassen und daraus Maßnahmen gegen eine potentielle Schwermetallanreicherung landwirtschaftlich genutzter Böden abzuleiten.

Im Rahmen des **MUNLV NRW-Projektes** „Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential“ und des **UBA F+E-Vorhabens** „Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme“ wurden 10 landwirtschaftliche Betriebe der Gattungen Futterbau (Milchvieh/Mastbullen), Schweinehaltung (Ferkelerzeugung/Mast), Mastputenhaltung sowie Marktfrucht- und Freilandgemüseanbau untersucht.

Das Kompartiment **pflanzliche Produktion** wurde mit Hilfe einer **Gesamtschlagbilanz** [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$], der Bereich der **tierischen Produktion** durch eine **Gesamtstallbilanz** [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] untersucht. Aufgrund des Einflusses der tierischen Produktion auf die pflanzliche Produktion, wurden die untersuchten Betriebe folgendermaßen gruppiert: Futterbaubetriebe (Milchviehhaltung/Bullenmast), Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung (Ferkelaufzucht/geschlossenes System/Schweinemast), Veredelungsbetrieb mit Mastputenhaltung, Marktfruchtbaubetrieb mit organischer Düngung durch Geflügelmist oder Klärschlamm und Freilandgemüsebaubetrieb mit ausschließlichem Mineraldüngereinsatz.

Für den Bereich der **pflanzlichen Produktion** konnten **folgende Feststellungen** getroffen werden:

Die **Einträge** der einzelnen Elemente durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung schwankten auf Acker und Grünland innerhalb folgender Bereiche [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]: Cadmium ($0,5\text{--}4,6^\delta$),

^δ Wert kommt dadurch zustande, daß Betrieb Flächen anschließend für eine zweifeldrige Rotation, deren Ein- und Austräge nicht erfaßt wurden und für die die P- und K-Grunddüngung bereits abgeschlossen war, abgab. Bei ausschließlicher mineralischer N-Düngung dieser Folgekulturen, halbieren sich die ungefähr die ermittelten durchschnittlichen Cadmumeinträge.

Chrom (14-1108), Kupfer (55-973), Nickel (9,5-41), Blei (10-173) und Zink (251-1609). Die **Austräge** durch Ernteprodukte wichen in absoluten Zahlen dagegen nur gering voneinander ab. Durchschnittlich betrug der Austrag bei Acker/Grünland, dargestellt als arithmetisches Mittel [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$], für Cadmium (1,6/1,1), für Chrom (5,1/7,7), für Kupfer (43/51), für Nickel (4,3/7,5), für Blei (4,6/8,0) und für Zink (215/254). Die Einträge auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen führten auf dem Ackerland der konventionell wirtschaftenden Betrieben generell zu **signifikanten Eintragsüberhängen**, definiert als bewirtschaftungsbedingter Eintrag abzüglich des Austrages durch Ernteprodukte für die Elemente Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink. Diese signifikanten Eintragsüberhänge bewegten sich bei der Bewirtschaftung von **Ackerflächen** in folgenden Bereichen: Chrom (21-1101), Kupfer (37-828), Nickel (11-38), Blei (8,7-171) und Zink (221-1427) (alle Angaben [$\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]). Das Cadmiumsaldo war hingegen bei den konventionell wirtschaftenden Betrieben nicht generell als signifikanter Eintragsüberhang ausgeprägt. Die schweinehaltenden Veredelungsbetriebe hatten keine Eintragsüberhänge bzw. wiesen teilweise einen Austragsüberhang auf, die ceteris paribus zu einer Cadmiumanreicherung des Bodens führen würden. Die Cadmiumsalden bei der Bewirtschaftung der Ackerflächen der Futterbaubetriebe führten nur in einem Fall (Mastbullen, 2,8 GV ha^{-1} + mineralischer P-Düngung) zu signifikanten Eintragsüberhängen. Alle anderen untersuchten Betriebstypen (Mastputen, Marktfruchtbau mit Zukauf organischer Dünger, Freilandgemüseanbau mit ausschließlichem Mineraleinsatz) bewirtschafteten ihre Ackerflächen mit einem signifikanten Eintragsüberhang an Cadmium zwischen 0,9 bis 6,8 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Letzterer Wert kam aber dadurch zustande, daß der betreffende Gemüsebaubetrieb die Flächen anschließend für eine zweifeldrige Rotation, deren Austräge nicht erfaßt wurden und für die die P- und K-Grunddüngung bereits abgeschlossen war, abgab.

Bei der Bewirtschaftung des **Grünlandes** wiesen alle untersuchten Betriebe signifikante Eintragsüberhänge für Chrom (10-430), Kupfer (45-895), Nickel (6-26), Blei (12-27) und Zink (180-787) ($\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) auf. Der ökologisch wirtschaftende Betrieb wies die geringsten Eintragsüberhänge auf. Für Cadmium lag bei seiner Wirtschaftsweise wie auf Ackerland kein signifikanter Eintragsüberhang vor. Die Cadmiumsalden der konventionell wirtschaftenden Betriebe waren als signifikante Eintragsüberhänge zu deuten und bewegten sich zwischen 0,4 und 1,4 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

Um **unterschiedliche** Betriebstypen und damit auch unterschiedliche **Düngestrategien** miteinander **vergleichen zu können**, wurden die Gesamtschlageinträge der Betriebe auf

Basis Netto-SM-Input/P-Düngeniveau berechnet. Der Netto-SM-Eintrag ergab sich dabei aus den bewirtschaftungsbedingt aufgebrauchten Schwermetallfrachten abzüglich Schwermetallfrachten in Wirtschaftsdüngern, welche aus wirtschaftseigenen Futtermitteln resultierten. Durch diese Vorgehensweise konnte darüber hinaus die Auswirkung des Standortes auf Schwermetallfrachten über Wirtschaftsdünger sowie das tatsächliche Düngungsniveau ausgeblendet werden. Dies **ermöglicht** einen **überregionalen Vergleich** von Betrieben hinsichtlich ihrer bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleinträge. Zuvor war festgestellt worden, daß das **P-Düngeniveau** recht verschieden war und sich häufig zwischen 100-130 kg P₂O₅ bewegte. Folgende **Aussagen** ließen sich dadurch **für die konventionell bewirtschafteten Schläge** treffen:

Die **Düngung mit Wirtschaftsdüngern** bzw. organischen Düngern aus der Tierhaltung war **hinsichtlich des Cadmиеintrages immer als vorzüglich** gegenüber Mineraldüngereinsatz zu sehen.

Auf den Eintrag an Chrom, Nickel und Blei wirkten sich dagegen überwiegend die Auswahl der Kalkdüngemittel bzw. bei Blei auch die Wahl des N-Düngers aus.

Sofern keine Düngung mit Spurennährstoffdüngern vorgenommen wurde, bedingte der Einsatz **organischer Dünger aus der Tierhaltung** die höchsten Einträge an Kupfer und Zink. Dabei konnten folgende Produktionszweige der Tierhaltung in genannter **Reihenfolge** mit abnehmenden **Kupfereinträgen** verbunden werden: Milchviehhaltung, Ferkelerzeugung, Schweinemast~Putenmast, Bullenmast. Die geringsten mit dem P-Düngeniveau verbundenen Kupfereinträge konnten bei dem Gemüsebaubetrieb ermittelt werden, der ausschließlich mineralisch düngte. Hinsichtlich des **Zinkeintrages** ließen sich die **Produktionszweige der Tierhaltung** nach gleichem Prinzip wie folgt **ordnen**: Ferkelerzeugung, Schweinemast, Putenmast~Milchviehhaltung, Bullenmast. Auch hinsichtlich des Zinkeintrages wies die ausschließlich mineralische Düngung die geringsten Nebeneinträge an Zink auf.

Aus **Klärschlammeinsatz** resultierten trotz vergleichsweise niedriger Schwermetallgehalte des verwendeten Schlammes bei allen Elementen hohe Einträge. Im besonderen konnte dies für Blei und Cadmium beobachtet werden.

Abschließend konnten für den Bereich der pflanzlichen Produktion folgende Maßnahmeempfehlungen gegeben werden:

Festschreibung einer **Höchstgrenze für die Phosphordüngung** (80 kg P₂O₅ ha⁻¹·a⁻¹) mit Ausnahmen für Fruchtfolgen mit Maisanbau und Flächen, die unterhalb Versorgungsstufe C liegen

Förderung der **Substitution von Mineraldüngern durch Wirtschaftsdünger** aus der Tierhaltung auch im überbetrieblichen Bereich, bei gleichzeitigem Gebot der Verringerung der Kupfer- und Zinkgehalte in den tierischen Wirtschaftsdüngern

Regelmäßiges **Monitoring eingesetzter Düngemittel incl. Rückstandskalke** hinsichtlich der Einhaltung der in der künftigen DüMV festgeschriebenen Grenzwerte und evtl. Verschärfung der Grenzwerte derselben für Kalkdünger

Deklaration von **Schadstoff/Nährstoff-Quotienten** für alle Handelsdünger

Außerdem sollten in den folgenden Bereichen gezielte **Forschung** betrieben werden:

Möglichkeiten zu einem wettbewerbsfähigen **Nährstoff- v.a. P-Recycling** aus **Klär-schlamm**

Reduktionsmöglichkeiten der Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern (v.a. Kupfer und Zink),

Reduktionsmöglichkeiten der Schwermetallgehalte in mineralischen Handels-düngern

Für Handlungsoption I wurde für zwei der Untersuchungsbetriebe ein Verminderungspotential für den bewirtschaftungsbedingten Cadmiumeintrag von 12 bzw. 67 % errechnet. Im letzteren Fall hätte diese Maßnahme auch eine relevante Verringerung der Chrom-, Nickel- und Bleieinträge auf die LF zur Folge.

Für den Bereich der **tierischen Produktion** können, gegliedert nach Tierart, **folgende Ergebnisse** festgehalten werden:

- **Futterbaubetriebe mit Rindviehhaltung**

Hinsichtlich ihrer Schwermetalleinträge und -austräge konnten die unterschiedlichen Tierhaltungsverfahren **Milchviehhaltung** und **Bullenmast** deutlich voneinander **unterschieden** werden. Bedingt durch einen höheren Futterbedarf des Milchviehs lagen die Schwermetallumsätze bei diesem Produktionsverfahren erheblich höher, unabhängig davon, ob es sich um den ökologisch oder die konventionell wirtschaftenden Betriebe handelte.

