



Modell zur Berechnung der Schwermetall- flüsse in der Landwirtschaftlichen Ökobilanz

SALCA-Schwermetall

Ruth Freiermuth

Agroscope FAL Zürich-Reckenholz,

April 2006



FAL RECKENHOLZ

Forschung für Landwirtschaft und Natur

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort	1
2. Zusammenfassung	2
3. Einleitung	3
3.1 Problemstellung	3
3.2 Ziel	4
4. Herkunft der Schwermetalle im Boden	5
4.1 Natürliche Schwermetallbelastung	5
4.2 Anthropogene Schwermetallbelastung	5
4.2.1 Diffuser Eintrag	5
4.2.2 Landwirtschaftlich bedingter Eintrag	6
5. Modellansatz	8
5.1 Grundsätze	8
5.2 Prioritäten bei der Wahl der Schwermetalle	8
5.3 Systemgrenzen	9
5.3.1 Räumliche Systemgrenze auf der Ebene „Betrieb“	9
5.3.2 Räumliche Systemgrenze auf der Ebene „Kultur“	11
5.4 Annahmen und Grenzen	12
5.5 Aufbau des Modells	13
6. Berechnung der Schwermetallflüsse	15
6.1 Dünger	15
6.2 Pflanzenschutzmittel	16
6.3 Futtermittel	17
6.4 Hilfsstoffe in der Tierproduktion	17
6.5 Pflanzliche Produkte und Ernterückstände	18
6.6 Tierische Produkte	19
6.7 Auswaschung ins Grundwasser oder in die Oberflächengewässer	19
6.8 Erosion	20
6.9 Allokation	21
7. Wirkungsabschätzung	22
8. Literaturverzeichnis	23
9. Anhang	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung von direkten Schwermetallflüssen (Pfeile) zwischen dem landwirtschaftlich genutzten Boden und den Prozessen der landwirtschaftlichen Produktion für die Herstellung von tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Kasten), sowie zwischen dem Handel und der Umwelt (Kühnholz 2001).	3
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der mit Hilfsstoffen (Beschriftung der Pfeile) verbundenen direkten Schwermetallflüsse (Pfeile) zwischen den Prozessen (Kästen) der landwirtschaftlichen Produktion auf der Ebene „Betrieb“ (Kühnholz 2001).	10
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der mit Hilfsstoffen (Beschriftung der Pfeile) verbundenen direkten Schwermetallflüsse (Pfeile) zwischen den Prozessen (Kästen) der landwirtschaftlichen Produktion auf der Ebene „Kultur“ (nach Kühnholz 2001).	11
Abbildung 4:	Modellaufbau für die Berechnung von Schwermetallflüssen landwirtschaftlicher Produktionssysteme: Erklärungen siehe Kapitel 5.5.	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 :	Bereiche von durchschnittlichen geogenen Grundgehalten und Maximalwerte von Schwermetallen in bodenbildenden Gesteinen der Schweiz. Alle Werte gerundet in ppm.	5
Tabelle 2:	Mittlere jährliche Deposition von Schwermetallen in der Schweiz. Die Werte für Cd, Cu, Pb und Zn stammen aus Keller <i>et al.</i> (2005), jene für Ni, Cr und Hg aus (Thöni und Seitler, 2004).	6
Tabelle 3:	Schwermetallaustrag durch Sickerwasser (Wolfensberger und Dinkel, 1997)	20
Tabelle 4:	Vorkommen von Schwermetallen in verschiedenen Verordnungen. 1=Kompost, 2=Klärschlamm, 3=Mineraldünger, 4=Richtwert, 5=Prüfwert, 6=Sanierungswert, Werte in Klammern sind lösliche Gehalte, Werte aus NABO sind häufige Gehalte (80%) in mg/kg bzw. Richtwertüberschreitungen in [%].	28
Tabelle 5	Totale (HNO ₃ -Extrakt) Schwermetallgehalte in verschieden genutzten Böden (Keller und Desaulles 2001).	29
Tabelle 6:	Erträge an Haupt- und Nebenprodukten bei der Pflanzenproduktion nach Walther <i>et al.</i> (2001).	30
Tabelle 7:	Durchschnittliche Schwermetallgehalte in Futtermitteln und pflanzlichen Produkten in [mg/kg] Trockensubstanz.	31
Tabelle 8:	Schwermetallgehalte in Hilfsstoffen der Tierproduktion (Schultheiss <i>et al.</i> 2004)	33
Tabelle 9:	Inhaltsstoffe in Pflanzenschutzmitteln berechnet nach Perkow und Ploss (1994) ¹⁾ . Weitere Angaben nach FAW (2000)	34
Tabelle 10:	Durchschnittliche Schwermetallgehalte von Mineraldüngern (Desaulles and Studer 1993)	34

Tabelle 11:	Medianwerte des Cu-, Zn-, Cd- und Pb Gehaltes in verschiedenen Wirtschaftsdüngertypen aus Menzi und Kessler (1998) (Cd, Cu, Zn, Pb) und Desaulles und Studer (1993) (Cr, Ni, Hg).	35
Tabelle 12:	Schwermetallgehalte [g/t TS] von Kompost (Candinas <i>et al.</i> 1999b) und Klärschlamm (Candinas <i>et al.</i> 1999a und Herter und Külling 2001) sowie durchschnittliche Nährstoffgehalte in [kg/t TS].....	35
Tabelle 13:	Mittlere Nährstoff- [kg/tTS] und Schwermetallgehalte [g/tTS] in diversen Abfällen nach Nottrodt (2001) und Herter und Külling (2001)	36
Tabelle 14:	Mittlere Nährstoff- [kg/tTS] und Schwermetallgehalte [g/tTS] in Holzaschen (Herter und Külling 2001)	37
Tabelle 15:	Durchschnittliche Gewichtsanteile verschiedener Erzeugnisse vom Schwein und Rind nach Nottrodt et al. (2001)	37
Tabelle 16:	Durchschnittliche Schwermetallgehalte in tierischen Erzeugnissen. Wo nicht anders vermerkt sind die Angaben in mg/kg Frischgewicht (¹ Souci <i>et al.</i> 2000; ² Schultheiss <i>et al.</i> 2004; ³ Heiz 2004)	38

1. Vorwort

Das Bilanzieren der Schwermetallein- und -austräge erlaubt, die Ursachen von Gehaltänderungen im Boden zu diagnostizieren. Werden solche Bilanzen genutzt, um Vermeidungsmassnahmen durchzusetzen, so müssen diese sehr exakt sein und Unsicherheiten sowie die räumliche und zeitliche Variation in den Bilanzdaten in der Berechnung mit einbeziehen (stochastische Bilanzierung) (Keller und Desaulles 2004). In der Ökobilanz spielen Schwermetalle wegen ihrer human- und ökotoxikologischen Wirkung eine wichtige Rolle. Daher ist es hier von besonderer Wichtigkeit, sämtliche Einträge in den Boden sowie die Verlagerung in die Gewässer und das Grundwasser durch Erosion und Auswaschung zu erfassen. Dazu wird ebenfalls eine Bilanz erstellt. Allerdings kommen keine stochastischen Betrachtungen zur Anwendung, da ein Vergleich von verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten angestrebt wird.

Der vorliegende Bericht beruht auf einer Grundlagenstudie, die durch Olof Kühnholz im Jahr 2001 an der FAL erarbeitet worden ist (Kühnholz 2001). Seine Arbeit befasst sich vertieft mit den verschiedenen Prozessen, denen Schwermetalle im Boden unterworfen sind. Sie ist zudem massgebend für die Auswahl der berücksichtigten Schwermetalle und für die Definition der Flüsse, welche für die untersuchten Systeme Betrieb und Kultur relevant sind.

Durch neue Erkenntnisse der Forschung und die Notwendigkeit, das Modell in der Praxis umzusetzen, hat sich die Neuverfassung des Texts aufgedrängt. Aus der Grundlagestudie ist somit ein anwendungsorientierter Bericht geworden, welcher die Integrierung der Schwermetalle ins Ökobilanztool SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) der FAL ermöglicht.

Neuerungen sind insbesondere der Einbezug der Schwermetallflüsse, welche durch den Zu- und Verkauf von Tieren entstehen. Ferner wurde durch Übertragung der Erkenntnisse aus dem Phosphormodell (Prasuhn 2006) der Einbezug von Erosion möglich. Schliesslich hat eine neue Studie aus Deutschland (Schultheiss *et al.* 2004) zu aktuellen Daten im Bereich der Futtermittel geführt.

Bei der Modellierung mussten zum Teil bedeutende Vereinfachungen vorgenommen werden, weil noch nicht alle Prozesse abschliessend erforscht sind. So wird der Gehalt in den Pflanzen nicht in Funktion des Bodengehalts modelliert. Ferner wird die Deposition aus der Atmosphäre auf die Pflanzen nicht berücksichtigt und die Auswaschung wird stark vereinfacht berechnet. Dieser Pragmatismus ist notwendig, um ein operatives Modell zu erhalten. In den genannten Bereichen sind in Zukunft Verbesserungen anzustreben.

Die dem Modell zugrunde gelegten Bodengehalte aus den Untersuchungen des NABO (Keller und Desaulles 2001) haben zur Zeit Gültigkeit. Sie müssen aber bei Bedarf aktualisiert werden.

Die vorliegende Methode beschränkt sich auf die Erstellung des Inventars der Schwermetallflüsse in den Boden, das Grundwasser und die Oberflächengewässer. Sie macht keine Aussage über die Wirkungsabschätzung. Zu jenem Schritt äussert sich die Erklärung von Apeldoorn (Heijungs *et al.* 2004). Spezialisten aus den Bereichen Ökobilanzierung, Wirkungsabschätzung und Risikoabschätzung halten darin fest, dass Metallspezifizierung, Persistenz, Bioverfügbarkeit und Essentialität von zukünftigen Wirkungsabschätzungsmodellen zu berücksichtigen sind. Insbesondere der Frage der Spezifizierung sollte bei einer Überarbeitung des vorliegenden Modells Beachtung geschenkt werden, damit die geforderten Angaben im Inventar bereitgestellt werden können.