Milchviehhaltung

Die **Stalleinträge** in g pro GV und Jahr bewegten sich bei den Milchvieh haltenden Betrieben für die jeweiligen Elemente zwischen Cd (0,9-1,4), Cr (6,6-8,1), Cu (84-351), Ni (6,4–11), Pb (6,0-8,6) und Zink (378- 652). Mit Ausnahme von Kupfer, das auf den beiden konventionell wirtschaftenden Milchviehbetrieben durch den Einsatz von Kupfervitriol als Klauendesinfektion eingesetzt wurde, stellten Futtermittel bei den anderen Elementen immer

den Haupteintragspfad ($\geq 90\%$) dar. Innerhalb dieser Gruppe stellten die wirtschaftseigenen Futtermittel die Haupteintragspfade für die Elemente Cadmium, Chrom und Blei dar. Sofern protein- und/oder energiehaltige Ergänzungsfuttermittel eingesetzt wurden, trugen diese für die genannten Elemente die zweithöchsten Eintragsanteile. Für Nickel stellten sie den Haupteintragspfad dar. Die Anteile der eingesetzten Mineralfuttermittel waren, sofern nicht in größerem Umfang mineralisiertes Milchleistungsfutter eingesetzt wurde, für den Eintrag an Cadmium, Chrom, Nickel und Blei von untergeordneter Bedeutung ($\leq 15\%$, max. 20%). Ein bedeutender Eintragspfad für den Kupfereintrag waren Mineralfuttermittel. Der Zinkeintrag resultierte zwischen 40 und 50% aus dem Einsatz dieser Futtermittel, sofern eine Zinksupplementierung nicht durch mineralisiertes Milchleistungsfutter erfolgte. Errechnete und analysierte Kupfer- und Zinkgehalte in Futtermischungen waren sehr ähnlich und annähernd bedarfsgerecht/optimal. Das Eintragungspotential durch Korrosion und Abrieb der verzinkten Stalleinrichtung konnte durch Untersuchungen auf einem Betrieb für Zink als wenig relevant (5%) und für den Eintrag anderer Elemente als unbedeutend identifiziert werden. Der Zugang von Lebewiehe hatte einen vernachlässigbaren Einfluß auf den Schwermetalleintrag in die Ställe. Die **Stallausträge** [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] schwankten bei den Milchviehbetrieben zwischen folgenden Größenordnungen: Cd ($0,9\text{--}1,3$), Cr ($14\text{--}20$), Cu ($80\text{--}607$), Ni ($9,7\text{--}17,2$), Pb ($14,7\text{--}15,1$) und Zink ($425\text{--}711$). Diese resultierten für Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Blei fast ausschließlich aus den angefallenen Wirtschaftsdüngern incl. Exkrementen. Lediglich für den Austrag an Zink waren außerdem die tierischen Erzeugnisse (v.a. Milch) mit durchschnittlich 8% beteiligt. Die **Stallbilanz** der beiden konventionell wirtschaftenden Milchviehbetriebe wiesen für Kupfer und Blei signifikante Austragsüberhänge auf. Für Kupfer wurden diese Bilanzlücken hinter dem Einsatz von Kupfersulfat zur Klauendesinfektion vermutet. Zwar wurden diese Einträge erfaßt, aus unregelmäßiger Anwendung dieses Produktes können aber Fehleinschätzungen des Ein- bzw. Austrages erfolgt sein. Die Überhänge beim Bleieintrag konnten ebenfalls nicht endgültig geklärt werden. Für die darüber hinaus signifikant höheren Chromausträge als -einträge bei einem der Betriebe wurde aufgrund des hohen Einsatzes an Grassilage zusätzlicher Eintrag durch Abrieb am eingesetzten Gerät zur Futterentnahme, Futtermischung und -vorlage vermutet.

Bullenmast

Bei diesem Haltungsverfahren lagen folgende Stalleinträge [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] vor: Cd ($0,4$), Cr ($1,8$), Cu (27), Ni ($2,6$), Pb ($2,5$) und Zink (154). Anders als bei den Milchviehbetrieben

überwogen für die Einträge an Cadmium, Chrom und Nickel die Anteile aus zugekauften protein- und/oder eiweißhaltigen Futtermitteln. Die Haupteintragspfade für Kupfer und Zink, aber auch für Blei, stellten Mineralfuttermittel dar. Auch die Austräge aus dem Stall [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] waren bedeutend geringer als bei den Milchviehställen und betragen Cd (0,2), Cr (2,4), Cu (39), Ni (5,8), Pb (2,7) und Zink (220). Dies führte für Kupfer, Nickel und Zink zu signifikanten Austragsüberhängen, die nicht geklärt werden konnten.

- **Veredelungsbetriebe mit Schweinehaltung**

Ähnlich wie bei den rindviehhaltenden Betrieben konnten auch innerhalb der Gruppe der schweinehaltenden Betriebe eindeutige **Unterschiede zwischen den Produktionsrichtungen Ferkelerzeugung und Schweinemast** ermittelt werden. Besonders deutlich wurde dies an den **höheren Umsätzen der Spurenelemente Kupfer und Zink im Betriebszweig Ferkelerzeugung**. Im einzelnen betragen die **Schwermetalleinträge** in die Schweineställe [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] für Cd (0,4-0,9), Cr (4,2-6,9), Cu (121-247), Ni (5,9-7,4), Pb (1,3-3,4) und Zink (606-807). Sofern die Tiere einstreulos gehalten wurden, resultierten die Schwermetalleinträge zu $\geq 90\%$ aus Futtermitteln. Lediglich für Blei hatte auch der Eintragspfad Wasser eine Bedeutung (durchschnittlich 20 %). Der Betrieb mit geschlossenem System war Selbstmischer und gab daher Aufschluß über die Anteile der einzelnen Futtermittel. Demnach trugen Mineralfuttermittel besonders für Kupfer ($\geq 50\%$) aber auch für Zink und Chrom die hauptsächlichsten Eintragsanteile. Bei Haltung auf Stroh wurde verstärkt Cadmium, Chrom, Nickel und Blei in den Stall eingetragen. Wirtschaftseigene Futtermittel waren lediglich für den Cadmiumeintrag mit $\geq 30\%$ von größerer Bedeutung. Besonders Nickel wurde verstärkt durch Sojaschrot eingetragen. Die **Stallausträge** [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] schwankten bei den Schweinebetrieben zwischen folgenden Größenordnungen: Cd (0,3-1,0), Cr (6-20), Cu (105-419), Ni (6,4-11,3), Pb (2,0-7,1) und Zink (567-1239). Die Austräge durch Wirtschaftsdünger und Tierabgänge wichen bei Cadmium und Nickel nie signifikant von den Einträgen ab. Bei allen untersuchten Schweineställen traten dagegen signifikante Austragsüberhänge an Blei auf. Ebenfalls traten in zwei von drei Fällen auch signifikante Austragsüberhänge bei Chrom und je einmal bei Kupfer und Zink auf. Ein zusätzlicher, aber nicht klärbarer, Anteil für den Kupfer- und/oder Zinkeintrag wurde im Einsatz von kupfer- bzw. zinkhaltiger Fütterungsarzneimittel und/oder Einstreumittel vermutet. Für Austragsüberhänge an Chrom und Blei wurde der Einsatz von Konverter- oder Hüttenkalk zur Stallhygienisierung nach der Naßreinigung der Ställe vermutet, der sich bei einem der Betriebe letztlich bestätigte. Die Ursachen für die signifikanten Austragsüberhänge an Chrom und Blei aus dem Stall des

ferkelerzeugenden Betriebes sowie für den signifikanten Austragsüberhang von Blei aus dem Stall des Schweinemastbetriebes blieben diffus.

- **Veredelungsbetrieb mit Putenmast**

Als **Einträge** in den Putenstall wurden folgende Beträge [$\text{g GV}^{-1} \text{a}^{-1}$] ermittelt: Cd (0,9), Cr (7,0), Cu (228), Ni (11), Pb (5,3) und Zink (420). Die Haupteintragspfade stellten auch bei diesem Produktionsverfahren die Futtermittel dar. Die Einstreumaterialien Stroh und Hobelspäne spielten für den Eintrag an Cadmium, Chrom und Blei eine Rolle von 15 bis 20 % des Eintragsvolumens. Die **Austräge** an Cadmium, Kupfer, Nickel und Blei unterschieden sich nicht signifikant von den Einträgen. Für Chrom und Zink lagen signifikante Austragsüberhänge vor. Hinter diesen wurden, ähnlich wie bei den nicht erklärbaren Austragsüberhängen in der Schweinehaltung, nicht klärbare Einträge durch Fütterungsarzneimittel und/oder mineralische Einstreumittel vermutet. Letzendlich ließ sich hierüber keine sichere Aussage treffen.

Die Proben von **Wirtschaftsdüngern** verschiedener Tierarten, die auf **Arsen und Quecksilber** untersucht wurden, deckten sich weitgehend mit Angaben der Literatur. Allerdings waren die **Vergleichsmöglichkeiten** aufgrund des beschränkten Stichprobenumfangs sowohl bei den eigenen Untersuchungen als auch denen, die den Literaturwerten zugrunde lagen, beschränkt.

Für den Bereich der **Tierproduktion** konnten folgende **Maßnahmeempfehlungen** abgeleitet werden, um den bewirtschaftungsbedingten Schwermetalleintrag zu verringern:

Rindvieh

- I. Einrichtung eines Rücknahmesystemes für benutzte Klauenbadflüssigkeit
- II. Milchleistungsfutter sollten bedarfsgerecht an Mineralstoffen ergänzt werden
- III. Anweisung der Officialberatung zur Empfehlung der **Entkoppelung von Mengen- und Spurenelementsupplementierung** bei Rindvieh in größeren Tierbeständen

Die Handlungsoptionen I. und II. wurden hinsichtlich ihrer **Reduktionswirksamkeit getestet**. Demnach ließen sich durch Option I die Kupfereinträge auf die bewirtschafteten Acker- bzw. Grünlandflächen bei den untersuchten Betrieben auf die Hälfte reduzieren (-64 bzw. -49 %). Option II würde bei einem durchschnittlichen Einsatz von 3,3 kg Milchleistungsfutter pro Kuh und Tag ein Reduktionspotential für den Zinkeintrag auf die LF von 21 % erbringen. Die Kupfereinträge könnten durch diese Maßnahme um ca. 6 % gesenkt werden. Für die anderen

Elementeinträge würde diese Maßnahme ebenfalls eine Verringerung bedeuten, die aber nicht näher quantifiziert werden konnte.

- **Schweine- und Geflügelhaltung**

Herabsetzung der Spurenelementsupplementierung in der Fütterung
Dies ist bereits aktuell durch die VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003 geschehen. Evtl. müssen hier, nachdem weitere Möglichkeiten der Reduktion erforscht worden sind, weitere Absenkungen vorgenommen werden. Die Auswirkungen der genannten EG-Richtlinie wurden geprüft und ergaben für den Eintrag an Kupfer bzw. Zink auf die LN im Falle des Ferkelerzeugers Reduktionspotentiale von 6 bzw. 21 %. Beim Betrieb mit Schweinemast hätten hieraus unbedeutendere Verringerungen von 7 % für Kupfer und 3 % für Zink resultiert.

Anweisung der Officialberatung zur Empfehlung von **Phytaseinsatz in Schweine- und Geflügeldiäten**

Tierartübergreifend sind beim Bau von Ställen bzw. Anlagen der Tierproduktion Maßnahmen zur **Vermeidung von Korrosion und Abrieb** zu berücksichtigen. Hierauf ist seitens der baulichen Beratung fördernd einzuwirken. Desweiteren sollten **Forschungsanstrengungen** zu folgenden Themen unternommen werden:

1. Trägersubstanzen in Fütterungsarzneimitteln (Alternativen zu Kupfer und Zink)

Ersatz von Kupfervitriol und ZnSO₄-Lösungen zur Klauendesinfektion in der Rinder-/Milchviehhaltung

4. **Organische Säuren mit leistungsförderndem Potential**
5. Einsatz von Spurenelementverbindungen mit hoher Bioverfügbarkeit
6. Einsatz gering verunreinigter Spurenelementverbindungen
7. Untersuchung von **Farben/Lacken** auf ihren Beitrag zum Schwermetallinput

Materialabrieb und damit verbundener Schwermetalleintrag durch **Maschinen und Geräte zur Futterbergung, -verarbeitung, -entnahme und -vorlage** und Erarbeitung von Minimierungsstrategien

Gemessene Schwermetalleinträge durch **Deposition** ließen sich mit denen aus landwirtschaftlicher Bewirtschaftung vergleichen. Zur Senkung der Gesamtschwermetallfrachten müssen demnach auch außerlandwirtschaftliche Bereiche ihren Beitrag leisten.

8 Fazit und Ausblick

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit konnten wesentliche Aussagen über Schwermetallumsätze unterschiedlicher landwirtschaftlicher Produktionsverfahren des Pflanzenbaus und der Tierhaltung getroffen werden. Hieraus wurden konkrete Vorschläge zur Verringerung des Schwermetalleintrages in Agrarökosysteme erarbeitet. Zudem konnten die Bereiche aufgezeigt werden, für die sich zusätzlicher bzw. neuer Forschungsbedarf ergibt. Für die Zukunft sind hieraus weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des Schwermetalleintrages zu erwarten, wie z.B. die Möglichkeit, Höchstgrenzen für Spurenelementgehalte in Alleinfuttermitteln weiter herabzusetzen. Die Wirksamkeit solcher Maßnahmen ließen sich dann in Modellversuchen unter kontrollierten Bedingungen überprüfen und anschließend in Berechnungsmodelle für den Gesamtbetrieb implementieren. Zukünftige Untersuchungen zum Schwermetalleintrag durch Wirtschaftsdünger sollten in jedem Falle den Aspekt des betriebsinternen Schwermetallzyklus berücksichtigen.

Der in letzter Zeit in Kritik geratene Einsatz von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung muß aufgrund der Untersuchungen verteidigt werden. Hinsichtlich des Eintrages an Cadmium, Chrom, Nickel und Blei ist er grundsätzlich positiv zu beurteilen. Dies liegt daran, daß die durch zugekaufte Futtermittel eingetragenen Nährstoffe in den landwirtschaftlichen Betrieb i.d.R. geringere Mengen an den genannten Schwermetallen eintragen als dies bei Import von Nährstoffen durch Mineraldünger der Fall ist. Im Falle der Kupfer- und Zinkfrachten sollte mit den gezeigten Instrumenten eine Verringerung erwirkt werden. Da Kupfer und Zink in der Tierernährung essentiell und damit auch für die Tiergesundheit von entscheidender Bedeutung sind, verbietet sich alleine schon durch den zu berücksichtigenden Aspekt des Tierschutzes eine derartige Festlegung von Höchstgehalten im Endprodukt Wirtschaftsdünger, wie es im BMVEL und BMU-Konzept BMVEL & BMU (2002) „Gute Qualität und sichere Erträge“ getan wird und einen holistischen Ansatz gänzlich vermissen läßt. Dies schließt auch die Frage der Kontrollmöglichkeit solcher Regelungen und die der daraus entstehenden Kosten ein. Im Sinne der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktionsprozesse und des Verbraucherschutzes sind in Zukunft vielmehr pragmatische, effektive und betriebswirtschaftlich tragbare Lösungsansätze zu präferieren.

So bietet folgende **Vision** einen dementsprechenden Ansatz: Möglichst viele Landwirte schließen sich zum Zwecke der Errichtung einer Biogasanlage in der Nähe von Endnutzern für Strom und Wärme zusammen. Dies wird teilweise schon betrieben. Hier darf der Ansatz

aber nicht enden! Das anfallende Koferment enthält zwar schon konzentriertere Nährstoffmengen in der TM, die Transportwürdigkeit dieses Düngers auch in überregionale Bereiche ist dadurch aber noch nicht gegeben. Hier sollte überlegt werden, wie das anfallende Produkt weiter konzentriert werden kann, wie z.B. durch Strippen von Nährstoffen oder durch Zugabe von Mineraldüngern. In diesem Bereich sollten Förderungen der Forschungsaktivitäten ausgebaut werden. Dies um so mehr, als sich hiermit nicht nur die Bereiche pflanzliche und tierische Produktion wieder zusammenführen ließen, was zur Schonung der Ressourcen (v.a. Phosphor) beitragen würde, sondern in ländlichen Gebieten darüber hinaus auch Möglichkeiten der dezentralen Entsorgung von Abfällen aus dem Humanbereich bieten könnte.

Nur wenn es gelingt, zukünftige **Bemühungen zum Bodenschutz nicht auf Kosten der heimischen Landwirtschaft durchzusetzen**, wird man auch dem erklärten Ziel des Verbraucherschutzes und einer verbesserten Nachhaltigkeit gerecht werden. Sollten daher Maßnahmen getroffen werden, die die ohnehin als ungünstig zu beurteilende wirtschaftliche Lage landwirtschaftlicher Betriebe weiter verschlechtern, sind solche Maßnahmen zwingend ausschließlich auf europäischer Ebene durchzusetzen, um zusätzliche Wettbewerbsnachteile weitestgehend zu vermeiden. An dieser Stelle sei deshalb abschließend auf das **EU-Projekt** „Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems - **AROMIS**“ verwiesen, an dessen Ende **Empfehlungen für die Europäische Kommission** stehen werden und in das auch Ergebnisse dieser Arbeit eingeflossen sind.

9 Literaturverzeichnis

- ABFKLÄRV, 1992:** Klärschlammverordnung vom 15.5.1992. BGBl 21, 912-916.
- ALLOWAY, B. J. (HRSG.), 1999:** Schwermetalle in Böden - Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. B. J., Springer-Verlag, Berlin, 540 S.
- ALONSO, M. L., J. L. BENEDITO, M. MIRANDA, C. CASTILLO, J. HERNANDEZ & R. F. SHORE, 2000:** Arsenic, cadmium, lead, copper and zinc in cattle from Galicia, NW Spain. Science of the total environment 264 (2-3), 237-248.
- ALSING, I., H. FRIESECKE, K. GUTHY, H.-TH. KREMHELLER, H.-J. RUDHEL, J. SCHLAGHECKEN & I. SCHNEIDER-BÖTTCHER, 1993:** Lexikon Landwirtschaft. BLV Verlagsgesellschaft mbH, 703 S.
- ANONYMUS, 1997:** Heavy-metal balances in Dutch agricultural soils (In Dutch). Report 28. IKC-landbouw, 61.
- ANONYMUS, 2000:** täglich Mineralfutter. Fachverband der Futtermittelindustrie e. V., jetzt Deutscher Verband Tiernahrung, 41-42.
- ASMUS, F., 1993:** Nährstoffbilanzen und Veränderungen der Gehalte an Pflanzennährstoffen und Schwermetallen in dilluvialen Böden nach langjähriger Verregnung extrem hoher Güllemengen. VDLUFA-Schriftenreihe 37, 117-120.
- AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT, 1986:** Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern- Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA-Fachberichte 1, 74 S.
- AUGUSTINI, C., 2000:** Bundesanstalt für Fleischforschung, Kulmbach. Schriftliche Mitteilung zum UBA-Projekt FKZ 299 72 104 an das KTBL, Darmstadt.
- AYDOGAN, A., 2003:** Untersuchungen zur Aufnahme ausgewählter Blattdünger in verschiedene Kulturpflanzen. Bonner Agrikulturchemische Reihe, Bd. 15, 161.
- BANNICK, C. G., C. EICHMANN, J. FRIEDRICH, R. ODAU & M. ROTH (REDAKTION), 2001:** Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Umweltbundesamt Texte 59-01, 126 S.
- BARBER, S., 1984:** Soil nutrient bioavailability - A mechanism approach. Wiley, New-York.
- BAYR. LA. F. ÖKOL. (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR ÖKOLOGIE) HRSG.: LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1999:** Lufthygienischer Jahresbericht 1998. Schriftenreihe des Landesamtes, Heft 157, 280 S.
- BBODSCHG, 1998: SIEHE BUNDESBODENSCHUTZGESETZ, 1998**
- BBODSCHV, 1999: SIEHE BUNDESBODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG, 1999**

- BELLOF, G., A. WOLF, H. TENHUMBERG & H. O. KNÖPLER, 1999:** Zur Belastung von tragenden Junggründern mit Schwermetallen unter besonderer Berücksichtigung von Blei. VDLUFA-Schriftenreihe Band 52, 365-368.
- BERGER, F., H. GERWIG, W. KÜCHLER, G. LÖSCHAU & U. WOLF, 2003:** Materialien zur Luftreinhalte: Jahresbericht zur Immissionssituation 2001. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Ökologie, 111 S.
- BERGHOFER, R., W. WILCKE, V. LINKES, O. NESTROY & W. ZECH, 1997:** Changes of Al and heavy metal concentrations in slovak soils during the last 25 years. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 160, 469-474.
- BERGMANN, W., 1988:** Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. FischerVerlag, Stuttgart, 762 S.
- BERTSCHE, 2003:** Fa. Dow Agro AG, München. Persönliche Mitteilung.
- BIEN, B., 2001:** Erhebungsuntersuchungen zur Bilanz der Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Cu, Ni und Zn auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Schweine haltender Veredelungsbetriebe. Diplomarbeit, Institut für Agrikulturchemie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, 61 S.
- BIOABFALLVERORDNUNG (BIOABFV), 1998:** Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung-BioAbfV) vom 21. September 1998. Bundesgesetzblatt 1998, Teil 1, Nr. 65, 2955 ff..
- BIOABFV, 1998: SIEHE BIOABFALLVERORDNUNG, 1998.**
- BLT GRUB, BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR TIERZUCHT, 2002:** Schriftliche Mitteilung. Zit. in: ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UHLEIN, 2002: Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 50-58.
- BLUME, H. P., 1981:** Schwermetallverteilung und -bilanzen typischer Waldböden aus nordischem Geschiebemergel. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung und Bodenkunde 144, 156-163.
- BLUME, H. P., 1992:** Handbuch des Bodenschutzes, Bodenökologie und -belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Ecomed-Verlag, Landsberg/Lech, 794 S.
- BMVEL & BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND**

- REAKTORSICHERHEIT), 2002:** Gute Qualität und sichere Erträge – Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden? <http://www.verbraucherministerium.de/landwirtschaft/eckpunkte-duengemittel-05-06-02.pdf>, (abgerufen am 03.09.2003)
- BÖDEKER, H., M. SCHLAAK, E. SIEFERT & J. VRIES, 1994:** Elution von Schwermetallen aus Biomüll und Kompost durch schwache organische Säuren. Müll und Abfall 12/94, 816-827.
- BÖHM, E., T. HILLENBRAND & F. MARSCHIEDER-WEIDEMANN, 2001:** Bilanzierung des Eintrages prioritärer Schwermetalle in Gewässer. UBA-Texte 29/01.
- BOTSCHEK, P., 1995:** Untersuchungen zur Tiefenverlagerung von Nitrat und Schwermetallen im Boden nach unterschiedlich hoher Klärschlammdüngung im Herbst. Cuvillier-Verlag, Göttingen, 140 S.
- BOYSEN, P., 1992:** Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln - Literaturlauswertung und Analysen. Umweltbundesamt Berlin, UBA-Schriftenreihe 55/92, 54 S.
- BRAMM, A., C. SOMMER & H. SOURELL, 1993:** Mittlerer Wasserbedarf für ausgewählte landwirtschaftliche und gärtnerische Kulturpflanzen. In: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 12. erweiterte Aufl., Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), Dülmen, 521.
- BRAUN, U., R. FORRER, B. GANSOHR, W. ODERMATT, F. DIEM & D. GOHM, 2000:** Bleivergiftung in einem Kälbermastbetrieb nach Belegen einer mit bleihaltiger Farbe bemalten Wand. Praktische Tierarzt 81:4 318,321-323.
- BRENK, C., 1998:** Ableitung der landwirtschaftlichen Verwertungspotentiale für organogene Abfallstoffe (Sekundärrohstoffdünger) in Nordrhein-Westfalen anhand eines integrierten Nährstoffversorgungskonzepts und ihre Bewertung im Hinblick auf die Schwermetallflüsse. Shaker-Verlag, Aachen, 219 S.
- BRÜGGEMANN, J., 1999:** Auswirkungen der aktuell diskutierten Höchstwerte für Blei und Cadmium auf Weizen und Roggen aus Deutschland. VDLUFA-Schriftenreihe 52, 449-455.
- BRÜGGEMANN, J., T. BETSCHE, N. TÜMMERS & H. P. THIER, 1996:** Bindungsformen von Cadmium in Weizen.. VDLUFA-Schriftenreihe 44, 575-578.
- BRÜMMER, G. W., J. GERTH & K. G. TILLER, 1986:** Heavy metal species, mobility and availability in soils. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 149, 382-398.