An dieser Stelle sei Armin Keller, Olivier Huguenin und Gérard Gaillard (alle Agroscope FAL Zürich-Reckenholz) für ihr Engagement bei der Bereitstellung von Unterlagen, den interessanten Diskussionen und der kritischen Durchsicht des Entwurfs gedankt.

2. Zusammenfassung

Das vorliegende Modell dient der Berechnung der landwirtschaftlichen Schwermetallemissionen auf Stufe Sachbilanz im Rahmen von Ökobilanzen. Aufgrund ihrer Umweltrelevanz und ihrer Bedeutung für die Landwirtschaft wurden die Metalle Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei, Quecksilber, Nickel und Zink ausgewählt.

Bilanziert werden sämtliche Flüsse, welche die Systemgrenze passieren. Es sind dies je nach Betriebstyp und Bilanzierungsrahmen Schwermetallrückstände im Saatgut, in mineralischen und organischen Düngern, in Pflanzenschutzmitteln, im Erntegut, in Futtermitteln, in Hilfsstoffen und in tierischen Erzeugnissen. Für diese Flüsse werden durchschnittliche Schwermetallgehalte eingesetzt, welche aus verschiedenen Literaturquellen stammen. Ernterückstände, welche auf dem Feld verbleiben, werden nicht bilanziert, weil sie sich in einem geschlossenen Kreislauf befinden.

Es werden die Austräge aus dem Boden durch Erosion und Auswaschung ins Grund- und Oberflächengewässer betrachtet. Letztere spielt eine untergeordnete Rolle und wird mit Hilfe von Literaturwerten annäherungsweise berücksichtigt. Der Erosion liegen durchschnittliche Schwermetallgehalte im Ackerland, Dauergrünland und unter Intensivkulturen zugrunde. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass ohne landwirtschaftliche Nutzung diese beiden Austragspfade nicht auftreten würden. Daher hat der Landwirt auch die Verantwortung für die Emissionen aus dem Grundgehalt des Bodens zu übernehmen.

Weil Schwermetalle auch durch atmosphärische Deposition in den Boden gelangen, bedient sich das Modell einem Allokationsfaktor. Damit wird sichergestellt, dass der Landwirtschaft nur jene Schwermetallemissionen zugeschrieben werden, welche durch sie bedingt sind.

3. Einleitung

3.1 Problemstellung

In der Landwirtschaft werden für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln Hilfsstoffe z.B. zur Düngung oder zum Pflanzenschutz eingesetzt, welche neben den erwünschten Stoffen auch Schadstoffe wie zum Beispiel Schwermetalle enthalten. Dies sind Metalle mit einer Dichte grösser als 5 g/cm^3 (Brockhaus 1971). Schwermetalle können im Boden über lange Zeiträume akkumulieren (Moolenaar und Lexmond 1999). Im Extremfall kann dies dazu führen, dass eine landwirtschaftliche Nutzung nicht mehr möglich ist und der Boden saniert werden muss.

In Abbildung 1 sind die wichtigsten Transportwege von Schwermetallen in einem landwirtschaftlichen Produktionssystem dargestellt.

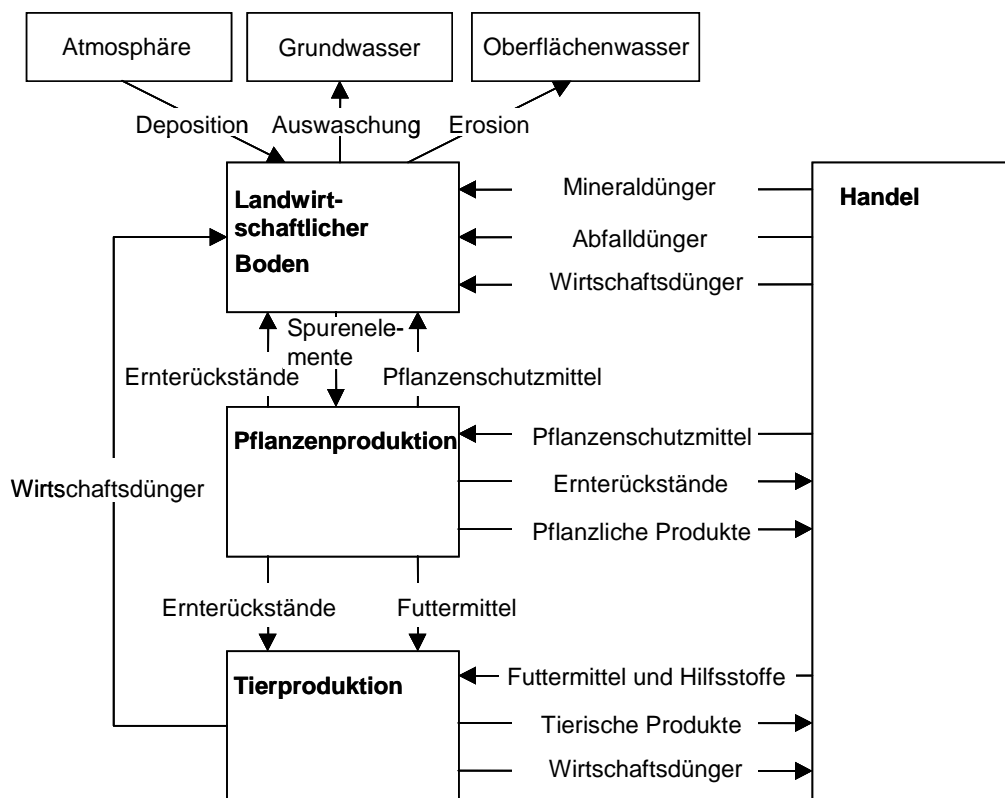


Abbildung 1: Schematische Darstellung von direkten Schwermetallflüssen (Pfeile) zwischen dem landwirtschaftlich genutzten Boden und den Prozessen der landwirtschaftlichen Produktion für die Herstellung von tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Kasten), sowie zwischen dem Handel und der Umwelt (Kühnholz 2001).

Um Böden zu schützen und eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen, muss abgeschätzt werden, wie gross die Einträge von Schwermetallen sind, und inwieweit die Landwirte durch ihr Verhalten diese Einträge steuern können (Moolenaar 1999).

Mittels einer Ökobilanz ist es möglich aufzuzeigen, welche Bewirtschaftungsformen im Vergleich untereinander für die Umwelt am günstigsten sind (Nemecek *et al.* 2005). Für die Abschätzung der Schwermetalleinträge in den Boden und den resultierenden Austrag in die Gewässer ist eine Methode zur Verfügung erforderlich, mit welcher das Inventar der Schwermetalle erstellt werden kann.

3.2 Ziel

Mit der vorliegenden Arbeit soll ein Modell bereitgestellt werden, das die verschiedenen landwirtschaftlichen Ein- und Austragspfade von Schwermetallen beschreibt. Ziel ist es, den Eintrag an Schwermetallen in den Boden, das Grundwasser und die Oberflächengewässer aufgrund der verschiedenen landwirtschaftlichen Tätigkeiten zu ermitteln. Anzustreben sind nicht Absolutwerte, sondern es sollen Unterschiede in Abhängigkeit von der praktizierten Bewirtschaftung auf der Ebene des Hofes und der Kultur aufgezeigt werden können.

Sämtliche Eingabegrößen müssen im Rahmen einer Ökobilanz erhoben werden können. Wenn eine betriebs- oder standortspezifische Erhebung nicht möglich ist, kommen Standardwerte zum Einsatz, für welche die Literaturquelle angegeben wird.

4. Herkunft der Schwermetalle im Boden

4.1 Natürliche Schwermetallbelastung

Die Böden weisen einen äusserst variablen Anteil an natürlich vorkommenden Schwermetallen auf. Die Quelle dieser natürlichen Belastung sind die bodenbildenden Gesteine. Durch Verwitterungsprozesse werden die in der kristallinen Grundstruktur eingebauten Schwermetalle freigesetzt (geogene Grundbelastung). Damit korreliert die Bodenbelastung mit jener der jeweiligen Muttergesteine, und die räumlichen Unterschiede können relativ gross sein. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Gesteine und ihrer Gehalte an Schwermetallen ist in Tuchs Schmid (1995) zu finden.

Tabelle 1 : Bereiche von durchschnittlichen geogenen Grundgehalten und Maximalwerte von Schwermetallen in bodenbildenden Gesteinen der Schweiz. Alle Werte gerundet in ppm.

	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Hg	Pb
Bereich	<1-120	1,5-45	1-70	5-140	<0,03-0,3	<0,1-0,2	<0,7-40
Maximum	ca. 200	ca. 70	ca. 150	ca. 200	ca. 0,6	ca. 0,3	ca. 50

Die Werte in Tabelle 1 entsprechen den mittleren Gehalten typischer Schweizer bodenbildender Gesteine. Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität sind sie aber oft bei einer lokalen Anwendung nicht repräsentativ. Nach Tuchs Schmid (1995) können die natürlichen Gehalte der Elemente Chrom, Kobalt, Blei, Nickel, Zink, Cadmium und Kupfer zwischen 15% und 110% der entsprechenden VBBo-Richtwerte (VBBo 1998) ausmachen.

4.2 Anthropogene Schwermetallbelastung

Zu den natürlichen Schwermetallgehalten des Bodens kommt die anthropogene Belastung hinzu. Die Einträge aus anthropogenen Quellen übersteigen diejenigen aus natürlichen Quellen deutlich und führen in erster Linie zu einer Akkumulation von Schwermetallen in der Umwelt (Herter und Külling 2001). Die Schadstoffe werden vorwiegend punktuell über landwirtschaftliche Hilfsstoffe wie Dünger und Pflanzenschutzmittel (vgl. Kapitel 4.2.2) und diffus über Luftverunreinigungen in die Böden eingebracht (Desaules und Studer 1993).

4.2.1 Diffuser Eintrag

Die Hauptemittenten der Luftschadstoffe Cadmium, Quecksilber und Zink sind die Industrie und das Gewerbe. Blei emissionen entstammen dem Verkehr (BUWAL 1995), den Kehrrichtverbrennungsanlagen und Korrosionsschutzarbeiten (Cecl' Air 2004). Aus den Emissionen in

die Luft resultiert die Deposition. Der mittlere jährliche Eintrag in die Böden der Schweiz (ausgenommen Alpweiden) durch Deposition kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Mittlere jährliche Deposition von Schwermetallen in der Schweiz. Die Werte für Cd, Cu, Pb und Zn stammen aus Keller *et al.* (2005), jene für Ni, Cr und Hg aus (Thöni und Seidler, 2004).