- BUNDESBODENSCHUTZGESETZ, (BBODSCHG), 1998:** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten . Bundesgesetzblatt 1998, Teil 1, Nr. 16, 502 ff.
- BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG, 1999:** Verordnung vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt 1999, Teil 1, Nr. 36, 1554 ff.
- BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN ZEMENTINDUSTRIE, 2001:** Schriftliche Mitteilung im Rahmen des UBA-F+E-Vorhabens FKZ 299 72 104 (Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben) an das KTBL, Darmstadt.
- CLEMENS, J. & J. SIMONS, 2003:** Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn. Persönliche Mitteilung.
- CREMER, N., 2002:** Schwermetalle im Grundwasser Nordrhein-Westfalens unter besonderer Berücksichtigung des Nickels in tieferen Grundwasserleitern der Niederrheinischen Bucht. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 60, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 178 S.
- CRÖBMAN, G., 1999:** Mengenfluß und Bilanz von Zink und Kupfer in der Landwirtschaft. Kreisläufe erwünschter und unerwünschter Stoffe - ihre Bedeutung in der Nahrungskette - Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A: 483, Münster, 32-51.
- DAMEROW, U., 2001:** Institut für Landtechnik der Universität Bonn. Persönliche Mitteilung.
- DAUMER, M. L., 2001:** Country statement "France". In: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems (Aromis). Research project of the European commission research directorates general: Report of the first meeting 21.-22. June 2001, CEMAGREF, Regional centre of Rennes, France. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 77-88.
- DE BELIE, N., B. SONCK, C. R. BRAAM, B. SVENNERSTEDT & M. RICHARDSON, 2000:** Durability of building materials and components in the agricultural environment, part II: Metal structures. Journal of agricultural engineering research, 75, 4, 333-347.
- DELSCHEN, T. & W. WERNER, 1989:** Zur Aussagekraft der Schwermetallgrenzwerte in klärschlammgedüngten Boden. 1. Mitteilung: Der Einfluß verschiedener Bodenparameter auf die "tolerierbaren" königswasserlöslichen Gesamtgehalte. Landwirtsch. Forsch. 42, 29-39.
- DEUTSCHE BAUCHEMIE, 1998:** Holzschutzmittel und Umwelt - Sachstandsbericht.

- DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON, 1996:** Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe, Sachstandsbericht. Heft 458, Beuth Verlag, Berlin.
- DIANATI, M. & E. PRZEMECK, 1992:** Nachwirkungen einer Müllkompost- und Strohdüngung auf die Pflanzenverfügbarkeit von Cd und Zn in Böden mit unterschiedlicher Schwermetallbelastung. VDLUFA-Schriftenreihe 35, 357-362.
- DIEZ, T & M. KRAUSS, 1992:** Schwermetallgehalte und Schwermetallanreicherung in landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns. Landwirtschaftliches Jahrbuch 69. Jhr.,3/92, 343-355.
- DOBERSCHÜTZ, K.-D., M. STOYKE, A. LIPPERT & G. TENNER, 1994:** Untersuchungen in ausgewählten Territorien zum Vorkommen von toxikologisch relevanten Elementen im Boden, im Futter und in ausgewählten tierischen Organen. Institut für Veterinär-Pharmakologie und Toxikologie GmbH, Bernau, 66 S.
- DÖHLER, H., U. SCHULTHEIB, H. ECKEL & U. ROTH, 2001:** Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und der EU - Vergleich mit anderen Düngemitteln und Minderungsansätze. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404, 309-315.
- DOHNE, E., 1993:** Raumgewichte (geschüttet) verschiedener landwirtschaftlicher Erzeugnisse und Betriebsmittel. Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. erweiterte Aufl., Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), Dülmen, 127.
- DRIESSEN, J.J.M. & H. J. WESTHOEK, 1997:** Schwermetalle in Düngemitteln. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 563-566.
- DÜMG, 1994:** SIEHE DÜNGEMITTELGESETZ, 1994
- DÜMV, 2003:** SIEHE DÜNGEMITTELVERORDNUNG , 2003
- DÜNGEMITTELGESETZ (DÜMG), 1977:** Gesetz vom 15. November 1977. BGBl I 1977, 2134. FNA 7820-2. (Zuletzt geändert durch Art. 183 V v. 29.10.2001 I 2785)
- DÜNGEMITTELVERORDNUNG (DÜMV), 2003:** BGBl I, Nr. 57, S. 2373 (Neufassung vom 4. Dezember 2003).
- DÜNGEVERORDNUNG (DÜV), 1996:** Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen vom 26. Januar 1996. BGBl I 1996, 118, FNA 7820-7 (Zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 14. 2.2003 I 235).
- DÜV, 1996:** SIEHE DÜNGEVERORDNUNG, 1996
- EICHERT, T., 2001:** Untersuchungen zur Aufnahme gelöster Stoffe durch Stomata. Bonner Agrikulturchemische Reihe, 8, 183.

- EMBERT, G., 2003:** Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Persönliche Mitteilung.
- ENDER, R., 1986:** Schwermetallbilanzen von Lysimeterböden - am Beispiel der Elemente Vanadin, Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Cadmium und Blei, Marburger Geographische Schriften, Heft 102, 100.
- ERNST, W. & E. N. G. JOOSSE, 1983:** Umweltbelastung durch Mineralstoffe - Biologische Effekte. Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, 234 S.
- FERTIVA, 2003:** Produktinformation. www.fertiva.de. (Abgerufen am 12.12.2003)
- FIEDLER, H. J. & H. J. RÖSLER, 1993:** Spurenelemente in der Umwelt. Gustav Fischer Verlag, Jena, DD.
- FILIPINSKI, M. & M. GRUPPE, 1990:** Verteilungsmuster lithogener, pedogener und anthropogener Schwermetalle in Böden. Zeitschrift für Bodenkunde und Pflanzenernährung 153, 69-73.
- FISCHER, K., 2002:** Bundesanstalt für Fleischforschung, Kulmbach. Schriftliche Mitteilung zum UBA-Projekt FKZ 299 72 104 an das KTBL, Darmstadt.
- FISCHER L., E. ZUR MÜHLEN, G. W. BRÜMMER & H. NIEHUS, 1996:** Atomic force microscopy (AFM) investigations of surface topography of multi-domain porous goethite. European Journal of Soil Science 47, 329-334.
- FLACHOWSKY, G., 1997:** Bewertung organischer Spurenelementverbindungen in der Tierernährung. Mengen- und Spurenelemente, 17. Arbeitstagung, Jena, 599-619.
- FLACHOWSKY, G., 2002:** Zum Spurenelementbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 14-22.
- FMG, 2000:** SIEHE FUTTERMITTELGESETZ, 2000.
- FMV, 2000:** SIEHE FUTTERMITTELVERORDNUNG, 2000.
- FRÜCHTENICHT, K., 2001:** LUFA Oldenburg. Schriftliche Mitteilung.
- FRÜCHTENICHT, K., 2002:** Bilanzierung von Spurenelementen bzw. Schwermetallen in der Geflügelhaltung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 73-80.
- FRÜCHTENICHT, K., 2003:** LUFA Oldenburg. Persönliche Mitteilung.
- FRÜCHTENICHT, K. & H. VETTER, 1983:** Charakterisierung der Schwermetallbelastung durch Messung der Schwermetallgehalte in Pflanzen. Landwirtsch. Forsch. Sonderheft 39, 154-164.

- FRÜCHTENICHT, K., J. HEYN, H. KUHLMANN, L. LAURENZ & S. MÜLLER, 1993A:** Täglicher Frischmistanfall je GV nach Weigert und Fürst. Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. erweiterte Aufl. Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 279.
- FRÜCHTENICHT, K., J. HEYN, H. KUHLMANN, L. LAURENZ & S. MÜLLER, 1993B:** Berechnung des täglichen Frischmistanfalls nach Wolf. Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. erweiterte Aufl. Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 279.
- FRÜCHTENICHT, K., J. HEYN, H. KUHLMANN, L. LAURENZ & S. MÜLLER, 1993C:** Stalldunganfall bei verschiedener Stallhaltung und Einstreu (Festmist und Jauche). Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. erweiterte Aufl. Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 280.
- FUTTERMITTELGESETZ (FMG), 2000:** Gesetz vom 25. August 2000 (zuletzt geändert durch Artikel 6 § 1 des Gesetzes vom 6. August 2002 (BGBl. I S. 3082))
- FUTTERMITTELVERORDNUNG (FMV), 2000:** Futtermittelverordnung vom 23. November 2000, zuletzt geändert am 5. September 2003 (BGBl. Teil I Nr. 49 vom 30.09.2003, S. 1902).
- GÄTH, S. & B. SCHUG, 2000:** Regionalisierung der Filter- und Verlagerungseigenschaften von Böden gegenüber Schwermetallen am Beispiel des Cadmiums. *Bodenschutz* 1, 6-11.
- GAUGLHOFER, J. & V. BIANCHI, 1991:** Chromium. In E. Merian (Hrsg.): *Metals and their compounds in the environment. occurrence, analysis and biological relevance.* Weinheim, 853-878, 1438 S.
- GEISNER, F. & H. HUBER, 1976:** *Der Jungbauer.* Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, BLV Verlagsgesellschaft München, 496 S.
- GENEVINI, P. L., F. ADANI, D. BORIO & F. TAMBONE, 1997:** Heavy metal content in selected european commercial composts. *Compost Science & Utilization*, 5:4, 31-39.
- GFE (GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE) 1987:** Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere Nr. 4, Schweine, DLG-Verlag, Frankfurt.
- GFE (GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE), 1995:** Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Mastrinder Nr. 6, DLG-Verlag, Frankfurt.
- GFE (GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE), 1999:** Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Legehennen und Masthühner (Broiler) Nr. 7, DLG-Verlag, Frankfurt.

- GfE (GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE), 2001:** Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Milchkühen und Aufzuchtrindern Nr. 8, DLG-Verlag, Frankfurt.
- GLADTKE, D., 2003:** Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen. Persönliche Mitteilung.
- GOLDBACH, H. E., 2001:** Agrikulturchemisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. Persönliche Mitteilung.
- GRAFE, A. & H. WESTENDARP, 2002:** Organisch gebundene Spurenelemente in der Schweinefütterung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 105-111.
- GRAHAM, R. D., 1981:** Copper in soils and plants. In Lonegeran, J. F., A. D. Robson, & R. D. Graham: Trace Elements in Soils and Plants. Academic Press, Sydney, 141-163.
- GRÄPER, G., 1995:** Untersuchungen von Schwermetallgehalten in Rinder- und Schweinegülle. Diplomarbeit Fachhochschule Osnabrück.
- GRÜN, M., B. MACHELETT, H. KRONEMANN, M. MARTIN, J. SCHNEIDER & W. PODLESAK, 1994:** Schwermetalle in der Nahrungskette unter besonderer Berücksichtigung des Transfers vom Boden zur Pflanze. Grenzwerte für umweltrelevante Spurenstoffe, Band 1, DLG-Umweltgespräche 7. und 8.09.1993 in Suhl, 7-16.
- GRUPE, M. & E. PLUQUET, 1992:** Zur Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen aus geogen und anthropogen angereicherten Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 32, 815-820.
- GUTSER, R., 1996:** Klärschlamm und Biokompost als Sekundärrohstoffdünger. VDLUFA-Schriftenreihe 44, 29-43.
- HACKENBERG, S. & H. R. WEGENER, 1998:** Schwermetallgehalte von Inputmaterialien zur Herstellung von Biokompost. Zeitschrift für Ernährungswissenschaft 39:2, 60-63.
- HAPKE, H.-J., 2002:** Veterinärmedizinische und pharmakologische Aspekte von Spurenelementen und unerwünschten Stoffen. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 23-30.
- HARTUNG, J., 1989:** Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. R. Oldenbourg Verlag, München, 975.
- HECHT, H., 1997:** Belastung von Fleisch und Fleischerzeugnissen mit umweltbedingten Rückständen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach 36:137, 235-246.

- HECHT, H., 2000:** Umweltbedingte Kontamination - Zusammenhänge zwischen ihrem Vorkommen im Futter und in vom Tier stammenden Lebensmitteln. VDLUFA-Schriftenreihe 55, Teil 4, 46-58.
- HECHT, H., 2003:** Votum zur Verwendung von Bleicherden bei der Herstellung von Futtermitteln. Arbeitsgruppe "Carry-over" unerwünschter Stoffe in Futtermitteln beim Bundesminister für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, <http://www.verbraucherministerium.de/landwirtschaft/futtermittel/votum-bleicherden.htm>. (Abgerufen am 12.12.2003).
- HECHT, H. & J. KUMPULAINEN, 1995:** Essentielle und toxische Elemente in Fleisch und Eiern. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach 34:127, 107.
- HELAL, M., A. UPENOV & N. HAKIM, 1998:** Schwermetallaufnahme durch mykorrhizierende Wurzeln von *Leucaena leucocephala*. VDLUFA-Schriftenreihe 49, 577-580.
- HERMS, U., 1989:** Löslichkeit von Schwermetallen in Böden unter variierenden Milieubedingungen. In: Berhens, D. & J. Wiesner (Hrsg.): Beurteilungen von Schwermetallkontaminationen im Boden. Dechema-Fachgespräche Umweltschutz 2. Aufl., 189-197.
- HERMS, U. & G. W. BRÜMMER, 1984:** Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 147, 400-424.
- HERNANDEZ, J. & K. SHEARER, 2000:** Efficacy of oxytetracycline for treatment of papillomatus digital dermatitis lesions on various anatomic locations in dairy cows. Journal of american veterinary medical association 216, 1288-1290.
- HEYMANN, H. & H. WIECHMANN, 1991:** Untersuchungen zur Cadmiumbelastung in Hamburger Kleingärten. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 66/I, 329-332.
- HINDEL, R. & H. FLEIGE, 1990:** Geogene Schwermetallgehalte in Böden der Bundesrepublik Deutschland. VDI-Berichte 837, 53-74.
- HINDORF, H., 1999:** Institut für Phytomedizin der Universität Bonn. Persönliche Mitteilung.
- HINES, F. L. & S. A. BARBER, 1957:** Chelating ability of soil organic matter. Soil Sci. Am. Proc., 21, 368-373.
- HMC (FA. HMC H. MEYER), 2003:** Flachfederstahl - Mittlere Analysenwerte. <http://www.hmc-meyer.com/federstahl/flachfederstahl/analysenwerte.html>. (Abgerufen 12.12.2003).

- HOCK, B. & E. ELSTNER (HRSG.), 1984:** Pflanzentoxikologie. Der Einfluß von Schadstoffen und Schadwirkungen auf Pflanzen. Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich, 346 S.
- HÖCHSTMENGENVERORDNUNG (EG) NR. 466/2001** der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. Europäisches Amtsblatt Nr. L 77. 1-13, zuletzt geändert durch Verordnung (EG) 1425/2003, Europäisches Amtsblatt Nr. L 203 vom 12.08.2003.
- HÖGL, D., M. HELM & A. GRONAUER, 1995:** Störstoffminderung in Komposten. Landtechnik 50:4, 228-229.
- HONIKEL, K. O., 1995:** Inhaltsstoffe von Fleisch- und Fleischwaren. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung, Kulmbach 34 (130), 347-450.
- HONIKEL, K. O., 2000:** Daten zur Schwermetallkontamination von Nutz- und Wildtieren aus dem Datenbestand der Bundesanstalt für Fleischforschung, Kulmbach, schriftliche Mitteilung zum UBA-Projekt FKZ 299 72 104 an das KTBL, Darmstadt.
- HONIKEL, K. O. & H. HECHT, 1999:** Schadstoffe in Fleisch und Fleischwaren. Kluthe, R. (Hrsg.): Lebensmittel tierischer Herkunft in der Diskussion, 39-46.
- HONSEL, U., JANBEN E. & G. SCHAUMBERG, 1995:** Schwermetalle in Düngemitteln.. VDLUFA-Schriftenreihe 40, 757-760.
- HORAK, O., 1985A:** Zur Bedeutung des Nickels für Fabaceae, I. Vergleichende Untersuchungen über den Gehalt vegetativer Teile und Samen an Nickel und anderen Elementen. Phytion (Austria) 25 (1), 135-146.
- HORAK, O., 1985B:** Zur Bedeutung des Nickels für Fabaceae, II. Nickelaufnahme und Nickelbedarf von „Pisum sativum L.“. Phytion (Austria) 25 (1), 307-310.
- HORAK, O. & M. PUSCHENREITER, 1999:** Einfluß von Zn- und Cu- Düngung auf die Cd-Anreicherung in Weizen und Spinat. VDLUFA-Schriftenreihe 52, 215-218.
- HORAK, O., S. ECKER, P. HERGER & R. REBLER, 1994:** Untersuchungen zur bilanzmäßigen Erfassung von Schwermetallflüssen an Ackerstandorten, VDLUFA-Schriftenreihe 38, 927-930.
- HORNBURG, V. & G. BRÜMMER, 1989:** Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in Böden. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 59/2, 727-732.
- HOTSMA, P., 1999:** Heavy metal contents in calcium fertilisers (in Dutch with english summary). Meststoffen, 57-59.

- HOVMAND, M. F., J. C. TJELL, H. MOSSBAEK, 1983:** Environ Pollut, A30, 27-38. Zit. in ALLOWAY, 1999: Schwermetalle in Böden - Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. B. J., Springer-Verlag, Berlin, 4-60, 540 S.
- IFAU, 2003:** Schadstoffinformationen: Schwermetalle im Trinkwasser.
<http://www.ifau.org/infos/smetalltwinfi.htm>. (Abgerufen am 8.12.2003).
- INDUSTRIEVERBAND FEUERZINKEN, 2002:** Industrieverband Feuerzinken, Düsseldorf.
Persönliche Mitteilung.
- ISERMANN, K., 1992:** Cadmium-Ökobilanzen der Landwirtschaft. Mengen- und Spurenelemente. 12. Arbeitstagung der Friedrich-Schiller-Universität Jena 1992, 200-208.
- ITOX (INSTITUT FÜR UMWELTANALYTIK UND HUMANTOXIKOLOGIE), 2003:** Vorsorgewerte für Böden. <http://www.bbges.de/itox/bbsg4.htm>. (Abgerufen am 12.12.2003).
- JACOBS, G., 1998:** Wieviel Unterfußdüngung braucht der Mais. Deutsches Maiskomitee e. V. Mais, 26(2), 60-63.
- JANBEN, E., 2001:** Schwermetalle und organische Schadstoffe in Böden landwirtschaftlicher Nutzflächen ausgewählter europäischer Länder. VDLUFA-Schriftenreihe 57, Teil 2, 91-108.
- KABATA-PENDIAS, A. & H. PENDIAS, 1992:** Trace elements in soils and plants. CRC press, Boca Raton, Florida, 141, 315 S.
- KAMPE, W., 1980:** Schwermetallkontamination bei Pflanzen. Landwirtschaftliche Forschung, SH 36, 322-335.
- KAMPHUES, J., 1997:** Mit oder ohne Leistungsförderer - Zielkonflikte sind unvermeidbar. Vitamine und Zusatzstoffe in der Ernährung von Mensch und Tier, Jena, 75-90.
- KEHRES, B., 1997:** Schadstoffsituation von Komposten - Konzentration und Schwankungsbereiche. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 83, 313-319.
- KELLER, A., K.C. ABBASPOUR & R. SCHULIN, 2002:** Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. Journal of environmental quality 31 (1), 175-187.
- KERSCHBERGER, M., G. FRANKE & W. SCHURICHT, 2001:** Schwermetallgehalte in landwirtschaftlich relevanten Stoffen. Arch. Acker- Pfl. Boden, 46, 147-164.
- KESSLER, J., R. VOGEL, P. THOMET & M. HADORN, 1999:** Mineralstoffgehalt von Kurzrasenweiden. Agrarforschung 6:3, 88-91.

- KIRCHGESSNER, M., 1997:** Tierernährung. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 582 S.
- KIRCHGESSNER, M. & F. X. ROTH, 1998:** Ergotrope Effekte durch organische Säuren in der Ferkelaufzucht und Schweinemast. Übers. Tierernährung 16, 93-108.
- KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG, 1992:** siehe ABFKLÄRV (1992)
- KLOKE, A., 1984:** Zeitbombe- oder nur halb so schlimm? Das Schwermetallproblem kann nicht pauschal betrachtet werden. DLG-Mitteilungen 23, 1244-1246.
- KLOKE, A., 1985:** Zufuhr von Schwermetallen zum Boden mit Pflanzenschutzmitteln. Berichte über Landwirtschaft, 198. Sonderh., 117-122.
- KLUGE, R., M. MOKRY & F. TIMMERMANN, 1997:** Wirkung von Komposten auf den Ertrag sowie die Schwermetallsituation in Boden und Pflanze. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 647-650.
- KÖHLER, W., G. SCHACHTEL & P. VOLESKE, 1996:** Biostatistik. Springer Verlag, Heidelberg, 285 S.
- KÖLLNER, B. & A. GÄRTNER, 2002:** Ammoniak-Emissionen als Verursacher für Schwebstaubbelastung (PM10/2,5) und Vegetationsschäden. Jahresbericht 2001 des Landesumweltamtes NRW, Essen, 123-125.
- KÖSTER, W. & D. MERKEL, 1985:** Schwermetalluntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Böden und Pflanzen in Niedersachsen. Landwirtschaftskammer Hannover (Hrsg.).
- KOFLER, J., 2001:** Beziehungen zwischen Fütterung und Gliedmaßenkrankungen bei Rindern - Diagnostik, Therapie und Prophylaxe. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irding (Austria), 28. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 2.-3. Mai 2001, 75-92.
- KRÄHMER, R. & B. SATTELMACHER, 1998:** Verfahren zur Bestimmung der Mikronährstoffeffizienz von Nutzpflanzen anhand von Gefäßversuchen, VDLUFA-Schriftenreihe 49, 259-262.
- KRAUSE, O., V. KÖNIG & U. MÜNCH, 1994:** Anorganische Spurenstoffe: Vorkommen in Böden und Grundwasser Thüringens. DLG-Arbeitskreis für Umweltfragen in der landwirtschaftlichen Erzeugung: Grenzwerte für umweltrelevante Spurenstoffe - Ein Beitrag zur Qualitätssicherung für landwirtschaftliche Erzeugnisse. Tagungsband der DLG-Umweltgespräche, 164-174.
- KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ (KRW/ABFG), 1994:** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. BGBl. I vom 27.09.1994, 2705.

- KRIEG, R., 1966:** Die Wirkung verschieden hoher Spurenelementzulagen im Futter Weißer Leghornhennen, II. Mitteilung: Der Spurenelementgehalt im Ei. Arch. f. Geflügelkde. 30, 63-68.
- KRW/ABFG, 1994: SIEHE KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ (1994)**
- KTBL, (KTBL, KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V., DARMSTADT), 2000:** Organische/mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger. Datenbank (Version 1.0).
- KÜHNEN, V., B. BIEN & H. E. GOLDBACH, 2001:** Schwermetallbilanzen (Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink) auf einem Veredelungsbetrieb mit Sauenhaltung. VDLUFA-Schriftenreihe 57, Teil 2, 768-775.
- KÜHNEN, V., B. BIEN & H. E. GOLDBACH, 2002:** Schwermetallbilanzen auf schweinehaltenden Veredelungsbetrieben. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 66-72.
- KUNTZE, H., H. FLEIGE, M. GRUPPE & D. KOCH, 1996:** Mobilität von Schwermetallen in Böden mit erhöhtem geogenem Grundgehalt und anthropogener Zusatzbelastung. Umweltbundesamt Texte 55, Berlin, 274.
- KUNZ, H. G., 1994:** Schwindel oder Wundermittel? - Was sind Güllezusatzmittel und was können sie bewirken? Landwirtschaftliches Wochenblatt Baden-Württemberg, 3, 15-18.
- LABO (BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ), 1995:** Hintergrund- und Referenzwerte für Böden. In: ROSENKRANZ, D., G. BACHMANN, G. EINSELE & H.-M. HARREB (HRSG.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, 3. Band, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, Loseblattsammlung, Kennziffer 9006.
- LABO (BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ), 2000:** Cadmiumanreicherung in Böden/einheitliche Bewertung von Düngemitteln, Bericht der UMK-AMK-LABO-AG (Arbeitsgemeinschaft der Umwelt- und Agrarministerkonferenz-und der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz), Bericht wurde von der 26. Amtschefkonferenz im Oktober 2000 zur Kenntnis genommen. Zit. in BANNICK, C. G., C. EICHMANN, J. FRIEDRICH, R. ODAU & M. ROTH (Redaktion), 2001: Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Umweltbundesamt Texte 59-01, 126 S.