Metall	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Deposition [g/(ha*Jahr)]	0,7	2,4	90,4	18,7	5,475	3,65	0,05

Die Deposition kann als der anthropogene Eintrag in Böden angesehen werden, der nicht durch die Landwirtschaft verursacht wird. Sie kann daher nicht vom Bauern beeinflusst werden und stellt eine anthropogene Hintergrundbelastung dar. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Eintrag von Schwermetallen durch die maschinelle Bewirtschaftung der Felder respektive des Betriebes der Einrichtungen vernachlässigbar ist.

4.2.2 Landwirtschaftlich bedingter Eintrag

Landwirtschaftlich bedingte Schwermetalleinträge können entweder aus Verunreinigungen der Hilfsstoffe oder aus gezielt eingesetzten, metallhaltigen Zusätzen stammen.

Im Pflanzenbau sind je nach Bewirtschaftungsform nicht nur die Fruchtfolgen und der Maschineneinsatz, sondern auch die Art und Menge der verwendeten Dünger, der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und der Umgang mit Ernterückständen verschieden. Diese Faktoren beeinflussen die landwirtschaftlichen Ein- und Austräge von Schwermetallen (Nemecek *et al.* 2001).

Bei den zugelassenen Pflanzenschutzmitteln finden sich in insgesamt 13 Wirkstoffen Schwermetalle. Davon enthalten acht Kupfer mit einem Gewichtsanteil von 8-89% und fünf Zink mit einem Gewichtsanteil von 2,5-25% (Perkow und Ploss 1994). Ausgebracht werden die Pflanzenschutzmittel in flüssiger Form. Je nach Bedeckungsgrad der Böden mit Pflanzen kommt es neben der Benetzung der Pflanzenoberfläche auch zu einem direkten Eintrag in den Boden. Der den Pflanzen anhaftende Anteil der Pflanzenschutzmittel wird nach einer gewissen Wirkzeit durch Niederschläge abgewaschen und gelangt dann ebenfalls in den Boden. Der Anteil Schwermetalle, der in der Wirkzeit in die Blätter diffundiert, gelangt nach der Ernte mit den Ernterückständen zum Teil auch in den Boden. Zink- und kupferhaltige Pflanzenschutzmittel werden insbesondere im Wein- und Kartoffelanbau eingesetzt, wobei es zu einer starken Anreicherung im Boden kommen kann (Besnard *et al.* 2001).

Die meisten Dünger enthalten neben den Nährstoffen auch Verunreinigungen durch Schadstoffe. Die Düngung mit Mineraldüngern (Györi *et al.* 1996), Kompost (Moolenaar *et al.* 1997) und Klärschlamm (Siegenthaler *et al.* 1999) kann daher zu einer Akkumulation von Schwermetallen im Boden führen. Die Geschwindigkeit der Anreicherung hängt von der ausgebrach-

ten Menge und den Gehalten an Schwermetallen ab. Die Anwendung von Klärschlamm ist seit 2003 im Futter- und Gemüsebau nicht mehr gestattet. Für alle übrigen Flächen gilt eine Übergangsfrist bis spätestens 2006, welche im Einzelfall von den Kantonen bis 2008 verlängerbar ist (UVEK 2003).

Bei der Tierproduktion sind die Schwermetalle in den Futtermitteln, den Medikamenten (hauptsächlich Kupfervitriol) und den Wirtschaftsdüngern von Bedeutung (Schultheiss *et al.* 2004). Über Verunreinigungen in den Futtermitteln nehmen die Tiere Schwermetalle wie Cadmium, Blei oder Nickel auf. Ein weiterer Eintrag kann über Zusätze von Kupfer und Zink zum Futtermittel für Schweine und Rinder erfolgen. Diese Elemente wirken sich positiv auf Wachstum, Verdauung oder Fruchtbarkeit aus. Die Physiologie der Tiere bestimmt dabei, inwieweit sie die Schwermetalle speichern bzw. wieder ausscheiden. Somit bestimmt die Tierhaltung und die Wahl der Futtermittel im wesentlichen die Qualität des Wirtschaftsdüngers und der tierischen Produkte hinsichtlich deren Schwermetallgehalt. Weitere Eintragspfade wie Korrosion und Abrieb von Stalleinrichtungen oder Lagerbehältern spielen eine geringe Rolle. Emissionen aus Baustoffen und Farben sind von untergeordneter Bedeutung (Schultheiss *et al.* 2004).

5. Modellansatz

5.1 Grundsätze

Nachfolgend sind die Grundsätze aufgelistet, welche bei der Entwicklung des Modells verfolgt wurden:

- Jeder relevante Metallfluss wird so beschrieben, dass er im Rahmen einer Ökobilanz quantifiziert werden kann.
- Jedes Schwermetall wird für die Erstellung des Inventars der Emissionen separat betrachtet.
- Das Modell eignet sich für den relativen Vergleich verschiedener Bewirtschaftungsvarianten.
- Das Modell gilt für die Schweiz.
- Die Dynamik der Parameter kann nicht berücksichtigt werden, weshalb eine statische Berechnung erfolgt.
- Das Modell wird bei Bedarf und aufgrund neuer Erkenntnisse angepasst.

5.2 Prioritäten bei der Wahl der Schwermetalle

Innerhalb der Gesetzgebung werden verteilt über die einzelnen Gesetze und Verordnungen insgesamt zwölf verschiedene Schwermetalle berücksichtigt. Das Nationale Bodenbeobachtungsnetz (NABO) misst die Bodenbelastung durch acht Schwermetalle und Fluor. Da nicht für alle Schwermetalle eine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, müssen Prioritäten gesetzt werden. Die Auswahl soll in zwei Stufen geschehen.

In der ersten Stufe wird eine Liste zusammengestellt (Tabelle 4 im Anhang), die angibt, welche Schwermetalle in welcher Verordnung erfasst sind und in wieweit eine Relevanz für die Landwirtschaft besteht. Erweitert wird diese Liste mit den wichtigsten Methoden zur Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Aus der Tabelle 4 im Anhang wird ersichtlich, dass Arsen, Kobalt, Molybdän und Vanadium nur vereinzelt erfasst werden. Daher finden sie keine weitere Berücksichtigung in dieser Arbeit.

In der zweiten Stufe werden die übrigen Metalle in eine erste und zweite Priorität aufgeteilt. Diese Aufteilung erfolgt hinsichtlich der Umweltrelevanz der Metalle, welche über deren chemisches Verhalten (Toxizität ausgedrückt durch Grenzwerte) und Vorkommen in der Umwelt (gemessene Gehalte im NABO-Messnetz) abgeschätzt wird.

Daraus ergibt sich folgende Einteilung:

- Erste Priorität haben Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Blei (Pb)
- Zweite Priorität haben Nickel (Ni), Chrom (Cr) und Quecksilber (Hg)

Die Metalle Kupfer und Zink sind essentielle, das heisst lebensnotwendige, Spurenelemente. Sie wirken erst in höheren Konzentrationen toxisch. In der Landwirtschaft haben sie eine grosse Bedeutung. Im Pflanzenbau werden sie als Fungizide verwendet und in der Tierproduktion als Futterzusätze.

Die Metalle Cadmium und Blei gelten als nicht essentiell. Sie kommen in nicht vernachlässigbaren Mengen in der Umwelt vor und können schon in geringsten Konzentrationen eine toxische Wirkung entfalten.

Quecksilber ist ebenfalls sehr toxisch, aber es kommt auch nur in geringen Konzentrationen vor. Allfällige Belastungen sind im Auge zu behalten, da sie hauptsächlich durch den Menschen verursacht sind. Chrom und Nickel sind mässig toxisch und oft geogenen Ursprungs. Daher verursachen sie in Relation zu den Grenzwerten nur eine mittelmässige Belastung der Böden (Desaules 2004).

5.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen müssen räumlich und zeitlich definiert werden. Die zeitliche Grenze kann innerhalb eines Betriebes in Abhängigkeit der Vor- und Hauptfrucht, die auf den einzelnen Parzellen angebaut wird, variieren. In der Regel wird vom Zeitpunkt der Ernte der Vorkultur bis zur Ernte der Hauptkultur bilanziert. Bei Dauerwiesen betrachtet man ein Kalenderjahr (Nemecek *et al.* 2005).

Die räumliche Systemgrenze kann auf Ebene des Betriebs oder der Kultur definiert werden. Nachfolgend werden diese Definitionen detailliert erläutert.

5.3.1 Räumliche Systemgrenze auf der Ebene „Betrieb“

Die räumliche Grenze beginnt auf der Betriebsebene mit dem Hoftor und umschliesst die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche. Die vertikale Systemgrenze bilden die Übergänge von der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche sowie den baulichen Einrichtungen zur Atmosphäre.

Abbildung 2 stellt das System Betrieb schematisch dar. Die Systemgrenze umreisst das landwirtschaftliche Produktionssystem. Dieses besteht aus den Prozessen Tierproduktion, Pflanzenproduktion und Boden, die durch die Kasten dargestellt werden. Eine Sonderstellung nimmt der landwirtschaftliche Boden ein. Er ist auf der einen Seite ein Umweltkompar-

timient wie die Luft und das Wasser, auf der anderen Seite ist er aber auch ein wichtiger Produktionsfaktor in der Pflanzenproduktion.

Das landwirtschaftliche Produktionssystem steht in Wechselwirkung mit seiner Umwelt. Dies sind die Umweltkompartimente Wasser (aufgeteilt in Grund- und Oberflächenwasser) und Luft (Atmosphäre). Eine zweite Wechselwirkung besteht mit dem Handel. Aus dem Handel bezieht der Landwirt seine Hilfsstoffe wie Saatgut, Dünger und Pestizide. Die Produkte, die er damit herstellt, verkauft er anschliessend wieder an den Handel.

Die Pfeile symbolisieren Massenflüsse von Schwermetallen. Die Beschriftung der Pfeile gibt in Stichworten die Handlungen an, durch welche die Schwermetalle in die einzelnen Prozesse gelangen. So beschreibt z.B. „Mineraldünger“ das Ausbringen von Mineraldüngern auf die Felder und damit in den Boden.