- LANTZSCH, H.-J. & H. SCHENKEL, 1978:** Effect of specific nutrient toxicities in animals and man: zinc. M. Rechcigl (Ed.), CRC Handbook series in nutrition and food, Sect. E. Nutritional Disorders, I, 291-307.
- LAVES, D & S. GÄTH, 2003:** Kurzmitteilung, Stellungnahme der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft zum Konzept des BMVEL und BMU „Gute Qualität und sichere Erträge“. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2003, 166, 267-269.
- LBP (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BODENKULTUR UND PFLANZENBAU), 1997:** Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF), Teil 2, Stoffeinträge, Stoffausträge, Schwermetallbilanzierung verschiedener Betriebstypen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau Nr. 5, Freising-München, 190 S.
- LEINWEBER, P., 1996:** Schwermetallgehalte und Schwermetallbindungsvermögen der Böden im agrarischen Intensivgebiet Südoldenburgs. Vechtaer Druckerei und Verlag, Vechta, 94 S.
- LEISEN, E., 2003:** Einsatz wirtschaftseigener Gülle in Mais als Unterfußdüngung und über Schleppschläuche. <http://www.leitbetriebe.uni-bonn.de/pdf/silomUFD0.PDF>, 80-82. (Abgerufen am 15.06.2003)
- LEONARD, A., 1991:** Arsenic. In E. Merian (Hrsg.): Metals and their compounds in the environment. occurrence, analysis and biological relevance. Weinheim, 751-774, 1438 S.
- LIEBE, F., 1999:** Spurenelemente in Böden und Pflanzen Nordrhein-Westfalens - Gehalte verschiedener chemischer Fraktionen in Böden und deren Beziehung zur Bodenreaktion und den Gehalten in Pflanzen. Dissertation Universität Bonn, 375 S.
- LINGG, K., R. MEULI & R. SCHULIN, 1996:** Schwermetalleinträge in Landwirtschaftsböden. Agrarforschung 3 (3), 105-108.
- LK RHEINLAND (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER RHEINLAND, KREISSTELLE AACHEN), 1999:** Persönliche Mitteilung.
- LUA (LANDESUMWELTAMT) BRANDENBURG (HRSG.), 2002:** Staubbiederschlag und Niederschlagsdeposition im Land Brandenburg. Studien- und Tagungsberichte des Landesumweltamtes Brandenburg, 36, 135.
- LUA NRW (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN), 2003:** Messergebnisse Staubbiederschlag. <http://www.lua.nrw.de>, (abgerufen am 15.06.2003).
- LÜBBEN, S. & D. SAUERBECK, 1991:** Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden-Pflanze. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen, Berichte aus der ökologischen Forschung 6, 180-223.

- LÜPPING, W., 2002:** Spurenelementversorgung in der Wiederkäuerfütterung aus Sicht der Beratung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 85-88.
- LUF A BONN, 1999-2002:** Prüfberichte der Futtermittel der Betriebe 1-4. Schriftliche Mitteilungen.
- LUF A BONN, 2000:** Gärfutter-Qualität, Ziel- und Orientierungswerte zu Futterwert und Gärqualität. Landwirtschaftskammer Rheinland (Hrsg.), Faltblatt.
- LUF A BONN, 2003:** Rieß, P. Persönliche Mitteilung.
- LUF A OLDENBURG, 1992:** Anfall an Wirtschaftsdüngern bei verschiedenen Tierarten (bei ganzjähriger Stallbelegung). In: Hydro Agri Dülmen GmbH, Dülmen (Hrsg: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. erweiterte Aufl. 1993, 281.
- LUF A OLDENBURG, (1997-2000):** Ergebnisse der Routineuntersuchungen an Futtermitteln der Rinderhaltung (Spurenelemente). Schriftliche Mitteilung. Zit. in: ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UIHLEIN, 2002: Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 50-58.
- LUF A OLDENBURG, (1998-2001):** Ergebnisse der Routineuntersuchungen an Futtermitteln der Schweine- und Geflügelhaltung (Spurenelemente). Schriftliche Mitteilung, zit. in: ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UIHLEIN, 2002: Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 50-58.
- LUF A OLDENBURG, 2001:** Ergebnisse des UBA-Vorhabens "Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben". Zit. in ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UIHLEIN, 2002: Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 50-58.
- LUTZ, F., 1999:** Institut für Pharmakologie und Toxikologie, Universität Gießen. Schriftliche Mitteilung.
- MACHELETT, B., R. METZ & M. GRÜN, 1992:** Schwermetallaufnahme von Pflanzen auf klärschlammbehandeltem Boden. In: Friedrich-Schiller-Universität (Hrsg.): Mengen

und Spurenelemente - 12. Arbeitstagung der Friedrich-Schiller-Universität Jena , 1. Aufl., 209-216.

- MÄKELÄ-KURTTU, R. & J. SIPPOLA, 2001:** Country statement "Finland". In: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems (Aromis). Research project of the European commission research directorates general: Report of the first meeting 21.-22. June 2001, CEMAGREF, Regional centre of Rennes, France. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 61-76.
- MANTOVI, P., 2001:** Country statement "Italy". In: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems (Aromis). Research project of the European commission research directorates general: Report of the first meeting 21.-22. June 2001, CEMAGREF, Regional centre of Rennes, France. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 137-150.
- MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., E. BÖHM & T. HILLENBRAND, 2001:** Einflußfaktoren auf die Qualität von kommunalem Abwasser und Klärschlamm - Beurteilung prioritärer Schadstoffe aus Haushalten, Gewerbe und Industrie. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404, 203-208.
- MCBRIDE, M. B. & G. SPIERS, 2001:** Trace element content of selected fertilizers and dairy manure as determined by ICP-MS. *Comm. Soil sci. plant anal.* 32, 139-156.
- MENKE, B., 1987:** Geobotanische und geochemische Untersuchungen an einem Torfprofil zur Frage natürlicher und anthropogener Elementverfrachtungen. *Geologisches Jahrbuch, Reihe A*, H. 95, Hannover.
- MENZI, H. & CH. HALDEMANN, 1993:** Schwermetalle in den Hofdüngern - ein Thema mit Wissenslücken. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung* 32 (1/2), 159-167.
- MENZI, H., U. ZIHLMANN, W. STAUFER & P. WEISSKOPF, 1998:** Ökologische Beurteilung der Freilandhaltung von Schweinen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 49, 605-608.
- METZ, R. & A. KLOKE, 1998:** Einfluß der Sortenwahl auf den Cadmiumtransfer Boden-Pflanze. Einfluß von Erzeugung und Verarbeitung auf die Qualität landwirtschaftlicher Produkte. *VDLUFA-Schriftenreihe* 49, 139-142.
- METZ, R., H. BÖKEN, J. WITTEN & C. HOFFMANN, 2001:** Schwermetalle im Pfad Boden-Pflanze-Tier-Mensch. *VDLUFA-Schriftenreihe* 57, Teil 2, 776-781.
- MEYER, A., 2002:** Spurenelementversorgung in der Mastschweinefütterung aus Sicht der Beratung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. *KTBL-Schrift* 410, 112-115.

- MITTENDORF, J., 2000:** Spurenelemente und Schwermetalle in Futtermittelrohstoffen, Tagungsband Landwirtschaft und Umwelt. 77-78.
- MÖNICKE, R. & C. BRAUN, 1997:** Mehrjährige Untersuchungen zum Schwermetalltransfer Boden/Pflanze und Konsequenzen für die landwirtschaftliche Nutzung der Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 525-528.
- MOOLENAAR, S. W., S.E.A.T.M. VAN DER ZEE & T. M. LEXMOND, 1997:** Indicators of the sustainability of heavy-metal management in agro-ecosystems. The science of the total environment, 201, 155-169.
- MOOLENAAR, S. W. & T. M. LEXMOND, 1998:** Heavy-metal balances of agro-ecosystems in the Netherlands. Netherlands journal of agricultural science, 46, 171-192.
- MÜLLER, C., 1997:** Schwermetallbilanzen ausgewählter landwirtschaftlicher Betriebe. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 529-532.
- MÜLLER, C. & T. EBERT, 2002:** Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger von 1986 bis heute - Ergebnisse aus dem bayerischen Boden-Dauerbeobachtungsprogramm. VDLUFA-Schriftenreihe (Kongressband) im Druck.
- MÜLLER, M., M. ANKE, E. HARTMANN & W. ARNHOLD, 1993:** Zur Blei- und Cadmiumkontamination der Milch und verschiedener Milchprodukte. VDLUFA-Schriftenreihe 37, 417-420.
- MÜLLER, M., M. ANKE, W. ARNHOLD & E. HARTMANN, 1992:** Untersuchungen zur Cadmium- und Bleikonzentration des Trinkwassers. In: Friedrich-Schiller-Universität Jena (Hrsg): Mengen- und Spurenelemente, 12. Arbeitstagung, Jena, 342-349.
- MUNK, H., 1990:** Chrom(3)- und Chrom(6)-Bestimmung in Düngemitteln und Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 32, 381-386.
- MU SAARL., MINISTERIUM FÜR UMWELT DES SAARLANDES (HRSG.), 1999:** Luftgütebericht 1998 - Immissionsmessnetz Saar.
- NIEDERS. LA F. ÖKOL. (NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE) (HRSG.), 1999:** Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen - Jahresbericht 1998
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL), 1996:** Nutrient Requirements of Beef Cattle. National Academy Press, Washington D. C.
- NRC, (NATIONAL RESEARCH COUNCIL), 1998:** Nutrient Requirements of Swine. National Academy Press, Washington D. C.
- NRC, (NATIONAL RESEARCH COUNCIL), 2001:** Nutrient Requirements of Dairy cattle. 7th Rev. Ed., National Academy Press, Washington D. C.

- OBRIST, J., B. VON STEIGER, R. SCHULIN, F. SCHÄRER & P. BACCINI, 1993:** Regionale Früherkennung der Schwermetall- und Phosphorbelastung von Landwirtschaftsböden mit der Stoffbuchhaltung <<Proterra>>. *Landwirtschaft Schweiz* 6(9), 513-518.
- OCKER, H. D., J. BRÜGGEMANN, G. KOBALL & U. TIETZ, 1995:** Rückstände von Pflanzenschutzmitteln und Schwermetallgehalte in den gesamtdeutschen Brotgetreideernten (BEE) der Jahre 1991-1993. 2. Teil: Schwermetallgehalte (Cadmium, Blei, Nickel). *Getreide, Mehl und Brot* 49:6, 330-334.
- OHLEN, J. & U. WIEGEL, 1992:** Kompostierung von Bioabfall in Berlin. *Müll und Abfall* 8/92, 552-562.
- OVER, B., 2003:** Ansätze für eine umweltverträgliche Verwertung von Sekundärrohstoffdüngern - am Beispiel von Klärschlamm - in der Landwirtschaft mittels Einbeziehung eines geographischen Informationssystems. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 407, 2003.
- PADEKEN, K. & H. M. HELAL, 1995:** Cd-Aufnahme von Raps und Weizen bei variiertem Nährstoffangebot. *VDLUFA-Schriftenreihe* 40, 881-884.
- PALLAUF, J., 1993:** Tierernährung. In: *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*. Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 12. Aufl., 201-233.
- PALLAUF, J. & G. RIMBACH, 1997:** Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Arch. anim. nutr.* 50, 301-319.
- PECHER A., L. ANDERS & M. BERTZ, 1995:** Schwermetallgehalte landwirtschaftlich genutzter Boden im Land Brandenburg. *VDLUFA-Schriftenreihe* 40, 663-666.
- PECHER, H.-P. & V. MELOSCH, 2002:** Einfluß reduzierter Cu- und Zn-Versorgung auf die Aufzuchtleistung von Ferkeln. In: *Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern*. *KTBL-Schrift* 410, 98-101.
- PEREZ, XLO, 1998:** Effects of nesting yellow-legged gulls (*Larus cachinnans* Pallas) on the heavy metal content of soils in the Cies islands (Galicia, north-west Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 36(4), 267-272.
- PETERS, M., 1990:** Nutzungseinfluß auf die Stoffdynamik schleswig-holsteinischer Böden-Wasser-, Luft-, Nähr-, und Schadstoffdynamik. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 268.
- PETERSEN, J. (HRSG.), 2003:** Jahrbuch für die Geflügelwirtschaft 2003. (Jahrbuch des Zentralverbandes der Deutschen Geflügelwirtschaft e. V. und seiner Mitgliedsverbände), Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 301 S.

- PETERSEN, U., 2002:** Futtermittelrechtliche Vorschriften über Spurenelemente und unerwünschte Stoffe. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 36-41.
- PLUQUET, E., 1983:** Die Bedeutung des Tongehaltes und des pH-Wertes für die Schwermetallaufnahme einiger Kulturpflanzen. UBA-Texte, 40.
- PODLESAK, W., B. MACHELETT, M. GRÜN & J. GARZ, 1990:** Über den Cadmiumeintrag aus mineralischen Phosphatdüngern in die Böden Ostdeutschlands. VDLUFA-Schriftenreihe 32, 861-867.
- POETSCH, E., 2001:** Country statement "Austria". In: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems (Aromis). Research project of the European commission research directorates general: Report of the first meeting 21.-22. June 2001, CEMAGREF, Regional centre of Rennes, France. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 29-38.
- POLETSCHNY, H., 1992:** Kompostverwertung im Landbau aus der Sicht des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten VDLUFA. VDLUFA-Schriftenreihe 35, 203-217.
- PUNTKE, S. & M. SCHNEIDER, 2001:** Das Verhalten von Schwermetallen in Zement und Beton. ZKG International 54 (2), 106-113.
- REDDY, M. R. & H. F. PERKINS, 1974:** Fixation of zinc by clay minerals. Soil Sci. Soc. Am. J., 38, 229-331.
- REINER, I., C. LAMPERT, M. PITTEKOVÁ & P. H. BRUNNER, 1996:** Stoffbilanzen landwirtschaftlicher Betriebe von ausgewählten Betriebstypen bei Verwendung von Klärschlamm und Kompost. - BKKB 2-Endbericht im Auftrag des Amtes der oberösterreichischen Landesregierung. TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, 120 S.
- RICHTER, G., 2002:** Spurenelementversorgung in der Geflügelfütterung aus Sicht der Beratung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 116-124.
- RIEB, P. & W. SCHOLL, 1989:** Schwermetallbelastungen von Böden aus dem Rheinland und aus Baden-Württemberg und deren Bedeutung. VDLUFA-Schriftenreihe 30, 549-556.
- RIETZ, E. & M. KÜCKE, 1992:** Schwermetallgehalte in Wurzeln und Sproß unterschiedlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit vom pH-Wert und vom Schwermetallgehalt des Bodens. VDLUFA-Schriftenreihe 35, 693-696.

- ROTH, U., 2001:** Country statement "Germany". In: Assessment and reduction of heavy metal input into agro-ecosystems (Aromis). Research project of the European commission research directorates general: Report of the first meeting 21.-22. June 2001, CEMAGREF, Regional centre of Rennes, France. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 89-114.
- ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UHLEIN, 2002:** Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 50-58.
- ROTH-MAIER, D. A., M. KIRCHGESSNER & F. REITHMAYER, 1985:** Gehalte und Verteilung verschiedener Spurenelemente im Hühnerei. Arch. f. Geflügelkde. 49(5), 188-190.
- RÜTZEL H., A. POHLMEIER, H.-D. NARRES, 1997:** Wechselwirkung von Huminsäuren/Tonmineralen mit organischen Umweltchemikalien und Schwermetallen. 2: Schwermetallionen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 83, 45-47.
- RUPPERT, W., M. STICHLMAIR, J. BAUCHHENB, H. M. BLENDL, A. HAISCH, K. HAMMER, U. HEGE, R. JULI, L. MELIAN, W. NÜRNBERGER, J. RIEDER, P. RINTELEN, K. RUTZMOSER, W. WEBER, A. WÜRZINGER & H. ZEISIG, 1985:** Daten und Informationen zum Gülleeinsatz in der Landwirtschaft. Bayer. Landw. Jahrb. 8, 899-966.
- RWZ (RHEINISCHE WAREN ZENTRALE), 2003:** H.-G. Giesen, Alpen, Persönliche Mitteilung.
- SAGER, M., G. REICHEL, M. GRÜNER & H. WÜRZNER, 1997:** Quecksilbergehalte von Futtermittelproben in Österreich. Bodenkultur 48:1, 23-32.
- SAGER, M., M. GRÜNER & H. WÜRZNER, 1998:** Gehalte ausgewählter Spurenelemente in Leber und Nieren von Nutztieren. Bodenkultur 49:2, 109-117.
- SAUERBECK, D., 1986:** Schadstoffeinträge in den Boden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landbewirtschaftung (anorganische Stoffe). VDLUFA-Schriftenreihe 16, 59-72.
- SAUERBECK, D., 1995:** Risikobewertung auf Basis der möglichen Zufuhren an Schadstoffen und ihres Verhaltens im Boden. Niedersachsen, Landesamt für Ökologie (Hrsg.): Nachhaltiges Niedersachsen: Dauerhaft umweltgerechte Entwicklung 2, 51-56.
- SAUERBECK, D. & H. HARMS, 1993:** Beurteilung der Aufnahme von Schwermetallen und organischen Schadstoffen durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen. Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Perspektiven der biologischen Abfallbehandlung), 62-85.

- SAUERBECK, D. & S. LÜBBEN, 1991:** Zusammenfassung des BMFT-Verbundvorhabens "Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen". Forschungszentrum Jülich (Hrsg): Berichte aus der ökologischen Forschung 6, 1-32.
- SAUERBECK, D. ZIT. IN RIEB, P. (1992):** Schriftliche Mitteilung der Lufa Bonn (RIEB, P.) an WILCKE & DÖHLER (1995).
- SCHAAF, H., 2002:** Behindert die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm die Erzeugung hochwertiger Nahrungsmittel? In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404, 144-150.
- SCHAAF, H. & E. JANBEN, 2000:** Schwermetallgehalte von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern sowie Schwermetallfrachten bei Anwendung nach den anerkannten Regeln der guten fachlichen Praxis. VDLUFA-Schriftenreihe 55/VI, 144-151.
- SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, G. BRÜMMER, K.-H. HARTGE & U. SCHWERTMANN, 1998:** Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart, 494 S.
- SCHENKEL, H., 2000:** Einsatz organischer Spurenelementverbindungen zur Versorgung landwirtschaftlicher Nutztiere. Deutsche Vilomix: Themen zur Tierernährung, 29-45.
- SCHENKEL, H., 2002A:** Spurenelemente in Futtermitteln und Futterzusatzstoffen. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 9-13.
- SCHENKEL, H., 2002B:** Stoffwechseleffekte und Umweltwirkungen einer gezielten Spurenelementsupplementierung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 31-35.
- SCHENKEL, H., 2003:** Universität Hohenheim, schriftliche Mitteilung. 9-13.
- SCHENKEL, H. & B. ECKSTEIN, 2001:** Schwermetallgehalte in Nebenprodukten pflanzlicher und tierischer Herkunft. Tierernährung - Ressourcen und neue Aufgaben, Tagungsband Landbauforschung Völkenrode, SH223, 54-59.
- SCHENKEL, H. & J. BREUER, 2002:** Untersuchungen zu nicht fütterungsbedingten Spurenelementeinträgen in die Tierhaltung. Schriftl. Mitteilung.
- SCHERER, H. W., U. KNAUFF & W. WERNER, 1997:** Einfluß der Bioabfallkompostzufuhr zu unterschiedlich mit Schwermetallen belasteten Böden auf den Biotransfer von Schwermetallen bei verschiedenen Kulturpflanzen. *Agribiological Research* 50:3, 205-213.

- SCHERER, V. & D. SCHRÖDER, 1990:** Anthropogene und geogene Schwermetall-belastung von Böden in der Umgebung eines Hüttenwerkes an der Saar. VDLUFA-Schriftenreihe 32, 163-168.
- SCHEUNERT, A. & A. TRAUTMANN, 1987:** Lehrbuch der Veterinärphysiologie. Verlag Paul Parey, Berlin-Hamburg.
- SCHILLING, G., H. ANSORGE, W. BORCHMANN, G. MARKGRAF & H. PESCHKE, 1989:** Pflanzenernährung und Düngung: Teil II: Düngung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 156 S.
- SCHIMMING, C.-G., 1992:** Wasser-, Luft-, Nähr- und Schadstoffdynamik charakteristischer Böden Schleswig-Holsteins - Nährstoff-, Säure- und Schwermetalldynamik. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, 13.
- SCHMITZ, M., 2003:** Bolander Hof, Stommeln. Persönliche Mitteilung.
- SCHÜRMAN, A., 2003:** Bösel (Niedersachsen). Persönliche Mitteilung.
- SCHULTE, A., A. ALAZS, J. BLOCK & J. GEHRMANN, 1996:** Entwicklung der Niederschlags-Deposition von Schwermetallen in West-Deutschland. 1. Blei und Cadmium. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 159:4, 377-383.
- SCHULTE, A. & J. GEHRMANN, 1996:** Entwicklung der Niederschlags-Deposition von Schwermetallen in Westdeutschland. 2. Arsen, Chrom, Kobalt und Nickel. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 159:4, 385-389.
- SCHULTHEIß, U, H. DÖHLER, H. ECKEL, K. FRÜCHTENICHT, H. GOLDBACH: V. KÜHNEN, U. ROTH, G. STEFFENS: A. UIHLEIN & W. WILCKE, 2003:** Abschlußbericht zum UBA-Forschungsprojekt "Erfassung von Schwermetallströme in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger in Agrarökosystemen". Veröffentlichung voraussichtlich Ende 2003. UBA Umweltbundesamt.
- SCHWARZ, W. A. & M. KIRCHGESSNER, 1975A:** Zum Zinkstatus im Knochen von Milchkühen (Tuber coxae) bei Zink-Depletion und -Repletion. 15. Mitteilung: Zum Stoffwechsel des Zinks im tierischen Organismus. Z. Tierphysiol., Tierernährg. u. Futtermittelkde. 35, 9-17.
- SCHWARZ, W. A. & M. KIRCHGESSNER, 1975B:** Veränderung des Zinkgehaltes in der Kuhmilch bei unterschiedlicher Zinkversorgung. 14. Mitteilung: Zum Stoffwechsel des Zinks im tierischen Organismus. Z. Tierphysiol., Tierernährg. u. Futtermittelkde. 35, 1-8.