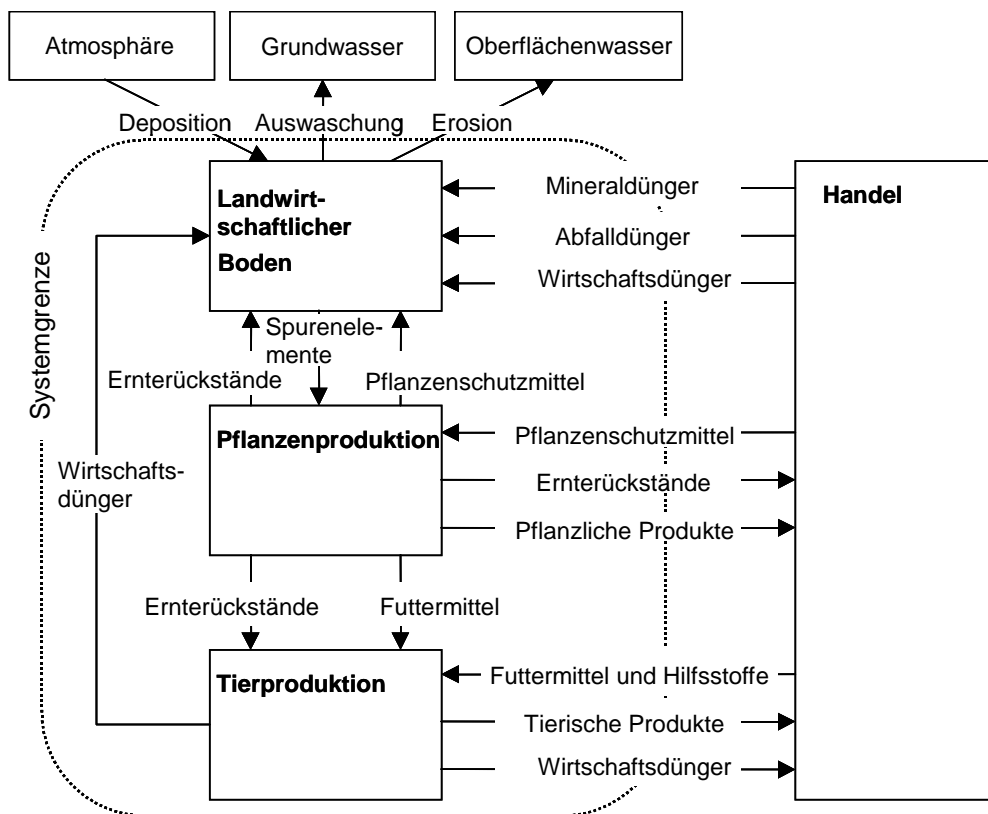


Abbildung 2: Schematische Darstellung der mit Hilfsstoffen (Beschriftung der Pfeile) verbundenen direkten Schwermetallflüsse (Pfeile) zwischen den Prozessen (Kästen) der landwirtschaftlichen Produktion auf der Ebene „Betrieb“ (Kühnholz 2001).

5.3.2 Räumliche Systemgrenze auf der Ebene „Kultur“

Für die Betrachtung auf Ebene der Kultur ist die horizontale Grenze die flächige Ausdehnung der dafür bewirtschafteten Parzelle. Die vertikale Systemgrenze bildet der Übergang von der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche zur Atmosphäre.

Die Flüsse, die zur Beschreibung der Parzellenbilanz erforderlich sind, sind Bausteine des Systems „landwirtschaftlicher Betrieb“. Als Parzelle wird die kleinste landwirtschaftliche Fläche verstanden, die einheitlich bewirtschaftet wird (Abbildung 3). Die Parzellenbilanz unterscheidet sich von der Betriebsbilanz lediglich durch die Wahl anderer Systemgrenzen. Das hat zur Folge, dass der Prozess „Tierproduktion“ als Herkunft von Wirtschaftsdüngern und als Ziel für Ernterückstände und Futtermittel extern behandelt wird. Dadurch fallen alle mit der Tierhaltung verbundenen Güterflüsse weg, da sie für die Parzellenbilanz nicht mehr relevant sind. Selbstproduzierter Wirtschaftsdünger kann nicht mehr als interner Fluss verrechnet werden. Eine Ausnahme bildet die Nutzung als Weide. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese nie unabhängig von der Tierproduktion, und somit vom Betrieb, betrachtet wird.

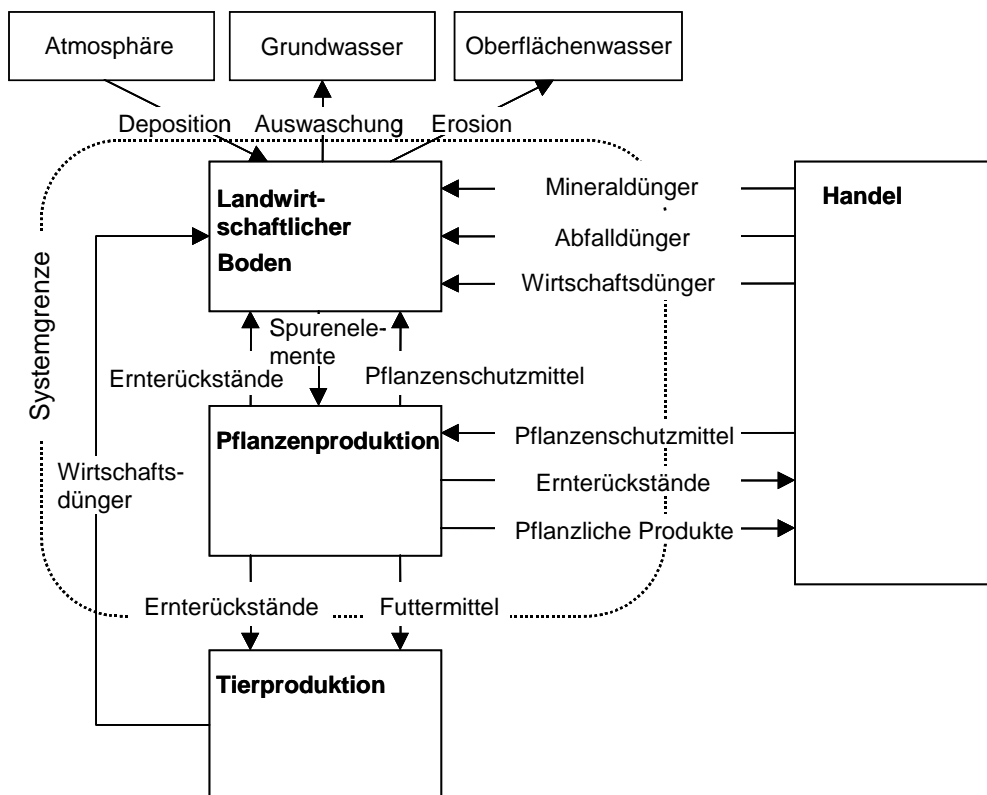


Abbildung 3: Schematische Darstellung der mit Hilfsstoffen (Beschriftung der Pfeile) verbundenen direkten Schwermetallflüsse (Pfeile) zwischen den Prozessen (Kästen) der landwirtschaftlichen Produktion auf der Ebene „Kultur“ (nach Kühnholz 2001).

5.4 Annahmen und Grenzen

Damit die Schwermetallflüsse im Rahmen einer Ökobilanz modelliert werden können, müssen Annahmen getroffen werden:

- Die Konzentration von Schwermetallen im Boden kann bei einer Ökobilanz nicht gemessen werden. Daher wird davon ausgegangen, dass der Grundgehalt schweizerischen Durchschnittswerten entspricht (vgl. Tabelle 5). Diese Durchschnittswerte aus Keller und Desaules (2001) haben Gültigkeit, bis neue Werte aus dem NABO verfügbar sind.
- Der Grundgehalt verändert sich nicht innerhalb der bilanzierten Zeitperiode.
- Der Entzug durch Pflanzen, die Erosion und die Auswaschung beeinflussen sich gegenseitig nicht.
- Erosion und Auswaschung von Schwermetallen würden ohne landwirtschaftliche Bewirtschaftung nicht auftreten. Daher hat der Betrieb auch die Verantwortung für die aus dem Grundgehalt ins Grundwasser respektive Oberflächengewässer eingetragenen Schwermetalle zu übernehmen.
- Beim Schwermetallgehalt in den Pflanzen wird in der Regel kein Unterschied gemacht zwischen den unterschiedlichen Pflanzenteilen oder zwischen dem Saatgut und den Ernteprodukten. Eine Ausnahme bildet das Getreide, bei dem Stroh und Körner separat betrachtet werden.
- Wenn Ernterückstände auf dem Feld verbleiben, so ergibt sich mit dem Boden ein geschlossener Kreislauf: Die Schwermetalle, welche durch das Pflanzenwachstum in die Ernterückstände gelangen, gehen durch Zersetzung wieder zurück in denselben Boden. Über die Dauer einer Fruchtfolge betrachtet, führen die Ernterückstände somit zu keiner Gehaltsänderung und werden deshalb im Modell nicht berücksichtigt.
- Zugekaufte Futtermittel und Hilfsstoffe in der Tierproduktion stellen einen Input in den landwirtschaftlichen Betrieb dar. Es muss angenommen werden, dass sie direkt (im Falle von Einstreu und Klauenbehandlungsmitteln) oder durch die Verdauung und Ausscheidung in den Wirtschaftsdünger gelangen und diesen zusätzlich mit Schwermetallen belasten. Daher werden sie, reduziert durch die Resorption durch das Tier, als Input in den Boden betrachtet. In Anlehnung an die Angaben des Instituts für Veterinärpharmakologie und -toxikologie der Universität Zürich (2004) werden die folgenden Resorptionsraten für Schwermetalle in Futtermitteln angenommen:
 - Cadmium: 5 % (sehr langsame Aufnahme)
 - Kupfer: 50 %

- Zink: 10 %
 - Blei: 10 %
 - Nickel: 0 % (konservative Annahme, da keine Angaben vorhanden)
 - Chrom: 0 % (da wasserlöslich keine Ansammlung im Gewebe)
 - Quecksilber 75 % (als organische Verbindung).
- Die Berechnung der durch Oberflächenabschwemmung in die Gewässer eingetragene Schwermetallfracht kann mangels wissenschaftlicher Grundlagen noch nicht vollzogen werden. Es ist anzunehmen, dass sie auf gewissen Flächen mit einer Neigung von mehr als ca. 4 % an Bedeutung gewinnen kann (Keller 2004). Daher ist bei einer zukünftigen Verfeinerung des Modells unbedingt der Einbezug dieses Austragspfads anzustreben.
 - Ohne Drainage gelangt sämtliches Sickerwasser ins Grundwasser. Wenn die Parzelle drainiert ist, so wird das Sickerwasser vollständig dem Oberflächengewässer zugeführt.
 - Die Aufnahme von Schwermetallen durch die Lebewesen wird im Modell als Wirkungspfad nicht berücksichtigt.

5.5 Aufbau des Modells

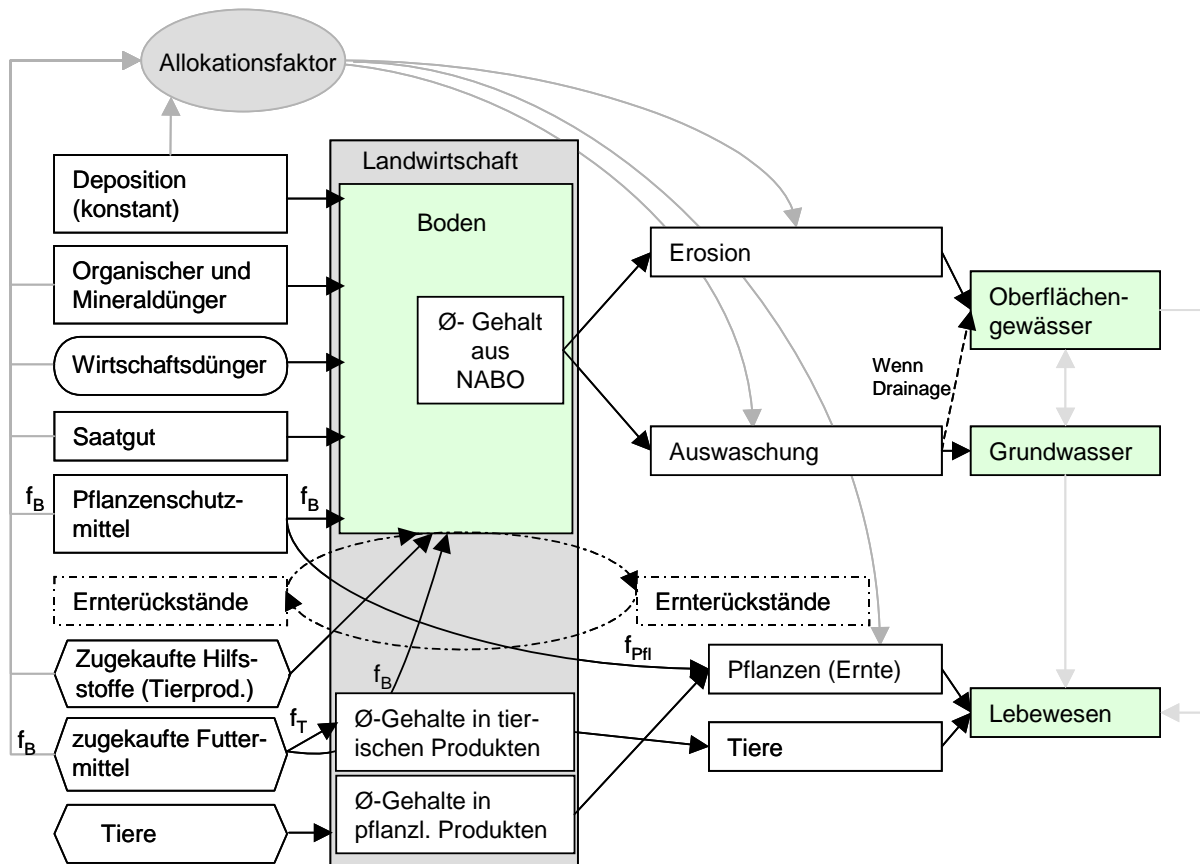
Das Modell besteht aus einer Reihe von Gleichungen, welche die einzelnen, landwirtschaftlich relevanten Schwermetallflüsse beschreiben. Der Modellaufbau ist in Abbildung 4 bildlich dargestellt.

Der Schwermetalleintrag durch Deposition kann vom Landwirt nicht beeinflusst werden. Daher müssen die Output-Flüsse durch den Allokationsfaktor vermindert werden. Für die Flüsse, welche in Abbildung 4 als weiße Kästen dargestellt sind, werden in Kapitel 6 die entsprechenden Gleichungen angegeben. Hellgrau dargestellt sind die Umweltkompartimente, in welche die Schwermetalle gelangen. Ihre Kenntnis ist für die Wirkungsabschätzung wichtig. Die Lebewesen sind in Abbildung 4 im Sinne der Vollständigkeit enthalten. Dieser Wirkungspfad wird im Folgenden nicht weiter verfolgt.

Die Auswahl der zu berücksichtigenden Flüsse richtet sich nach dem System. Für eine Betriebsbilanz werden sämtliche gerechnet, wobei nur die extern zugekauften Stoffe, z.B. Dünger, gezählt werden. Auf Ebene Kultur werden auch hofeigene Stoffflüsse (Wirtschaftsdünger) berechnet. Die Einträge in die Tierproduktion werden in diesem Fall jedoch nicht mehr berücksichtigt.

Der Schwermetalleintrag in den Boden berechnet sich aus dem Eintrag abzüglich des Austrags über Entzug durch Pflanzen, Erosion und Auswaschung. Der Eintrag ins Grundwasser stammt aus der Auswaschung, sofern die betreffende Parzelle nicht drainiert ist. Sonst wird

angenommen, dass das Sickerwasser ebenso wie ein Teil des erodierten Materials ins nächste Oberflächengewässer gelangt.



- Legende:
- Auf Ebene Betrieb werden nur die zugekauften Wirtschaftsdünger berücksichtigt
 - Interner Kreislauf zwischen Boden und Ernterückständen
 - Wird nur auf Ebene Betrieb berücksichtigt
- f_B : Anteil, der in den Boden gelangt
 f_{Pfl} : Anteil, der in die Pflanze eindringt
 f_T : Anteil, der vom Tier aufgenommen wird

Abbildung 4: Modellaufbau für die Berechnung von Schwermetallflüssen landwirtschaftlicher Produktionssysteme: Erklärungen siehe Kapitel 5.5.

6. Berechnung der Schwermetallflüsse

Im Folgenden werden die Gleichungen für die Berechnung der Schwermetallflüsse im Rahmen einer landwirtschaftlichen Ökobilanz beschrieben. Die Gleichungen sind für jedes der in Kapitel 5.2 aufgezählten Schwermetalle (im Folgenden repräsentiert durch den Index i) separat zu berechnen.

6.1 Dünger

Die Berechnung der Schwermetalleinträge durch mineralische und organische Dünger kann mit einem linearen Zusammenhang beschrieben werden:

$$M_{\text{Dünger } i} = Q_{\text{Dünger}} \cdot C_{\text{Dünger } i} \quad (1)$$

$M_{\text{Dünger } i}$ [mg/(ha· Jahr)] Schwermetallfracht des Metalls i , die durch Dünger in den Boden gelangt.

$Q_{\text{Dünger}}$ [kg/(ha· Jahr)] Die Menge an verwendeten Düngern wird für die Fragestellung spezifisch erhoben

$C_{\text{Dünger } i}$ [mg/kg] Konzentration des Schwermetalls i in Düngern (für Werte siehe Tabelle 10 bis Tabelle 14 im Anhang)

Die Schwermetallgehalte von Mineraldüngern in Tabelle 10 stammen von Untersuchungen aus den Jahren 1989 und 1990. Da die Mineraldünger mit Ausnahme des Rohphosphates technisch hergestellt werden, können Schadstoffe entfernt werden. Dies wird wahrscheinlich auch von einigen Herstellern getan. Inwieweit sich das auf die Qualität der Mineraldünger auswirkt, kann jedoch nicht überprüft werden, da keine neueren Daten für die Schweiz erhältlich sind.

Die Schwermetallkonzentration in Wirtschaftsdüngern in Tabelle 11 beziehen sich grösstenteils auf die Schwermetalle der ersten Priorität gemäss diesem Bericht, was die Vergleichbarkeit mit den anderen Düngern einschränkt. Darüber hinaus gibt es keine Möglichkeit, zwischen IP und Bio zu unterscheiden.

Die Schwermetallgehalte von Klärschlamm in Tabelle 12 beziehen sich auf das Jahr 1999, jene von Kompost auf das Jahr 1998. Die Daten erfassen 70% der Kompostieranlagen. Die übrigen Kompostieranlagen untersuchen laut Candinas *et al.* (1999b) die Schwermetallgehalte ihres Komposts nicht, auch wenn sie nach StoV (1986) dazu verpflichtet sind.

Die Schwermetallgehalte der diversen Abfälle in Tabelle 13 und der Holzaschen in Tabelle 14 können derzeit als aktuell angesehen werden.

6.2 Pflanzenschutzmittel

Der Eintrag von Kupfer und Zink durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln kann mit einem linearen Zusammenhang beschrieben werden. Voraussetzung ist, dass die ausgebrachte Menge an schwermetallhaltigem Wirkstoff bekannt ist.

$$M_{\text{Wirkstoff } i} = Q_{\text{Wirkstoff}} \cdot p_{\text{Wirkstoff } i} \cdot 0.95 \quad (2)$$

$M_{\text{Wirkstoff } i}$ [mg/ha] Schwermetallfracht, die durch einen in Pflanzenschutzmitteln enthaltenen Wirkstoff in den Boden eingetragen wird.

$Q_{\text{Wirkstoff}}$ [mg/ha] Die verwendete Menge an Wirkstoff wird spezifisch für die konkrete Anwendung erhoben.

$p_{\text{Wirkstoff } i}$ [%] Schwermetallgehalt in Gewichtsprozent (vgl. Tabelle 9 im Anhang).