- SEVERIN, K., 1999:** Abschätzung der bewirtschaftungsbedingten Cadmiumeinträge in Böden.. Niedersächsisches Umweltministerium: Cadmiumanreicherung in Böden - Einheitliche Bewertung von Düngemitteln. Fachgespräch 5. Mai 1999 in Hannover, Tagungsband, 23-40.
- SEVERIN, K., H.-C. SCHARPF & P. RIEB, 2002:** Vorschläge zur Harmonisierung von Schwermetallgrenzwerten von Düngemitteln. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404, 85-93.
- SEVERIN, K., W. KÖSTER & Y. MATTER, 1991:** Zufuhr von anorganischen Schadstoffen in Agrarökosysteme mit mineralischen Düngemitteln, Wirtschaftsdüngern, Klärschlamm und Komposten. VDLUFA-Schriftenreihe 32 (Kongreßband 1990), 387-391.
- SOMMER, B., 1987:** Beurteilung einer Belastung von Nahrungs- und Futtermittelpflanzen mit Cadmium, Blei, Thallium und Fluor. Umweltbundesamt, Berlin 8/87, 238.
- SOUCI, S. W., W. FACHMANN & H. KRAUT, 2000:** Die Zusammensetzung der Lebensmittel, Nährwerttabellen. medpharm, Stuttgart.
- SPÄTE, A., T. DELSCHEN & B. KRÄLLING, 1992:** Untersuchungen zum Cadmium-Transfer in Leinsamen aus Böden im Bereich der Grundbelastung. VDLUFA Schriftenreihe 35, 661-664.
- SPÄTE, A., W. WERNER & W. KÖNIG, 1991:** Die Erstellung eines Schwermetallkatasters für die Böden von Nordrhein-Westfalen zur Festlegung von Hintergrundwerten im Rahmen der Altlastenproblematik. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 66, 409-412.
- SPIEKERS, H., 2002:** Landwirtschaftskammer Rheinland. Persönliche Mitteilung.
- SPIEKERS, H., G. JANKNECHT, W. LÜPPING & V. POTTHAST, 1991:** Erhebungen über Spurenelementgehalte in Grund- und Kraftfutter für Milchrinder. Das wirtschaftseigene Futter 37, Heft 1+2, 55-67.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, 2003:** Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung. <http://www.destatis.de/basis/d/umw/ugrtab7.htm>. (Abgerufen am 12.12.2003).
- STENZ, B., R. SCHULIN & M. SCHENK, 1997:** Schwermetallaufnahme durch Kulturpflanzen auf belasteten Böden.. Wasser und Boden - Zeitschrift für die gesamte Wasserwirtschaft 49:2, 7-8, 11-14.
- STICHER, H. & J. BOEHRINGER, 1983:** Ionenaustausch an Torf in den Systemen H-Ca-Pb und H-Ca-Zn. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft 38, 289-294.

- STICHER, H., S. JUCHLER & U. GASSER, 1987:** Speziation von Chrom und Nickel in Sepentinböden. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft 55/I, 433-438.
- TA LUFT, 2002: SIEHE TECHNISCHE ANLEITUNG LUFT, 2002.**
- TECHNISCHE ANLEITUNG LUFT, 2002:** Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, TA Luft02 - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002. (GMBL. Nr. 25-29 vom 30.7. 2002 S. 511)
- THIEMANN, K. G., U. OLM, A. WILHELM & C. MIRLE, 1998:** Bleiintoxikation (Saturnismus) bei Kühen und Untersuchungen zur Kontamination der Milch. Tierärztliche Umschau 53:12, 742-747.
- TIERHYGIENEVERORDNUNG, 2002:** Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlamentes und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte. (Zuletzt geändert durch Verordnung (EG) Nr. 808/2003 der Kommission vom 12. Mai 2003, Amtsblatt der Europäischen Union, L 117/1 vom 13.05.2003).
- TIMMERMANN, F., 1994:** Schwermetalle. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit (Hrsg.): Recycling kommunaler und industrieller Abfälle in der Landwirtschaft, Bd. 6, 208. Sonderheft, Münster-Hiltrup, 92-103.
- TOWERS, W. & E. PATTERSON, 1997:** Sewage sludge application to land - a preliminary assesment of the sensitivity of Scottish soils to heavy metal inputs. Soil use and management 13, 149-155.
- TRIMBORN, M., 2003:** Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn. Persönliche Mitteilung.
- TRIMBORN, M., H. SCHERER, J. CLEMENS & H. GOLDBACH, 2000:** Der Einfluß von organischen Sekundärrohstoffdüngern auf Schwermetallgehalte in Böden sowie auf die Pflanzenverfügbarkeit. VDLUFA-Schriftenreihe 55 , Teil 6, 160-163.
- TRINKWV (TRINKWASSERVERORDNUNG), 2001:** Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV, 2001) - Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001 (BGBl. I Nr. 24 vom 28.5. 2001 S. 959; 25.11.2003 S. 2304).
- TROTT, 2003:** Industrieverband Agrar, Frankfurt. Persönliche Mitteilung.
- UBA (UMWELTBUNDESAMT), 1992:** Daten zur Umwelt 1990/91. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 675 S.
- UIHLEIN, A., 2001:** Stallbilanzen von Schwermetallen am Beispiel ausgewählter Milchviehbetriebe. Diplomarbeit, Universität Bayreuth, 64 S.

- ULKEN, R., 1987:** Nähr und Schadstoffgehalte in Klär- und Flußschlamm, Müll und Müllkomposten - Datensammlung und Bewertung. VDLUFA-Schriftenreihe 22, 1-95.
- VAN SAAN, B., M. KURTENACKER & D. SCHRÖDER, 1992A:** Nutzungsbedingte Unterschiede anthropogener Schwermetallgehalte in Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 35, 665-668.
- VAN SAAN, B., W. WERNER, M. KURTENACKER & D. SCHRÖDER, 1992B:** Anthropogene Schwermetall-Einträge in Böden bei verschiedenen Landnutzungssystemen, errechnet aus Daten des Bodenbelastungskatasters Rheinland-Pfalz. Friedrich-Schiller-Universität Jena (Hrsg.): Mengen- und Spurenelemente, 12. Arbeitstagung, Jena, 342-349.
- VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003:** Verordnung zur Änderung der Bedingungen für die Zulassung einer Reihe von zur Gruppe der Spurenelemente zählenden Futtermittelzusatzstoffen. Amtsblatt der Europäischen Union L187, 11.
- VDI (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE) RL 2119, 1996:** VDI-Richtlinie 2119: Messung partikelförmiger Niederschläge, Bestimmung des Staubniederschlags mit Auffanggefäßen aus Glas (Bergerhoff-Verfahren) oder Kunststoff. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, 4, 2-12.
- VDI (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE) RL 3474, 2000:** Richtlinie 3474 Emissionsminderung, Tierhaltung Geruchsstoffe. Entwurfsstand 09/2000.
- VDLUFA VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN, 2002:** Stellungnahme des VDLUFA zur Konzeption von BMVEL und BMU vom Juni 2002 "Gute Qualität und sichere Erträge. Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?" Dezember 2002, 24 S.
- VEMMER, H. & U. PETERSEN, 1977:** Blei- und Cadmiumgehalte in verschiedenen Geweben von Mastschweinen bei normaler Fütterung. Landw. Forschung, Sonderheft 34/I, 62-71.
- VEMMER, H. & U. PETERSEN, 1979:** Untersuchungen über den Einfluß steigender Cadmiumzulagen auf die Entwicklung von Mastschweinen und auf die Rückstandsbildung in verschiedenen Geweben. 1. Mitteilung: Cadmiumrückstände in verschiedenen Geweben. Landw. Forschung 32:3, 303-315.
- VEMMER, H. & U. PETERSEN, 1980:** Untersuchungen über den Einfluß von Bleizulagen auf die Entwicklung von Mastschweinen und auf die Rückstandsbildung in verschiedenen Geweben. 1. Mitteilung: Bleirückstände in verschiedenen Geweben. Landw. Forschung 33:4, 424-435.
- VENTER, F., 1993:** Schwermetallgehalte in verschiedenen Gemüsepflanzen. VDLUFA-Schriftenreihe 37, 449-452.

- VERORDNUNG (EG) NR. 1334/2003:** Verordnung der Kommission vom 25. Juli 2003 zur Änderung der Bedingungen für die Zulassung einer Reihe von zur Gruppe der Spurenelemente zählenden Futtermittelzusatzstoffen. Amtsblatt der Europäischen Union, L 187/11 vom 26.07.2003.
- VFT (VEREIN FUTTERMITTELTEST E. V.), 1996:** Spurenelemente im Milchleistungs- und im Rindermastfutter. Zit. in: ROTH, U., U. SCHULTHEIß, H. DÖHLER, H. ECKEL, V. KÜHNEN, K. FRÜCHTENICHT & A. UHLEIN, 2002: Spurenelement- bzw. Schwermetallgehalte in Futtermitteln und Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, 50-58.
- VINNERÅS, B., H. PALMQUIST, P. BALMÉR, J. WEGLIN, A. JENSEN, Å. ANDERSSON & H. JÖNSSON, (2002):** The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste – a proposal for new Swedish norms. In: B. VINNERÅS (2002): Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, .
- WAGNER, K. & H. HÜFFMEIER (SCHRIFTLITER), 1999:** Die Landwirtschaft - Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen in 6 Bänden. Band 2: Tierische Erzeugung. BLV Verlagsgesellschaft München, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 702.
- WEIGERT, P., 1989:** Umweltkontaminanten. In: Großklaus, D. (Hrsg.): Rückstände in von Tieren stammenden Lebensmitteln. 119-144.
- WEINREICH, O., 2002:** Deutscher Verband Tiernahrung: Datenbank zu Futtermitteln. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 42-48.
- WELP, G., 1999:** Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biology and Fertility of Soils*. 30:1-2, 132-139.
- WELP, G., 2003:** Institut für Bodenkunde der Universität Bonn. Persönliche Mitteilung.
- WENK, P., D. ANDREY, H. BEUGGERT, H. GUGGISBERG, K. RIEDER & R. SCHMID, 1995:** Monitoring-Programm "Schwermetalle in Lebensmitteln". VIII. Blei, Cadmium, Kupfer und Zink in Milch. Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene 86:5, 485-496.
- WESTHOEK, H.J. & J. J. M. DRIESSEN, 1997:** Heavy Metal Balances in the Netherlands. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 551-554.

- WIEGMANN, S., 1999:** Natürliche Schwermetallgehalte als planungs- und umweltrelevante Bewertungsgrundlage der Belastung norddeutscher Ackerböden. Cuvilier Verlag, Berlin 146 S.
- WILCKE W. & H. DÖHLER, 1995:** Schwermetalle in der Landwirtschaft. Quellen, Flüsse, Verbleib. KTBL-Arbeitspapier 217, Darmstadt, 99.
- WILKE, B.-M. & R. METZ, 1992:** Aufnahme und Verteilung von Schwermetallen in verschiedenen Energiepflanzen. VDLUFA-Schriftenreihe 35, 689-692.
- WINDISCH, W., 2002:** Organische contra anorganische Zink- und Kupferverbindungen in der Schweinefütterung. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 89-97.
- WINDISCH, W. & F. X. ROTH, 2002:** Leistungsfördernde Wirksamkeit überhöhter Kupfermengen im Ferkelfutter: Einfluß der Menge und chemischen Verbindung des Kupfers sowie der Gegenwart anderer leistungsfördernder Futterzusätze. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 410, 144-148.
- WINDISCH W. & M. KIRCHGESSNER, 1996:** Zum Effekt von Phytase auf die scheinbare Verdaulichkeit und Gesamtverwertung von Eisen, Kupfer, Zink und Mangan bei abgestufter Ca-Versorgung in der Ferkelaufzucht und in der Broilermast.. Agribiological Research 49, 123-29.
- WITTE, H., R. MÖNICKE, P. RIEß & T. LANGENOHL, 1997:** Schadstoffbilanzierung auf Ackerböden. Abwassertechnik 6, 19-23.
- WULF, S. & J. CLEMENS, 2003:** Untersuchung der Emission direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase (NH₃, N₂O und CH₄) während der Lagerung und nach der Ausbringung von Kofermentationsrückständen sowie Entwicklung von Verminderungsstrategien. Bonner Agrikulturchemische Reihe 16.
- ZAUNER, G., L. MONN, K. STAHR & H. G. BROD, 1999:** Schwermetalle in Böden - Prognose der Mobilität von Cadmium und Zink.. VDLUFA-Schriftenreihe 52, 521-524.