Gemäss Kapitel 4.2.2 wird davon ausgegangen, dass auch die auf den Pflanzen anhaftende Menge an Pflanzenschutzmitteln nach einer gewissen Wirkzeit durch Niederschläge in den Boden eingewaschen wird. Verbleiben die Ernterückstände auf dem Feld, so gelangt sogar der Anteil, der in die Blätter hinein diffundiert ist, in den Boden.

Audsley *et al.* (1997) nehmen an, dass 5 % der ausgebrachten organischen Pflanzenschutzmittel auf den Pflanzen haften bleiben und 10 % durch Winddrift verloren gehen. Bei den schwermetallhaltigen Wirkstoffen muss dahingegen davon ausgegangen werden, dass die Verflüchtigung keine Bedeutung hat. Somit wird angenommen, dass 95 % der mit Pflanzenschutzmitteln ausgebrachten Schwermetalle in den Boden eingetragen werden, während ebenfalls 5 % von den Pflanzen aufgenommen werden.

6.3 Futtermittel

Die Berechnung des Schwermetalleintrags durch die zugekauften Futtermittel wird mit einem linearen Zusammenhang zwischen Menge und Durchschnittsgehalt beschrieben.

$$M_{\text{Futter } i} = Q_{\text{Futter}} \cdot C_{\text{Futter } i} \quad (3)$$

$M_{\text{Futter } i}$ [mg] Schwermetallfracht, die durch zugekaufte Futtermittel ins System Landwirtschaft eingetragen wird.

Q_{Futter} [kg] Die verwendete Menge von Futtermitteln in Trockensubstanz wird für jede Fragestellung spezifisch erhoben.

$C_{\text{Futter } i}$ [mg/kg] Konzentration des Schwermetalls i im Futtermittel (Durchschnittsgehalte pro Futtermittel sind aus Tabelle 7 im Anhang ersichtlich).

Auf Grund der Durchschnittswerte in Tabelle 7 können keine Unterschiede zwischen IP- und Bio-Futtermitteln gemacht werden. Die Zink- und Kupferzusätze richten sich nach RAP (1999, 2004).

Die schwermetallhaltigen Verunreinigungen und Zusätze zum Futtermittel werden zum Teil von den Tieren aufgenommen und zum Teil ausgeschieden und mit der Gülle oder dem Mist in den Boden eingetragen. Die Annahme über die Aufnahme durch die Tiere ist in Kapitel 5.4 beschrieben.

6.4 Hilfsstoffe in der Tierproduktion

Die Berechnung des Schwermetalleinträge durch die in der Tierproduktion verwendeten Hilfsstoffe kann ebenfalls mit einem linearen Zusammenhang beschrieben werden.

$$M_{\text{Hilf } i} = Q_{\text{Hilf}} \cdot C_{\text{Hilf } i} \quad (4)$$

$M_{\text{Hilf } i}$ [mg] Schwermetallfracht verursacht durch zugekaufte Hilfsstoffe.

Q_{Hilf} [kg] Die verwendete Menge von Futtermitteln wird für eine Fragestellung spezifisch erhoben.

$C_{\text{Hilf } i}$ [mg/kg TS] Schwermetallgehalt in Hilfsstoffen befinden sich in Tabelle 8 im Anhang.

6.5 Pflanzliche Produkte und Ernterückstände

Der Austrag von Schwermetallen über die pflanzlichen Produkte und über die verarbeiteten Pflanzenrückstände wird durch zwei Pfade dominiert: Die Aufnahme erfolgt einerseits über die Wurzeln (in Form gelöster Metalle aus dem Boden) und andererseits über das Blattwerk, wenn schwermetallhaltige Pflanzenschutzmittel oder Jauche appliziert werden.

Es bestehen verschiedene Versuche, eine Beziehung zwischen der pflanzenverfügbaren Schwermetallkonzentration im Boden und der daraus resultierenden Schwermetallkonzentration in Pflanzen über Transferfunktionen oder -faktoren herzustellen (Sauerbeck und Lübben 1991; Knoche *et al.* 1999; Puschenreiter und Horak 2000; Hough *et al.* 2003). In der landwirtschaftlichen Ökobilanz sind diese Ansätze aber kaum anwendbar, da sie zumeist von belasteten Standorten und nur für die wenigsten Kulturpflanzen abgeleitet wurden. Ausserdem wird die Aufnahme von Schwermetallen stark durch die Bewirtschaftung (Düngung, Kalkung) beeinflusst, weshalb die Faktoren nicht allgemein übertragbar sind. Ferner ist die pflanzenverfügbare Konzentration im Boden in der Ökobilanz unbekannt. Ausserdem werden unterschiedlichen Extraktionsmittel verwendet, um den löslichen Schwermetallanteil zu bestimmen. Dadurch wird die Übertragbarkeit von Transferfaktoren ebenfalls erschwert.

Auf die Anwendung von Transferfaktoren wird aus obigen Gründen verzichtet. Dies ist vertretbar, weil für die Bodenkonzentration ein gemittelter Wert aus der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) (Keller und Desaulles 2001) verwendet wird und nicht der effektive, im Rahmen der Ökobilanz nicht ermittelbare Gehalt einer bestimmten Parzelle. Das Modell stellt somit keine geschlossene Bilanz dar. Der bewirtschaftungsbedingte Unterschied im Schwermetallentzug durch Pflanzen wird daher in erster Linie durch den Allokationsfaktor (vgl. Kapitel 6.9) abgebildet. Dieser Faktor berechnet sich aus dem Quotienten von landwirtschaftlich bedingtem Schwermetalleintrag und gesamtem Eintrag (Landwirtschaft und Deposition).

Der Austrag durch pflanzliche Produkte wird über Durchschnittsgehalte und den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln berechnet. Unter pflanzlichen Produkten wird auch das Saatgut verstanden.

$$M_{\text{Pflanze } i} = Q_{\text{Pflanze } i} \cdot C_{\text{Pflanze } i} \cdot A + f \cdot Q_{\text{Wirk } i} \cdot p_{\text{Wirk } i} \quad (5)$$

$M_{\text{Pflanze } i}$ Schwermetallfracht, welche durch pflanzliche Produkte dem System entzogen wird.
[mg/(ha· Jahr)]

$Q_{\text{Pflanze } i}$ Die Erntemenge in Trockensubstanz wird für die konkrete Fragestellung spezifisch erhoben oder kann mit Hilfe der Tabelle 6 im Anhang abgeschätzt werden.
[kg/(ha· Jahr)]

$C_{\text{Pflanze } i}$ [mg/kg]	Schwermetallkonzentration in pflanzlichen Produkten (vgl. Tabelle 7 im Anhang)
A_i	Allokationsfaktor (Berechnung gemäss Kapitel 6.9)
$Q_{\text{Wirkstoff}}$ [mg/(ha· Jahr)]	Ausgebrachte Menge eines schwermetallhaltigen Wirkstoffs in einem Pflanzenschutzmittel (vgl. Kapitel 6.1)
$p_{\text{Wirkstoff } i}$ [%]	Schwermetallgehalt in Gewichtsprozent (vgl. Tabelle 9 im Anhang).
f [%]	Schwermetallanteil, welcher mit dem Pflanzenschutzmittel über die Blätter von der Pflanze aufgenommen wird. Annahme in Anlehnung an Audsley et al. (1997): $f = 0.05$

6.6 Tierische Produkte

Durch den Zu- und Verkauf von Tieren werden Schwermetalle aus dem betrachteten System entfernt oder zugeführt. Durchschnittliche Gewichtsprozent für die verschiedenen tierischen Produkte beim Rind und beim Schwein befinden sich in Tabelle 15. Die Berechnung der Schwermetallfracht $M_{\text{Tier } i}$ beruht auf durchschnittlichen Gehalten, welche der Tabelle 13 und Tabelle 16 im Anhang entnommen werden können.

$$M_{\text{Tier } i} = Q_{\text{Tier}} \cdot C_{\text{Tier } i} \quad (6)$$

$M_{\text{Tier } i}$ [mg/(Jahr)]	Schwermetallfracht, die durch tierische Produkte verursacht wird
Q_{Tier} [kg/(Jahr)]	Menge an verkauftem tierischem Produkt (z.B. Fleisch, Eier, Reststoffe für Tiermehlproduktion etc.)
$C_{\text{Tier } i}$ [mg/kg]	Schwermetallgehalt im jeweiligen tierischen Produkt. Die Gehalte können der Tabelle 16 im Anhang entnommen werden.

6.7 Auswaschung ins Grundwasser oder in die Oberflächengewässer

Es kann davon ausgegangen werden, dass Schwermetalle höchstens in sehr geringen Mengen ins Grundwasser ausgewaschen werden. Dies bestätigt die nationale Qualitätsbeobachtung Grundwasser NAQUA, in deren Rahmen in den vergangenen sechs Jahren Grundwasserproben analysiert wurden. Zn konnte teilweise, Ni, Cr und Cu nur vereinzelt und Pb und Cd nie nachgewiesen werden (BUWAL und BWG, 2004). Um die Möglichkeit einer gewissen Auswaschung der Schwermetalle dennoch zu berücksichtigen, wird hier ein vereinfachter Modellansatz mit fixen Auswaschungswerten verwendet:

$$M_{\text{Ausw } i} = m_{\text{Ausw } i} \cdot A_i \quad (7)$$

M_{Ausw} Schwermetallfracht, die durch Auswaschung aus der Pflugschicht entfernt wird und der Bewirtschaftung zugeschrieben werden kann.
[mg/(ha· Jahr)]

$m_{\text{Ausw } i}$ Schwermetallmenge, die im Mittel ausgewaschen wird (vgl. Tabelle 3).

A_i Allokationsfaktor (Berechnung gemäss Kapitel 6.9)

Tabelle 3: Schwermetallaustrag durch Sickerwasser (Wolfensberger und Dinkel, 1997)

	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
$m_{\text{Ausw } i}$ [mg/ha]	50	3600	33000	600	n.a.	21200	1,3

Dieses Modell stellt einen stark vereinfachten Ansatz dar. Es kann lediglich relativ zu anderen Bewirtschaftungspraxen abgeschätzt werden, welche Schwermetallfracht aus der Pflugschicht ausgewaschen wird. Ist die Parzelle drainiert, so geht man davon aus, dass das Sickerwasser vollständig über die Drainage ins nächste Oberflächengewässer geleitet wird. Der Eintrag ins Grundwasser wird in diesem Fall als null angenommen.

6.8 Erosion

Die Berechnung der Schwermetallfracht durch Erosion erfolgt mit nachfolgender Gleichung:

$$M_{\text{Erosion } i} = c_{\text{tot } i} \cdot B \cdot a \cdot f_{\text{Erosion}} \cdot A_i \quad (8)$$

$M_{\text{Erosion } i}$ Menge an Schwermetallen, die durch die Erosion aus dem Boden entfernt wird und der Bewirtschaftung zugeschrieben werden kann.
[g/ha· Jahr]

$c_{\text{tot } i}$ [mg/kg] Totale Konzentration des Schwermetalls i im Boden aus Tabelle 5.

B [t/ha· Jahr] Menge an Boden, die in einem Jahr erodiert wird (Berechnung gemäss Oberholzer *et al.* 2006).

a Faktor, der die Anreicherung von Schwermetallen an leichter erodierbaren Ton-Humuskomplexen beschreibt. Da dieser Faktor bisher nicht für Schwermetalle bestimmt wurde, muss der Anreicherungs Wert für Phosphor von 1,86 (Prasuhn 2006) angenommen werden.

A_i Allokationsfaktor (Berechnung gemäss Kapitel 6.9)

f_{Erosion} Von Distanz der Parzelle zum Gewässer abhängiger Erosionsfaktor, der beschreibt, welcher Anteil des erodierten Materials ins Gewässer gelangt (vgl. Text unten). Als Durchschnittswert wird angenommen $f = 0,2$.

Die Höhe des Eintrages von erodiertem Material ins Gewässer ist variabel und standort- sowie ereignisabhängig. In Anlehnung an den Austrag von Phosphor kann angenommen werden, dass im langjährigen Mittel rund 20% des erodierten Bodenmaterials einer Region bis in ein Gewässer gelangen (Mosimann *et al.* 1990, Prasuhn 1991, Prasuhn und Grünig 2001).

Liegen Angaben zur Distanz der Parzelle (Parzellenrand in Gefällsrichtung) zum nächsten Gewässer oder Weg mit Einlaufschächten vor, könnte auch eine Differenzierung wie folgt gemacht werden (Schätzwerte nach Prasuhn 2006):

- <3m f = 0,25
- 3 bis 30m f = 0,20
- 30 bis 100m f = 0,15
- >100m f = 0,05

6.9 Allokation

Ein Teil der Schwermetallfracht, welche in den Boden gelangt, stammt von der atmosphärischen Deposition. Mittels Allokation muss daher der Anteil letzterer von den berechneten Ein- und Austrägen abgezogen werden. Der Allokationsfaktor wird pro Schwermetall folgendermassen aus der Summe der landwirtschaftlichen Einträge und der atmosphärischen Deposition (vgl. Tabelle 2) bestimmt:

$$A_i = M_{\text{Agro } i} / (M_{\text{Agro } i} + M_{\text{Deposition } i}) \quad (9)$$

A_i Allokationsfaktor für das Schwermetall i

$M_{\text{Agro } i}$ [g/ha· Jahr] Totale Menge vom Schwermetall i , die durch die Bewirtschaftung in den Boden gelangt:

Betrieb: $M_{\text{Agro } i} = M_{\text{Dünger } i} + M_{\text{Wirkstoff } i} + M_{\text{Futter } i} + M_{\text{Hilfsstoffe } i} + M_{\text{Saatgut } i}$

Berechnung der einzelnen Flüsse gemäss Gleichungen (1) (nur Mineraldünger und zugekaufte Wirtschaftdünger) bis (5) (Saatgut).

Kultur: $M_{\text{Agro } i} = M_{\text{Dünger } i} + M_{\text{Wirkstoff } i} + M_{\text{Saatgut } i}$

Berechnung der einzelnen Flüsse gemäss Gleichung (1) (Mineral- und Wirtschaftsdünger), (2) und (5) (Saatgut)

$M_{\text{Deposition } i}$ Menge des Schwermetalls i , die über die atmosphärische Deposition in den Boden eingetragen wird (Werte gemäss Tabelle 2).

Mangels genauerer Daten wird angenommen, dass der Schwermetallgehalt im Boden konstant ist. Damit aber dennoch gezeigt werden kann, welchen Einfluss die Bewirtschaftung auf die Schwermetallflüsse ausübt, wird der Allokationsfaktor verwendet. Das heisst, je grösser

der Eintrag an Schwermetallen durch den Landwirt im Vergleich zur Deposition ist, desto stärker wird die Auswaschung seiner Tätigkeit zugerechnet.

Werden durch die Bewirtschaftung keine Schwermetalle in den Boden eingetragen, so hat der Allokationsfaktor den Wert null. Die landwirtschaftlich bedingten Austräge werden durch die Anwendung dieses Faktors ebenfalls null. Dies bedeutet aber nicht, dass keine Entzüge stattfinden, sondern, dass diese nicht der untersuchten landwirtschaftlichen Aktivität angelastet werden.

7. Wirkungsabschätzung

Für die Abschätzung der Wirkung der Schwermetalle auf die Umwelt ist festzuhalten, in welche Umweltkompartimente sie gelangen. Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass die Schwermetalle teils im Boden verbleiben, teils durch verschiedene Prozesse verlagert werden:

- Durch Erosion und Oberflächenabschwemmung gelangen die Schwermetalle in die Oberflächengewässer und können von dort durch Lebewesen aufgenommen werden oder durch Infiltration ins Grundwasser weiterverlagert werden;
- Durch Auswaschung gelangen sie ins Grundwasser und von dort durch die Nutzung als Trinkwasser in den Menschen oder die Tiere;
- Durch den Verzehr von pflanzlichen und tierischen Produkten nehmen die Lebewesen, einschliesslich dem Menschen, die Schwermetalle auf.

Die Schwermetalle spielen in der Wirkungsabschätzung eine Rolle bei der Ökotoxizität und der Humantoxizität im Allgemeinen sowie der Bodenqualität im Speziellen.

8. Literaturverzeichnis

- Audsley A., Alber S., Clift R., Cowell S., Crettaz P., Gaillard G., Hausheer J., Jolliet O., Kleijn R., Mortensen B., Pearce D., Roger E., Teulon H., Weidema B., van Zeijts H., 1997. Report on Concerted Action "Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture". AIR3-CT94-2028. European Commission DG VI Agriculture.
- Besnard E., Chenu C. und Robert M., 2001. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils. *Environmental Pollution*. 112(3): 329-337.
- Brockhaus. 1971. Brockhaus der Naturwissenschaften und der Technik. Wiesbaden: F. A. Brockhaus.
- BUWAL, 1995. Vom Mensch verursachte Luftschadstoffe in der Schweiz von 1900-2010. Schriftenreihe Umwelt; Nr. 256; Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- BUWAL und BWG (Hrsg.) 2004. NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003. Bern. Verfügbar im Internet:
<http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/shop/files/pdf/phpRTxi6.pdf> (Zugriff: April 2006)
- Candinas, T., Chassot, G.M., und Besson, J. M. 1999. Klärschlamm: Die Qualität ist laufend besser geworden. *Agrarforschung*. 6(4): 145-148.
- Candinas T., Golder E., Kupper T., und Besson J. M., 1999. Nähr- und Schadstoffe im Kompost. *Agrarforschung*. 6(11-12): 421-424.
- Cercl' Air, 2004. Glossar. Verfügbar auf dem Internet:
<http://www.cerclair.ch/TOOLBOX/de/Glossar.pdf> (Zugriff: April 2006)
- Desaules A. und Studer C., 1993. NABO - Nationales Beobachtungsnetz, Messresultate 1985-1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Desaules A., 2004. Mündliche Mitteilung.
- FAW und BLW (Hrsg.) 2000. Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis 2000. Bern: EDMZ.
- FIV, 1995. Verordnung über Fremd- und Inhaltstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV). 3000 Bern: EDMZ. SR 817.021.23

- FMBV, 1999. Verordnung des EDV über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Zusatzstoffen für die Tierernährung, Silierungszusätze und Diätfuttermittel (Futtermittelbuch-Verordnung, FMBV). 3000 Bern: EDMZ. SR 916.307.1
- GSchV, 1998. Gewässerschutzverordnung (GSchV). 3000 Bern: EDMZ. SR 814.201
- Györi Z., Goulding K., Blake L. und Prokisch J., 1996. Changes in the heavy metal contents of soil from the Park Grass Experiment at Rothamsted Experiment Station. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. 354:699-702.
- Heijungs R., de Koning A., Ligthart T. und Korenromp R., 2004. Improvement of LCA characterization factors and LCA practice for metals. Apeldoorn: TNO Environment, Energy and Process Innovation. 67 S.
- Heiz, H.-J., 2004. Mündliche Mitteilung.
- Herter U. 2000. Mündliche Mitteilung.
- Herter U. und Külling D., 2001. Risikoanalyse zur Abfalldüngerverwertung in der Landwirtschaft. Zürich: Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL. 273 S. Verfügbar im Internet (Zugriff: April 2006): <http://www.blw.admin.ch/rubriken/00231/unterseite00011/index.html?lang=de>
- Houba V.J.G., Uittenbogaard J., 1994. chemical composition of various plant species. International Plant Analytical Exchange (IPE). Department of Soil Science und Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University The Netherlands.
- Houba V.J.G., Uittenbogaard J., 1995. chemical composition of various plant species. International Plant Analytical Exchange (IPE). Department of Soil Science und Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University The Netherlands.
- Houba V.J.G., Uittenbogaard J., 1996. chemical composition of various plant species. International Plant Analytical Exchange (IPE). Department of Soil Science und Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University The Netherlands
- Houba V.J.G., Uittenbogaard J., 1997. chemical composition of various plant species. International Plant Analytical Exchange (IPE). Department of Soil Science und Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University The Netherlands.
- Hough R. L., Young S. D. und Crout N. M. J., 2003. Modelling of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn uptake, by winter wheat and forage maize, from a sewage disposal farm. *Soil Use and Management* 19: 19-27.
- Keller A., 2004. Mündliche Mitteilung.
- Keller A. und Desaules A., 2004. Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobach-

tung. Agrarforschung 11 (11-12): 498-503.

Keller A., Rossier N. und Desaulles A., 2005. Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftparzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. NABO-Nationales Bodenbeobachtungsnetz der Schweiz. Schriftenreihe der FAL Nr. 54. Zürich-Reckenholz: Agroscope FAL Reckenholz.

Keller T. und Desaulles A., 2001. Böden der Schweiz: Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990 – 1996). Umwelt-Materialien Nr. 139. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.

Knoche H., Brand P., Viereck-Götte L. und Böken H., 1999. Schwermetalltransfer Boden-Pflanzen. Texte 11/99. Forschungsbericht 10706001/20. Berlin: Umweltbundesamt.

Kühnholz O., 2001. Schwermetalle in der Ökobilanz landwirtschaftlicher Produktionssysteme. Zürich-Reckenholz: Agroscope FAL Reckenholz. Interner Bericht.

Menzi, H. und Kessler, J. 1998. Heavy metal content of manures in Switzerland. In: Martinez, J. und Maudet, M. N., eds. Proc. 8th International Conference on the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98); Rennes: 495-506.

Moolenaar S. W., Lexmond T. M. und van der Zee S. E. A. T. M., 1997. Calculating heavy metal accumulation in soil: a comparison of methods illustrated by a case-study on compost application. Agriculture, Ecosystems and Environment. 66: 71-82.

Moolenaar S. W. und Lexmond T. M., 1999. Heavy Metal Balance, Part I. Journal of Industrial Ecology; 2(4): 45-59.

Moolenaar S. W., 1999. Heavy Metal Balance, Part II. Journal of Industrial Ecology. 3(1): 41-53.

Mosimann T., Crole-Rees A., Maillard A., Neyroud J.-A., Thöni M., Musy A. & Rohr W., 1990. Bodenerosion im schweizerischen Mittelland - Erosion du sol sur le Plateau suisse. - Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes 'Nutzung des Bodens in der Schweiz', Liebefeld-Bern, 262 S.

Nemecek T., Frick C., Dubois D. und Gaillard G., 2001. Comparing farming systems at crop rotation level by LCA. In: Geerken, T.; Mattson, B.; Olsson, P., und Johansson, E., (eds.). Proceedings of the International Conference on LCA in Foods; Gothenburg. Gothenburg: SIK, VITO: 65-69. 168.

Nemecek T., Huguenin-Elie O., Dubois D. und Gaillard G., 2005. Ökobilanzierung von Anbausystemen im Schweizerischen Acker- und Futterbau. Schriftenreihe der FAL

58, Zürich: Agroscope FAL Reckenholz, 155 S.

Nottrodt A., Wandschneider J., Gutjahr M. und Chibiorz J. 2001. Technische Anforderungen und allgemeine Empfehlungen für die Entsorgung von Tiermehl und Tierfett in Verbrennungsanlagen. Berlin: Umweltbundesamt.

Oberholzer H.-R., Weisskopf P., Gaillard G., Weiss F. und Freiermuth R., 2006. Methode zur Beurteilung der Wirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Ökobilanzen – SALCA-SQ. Zürich-Reckenholz: Agroscope FAL Reckenholz. Verfügbar im Internet: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/control/bilanz/publ9905.pdf>.

Perkow W. und Ploss H., 1994. Wirksubstanzen der Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel. Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag.

Prasuhn V., 1991. Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura (Raum Anwil, BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. *Physiogeographica* 16, Basel, 372 S.

Prasuhn V. und Grünig K., 2001. Evaluation der Ökomassnahmen: Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. Schriftenreihe der FAL; 37. Zürich-Reckenholz: Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau.

Prasuhn V., 2006. Erfassung der PO₄-Austräge für die Ökobilanzierung – SALCA-Phosphor. Zürich-Reckenholz: Agroscope FAL Reckenholz. Verfügbar im Internet: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/control/bilanz/publ9905.pdf>

Puschenreiter M. und Horak O., 2000. Influence of different soil parameters on the transfer factor soil to plant of Cd, Cu and Zn for wheat and rye. *Die Bodenkultur* 51 (1): 3-10.

RAP, 1999. Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer. 4. überarb. Aufl. 327 S. Zollikofen, Landw. Lehrmittelzentrale.

RAP, 2004. Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Schweine. 3. überarb. Aufl. 328 S. Zollikofen, Landw. Lehrmittelzentrale.

Sauerbeck, D. und Lübben, S. 1991. Auswirkung von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen. *Berichte aus der Ökologischen Forschung*, Band 6. Jülich: Forschungszentrum Jülich.

Schultheiss U., Roth U., Döhler H. und Eckel H., 2004. Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Umweltbundesamt: Berlin. 130 S.

- Siegenthaler A., Häni H. und Stauffer W., 1999. Auswirkungen hoher Gaben von Klärschlamm und Schweinegülle. *Agrarforschung*. 6 (1): 25-28.
- StoV, 1986. Verordnung über Umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung, StoV). 3000 Bern: EDMZ. SR 814.013
- Souci S. W., Fachmann W., Kraut H. 2000. Die Zusammensetzung der Lebensmittel Nährwert-Tabellen. Stuttgart: Medpharm Scientific Publishers.
- Thöni L. und Seitler E., 2004. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990-2000. *Umwelt-Materialien* Nr. 180. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Tuchs Schmid M. P., 1995. Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine in der Schweiz. *Umwelt-Materialien* Nr. 32. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Universität Zürich, Institut für Veterinärpharmakologie und -toxikologie, 2004. CliniPharm/CliniTox: Ein computerunterstütztes Informationssystem für die Pharmakotherapie und klinische Toxikologie. Verfügbar auf dem Internet (Zugriff: April 04): http://www.vetpharm.unizh.ch/perldocs/index_x.htm
- UVEK, 2003. Düngen mit Klärschlamm wird verboten. Pressemitteilung, 26. März 2003
- von Steiger B. und Baccini P., 1990. Regionale Stoffbilanzierung von landwirtschaftlichen Böden mit messbarem Ein- und Austrag. Nationales Forschungsprogramm 22, Bericht 38: Boden.
- VBBö, 1998. Verordnung über Belastungen des Boden (VBBö). 3000 Bern: EDMZ. SR 814.12
- Walther, U; Ryser, J. P., und Flisch, R. 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2001. *Agrarforschung*. 8(6)
- Wolfensberger U. und Dinkel F., 1997. Beurteilung Nachwachsender Rohstoffe in der Schweiz in den Jahren 1993 – 1996: Vergleichende Betrachtung von Produkten aus ausgewählten NWR und entsprechenden konventionellen Produktion bezüglich Umweltwirkungen und Wirtschaftlichkeit. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft BLW.

9. Anhang

Tabelle 4: Vorkommen von Schwermetallen in verschiedenen Verordnungen. 1=Kompost, 2=Klärschlamm, 3=Mineraldünger, 4=Richtwert, 5=Prüfwert, 6=Sanierungswert, Werte in Klammern sind lösliche Gehalte, Werte aus NABO sind häufige Gehalte (80%) in mg/kg bzw. Richtwertüberschreitungen in [%].

	StoV (1986) [g/t TS]			VBo (1998) [mg/kg TS]			GSchV (1998)	FIV (1995)	FMBV (1999)	NABO	
	1	2	3	4	5	6	[mg/l]	[mg/kg]	[mg/kg 88% TS]	[mg/kg] ¹⁾	[%] ²⁾
Arsen (As)	---	---	---	---	---	---	---	0,1-1	---	---	---
Blei (Pb)	120	500	---	50	200	2000	0.01 (0.001)	0.01-1	10-40	24	19
Cadmium (Cd)	1	5	50 [g/tP]	0.8	2 (0,02)	30 (0,1)	$0.2 \cdot 10^{-3}$ ($0.05 \cdot 10^{-3}$)	0,005-5	1	0.23	9
Chrom (Cr)	100	500	2000	50	---	---	0.005 (0.002)	0.02 (VI)	---	25	3
Kobalt (Co)	---	60	---	---	---	---	---	---	---	5.7	<0.5
Kupfer (Cu)	100	600	---	40 (0,7)	150 (0-20)	1000 (4)	0.005 (0.002)	0,1-5	15-175	18	20
Molybdän (Mo)	---	20	---	5	---	---	---	---	---	---	---
Nickel (Ni)	30	80	---	50 (0,2)	---	---	0.01 (0.005)	0,1-0,2	---	22	3
Quecksilber (Hg)	100	5	---	0.5	---	---	$0.03 \cdot 10^{-3}$	0,2	---	0.1	3
Zink (Zn)	400	2000	---	150 (0,5)	---	2000 (5)	0.02 (0,005)	2-5	250	53	9
Vanadium (V)	---	---	4000	---	---	---	---	---	---	---	---
Fluor (F)	---	---	---	700 (20)	---	---	---	---	---	457	7
Selen (Se)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

¹⁾ Desaulles und Studer 1993.

²⁾ Keller und Desaulles 2001.

Tabelle 5 Totale (HNO₃-Extrakt) Schwermetallgehalte in verschieden genutzten Böden (Keller und Desaules 2001).

Nutzung	Dauerwiese				Ackerland				Intensivkultur			
	Anzahl Proben	10%-Quantil	Median	90%-Quantil	Anzahl Proben	10%-Quantil	Median	90%-Quantil	Anzahl Proben	10%-Quantil	Median	90%-Quantil
Cadmium	1'388	0.170	0.309	0.710	1'587	0.130	0.240	0.530	267	0.187	0.307	0.780
Kupfer	1'426	9.1	18.3	40.0	1'585	11.5	20.1	44.1	268	18.1	39.2	445.2
Zink	1'391	40.0	64.6	104	1'585	34.7	49.6	85	268	44.3	70.1	112
Blei	1'360	16.5	24.6	40.4	1'587	12.7	19.5	33.0	268	18.1	24.9	43.4
Nickel	1'341	10.8	22.3	39.6	1'526	14.4	23.0	40.2	268	14.8	24.8	40.1
Chrom	1'341	11.9	24.0	44.5	1'526	15.4	24.1	40.1	268	18.6	27.0	49.8
Quecksilber	743	0.040	0.088	0.160	649	0.036	0.073	0.140	206	0.045	0077	0.210

Tabelle 6: Erträge an Haupt- und Nebenprodukten bei der Pflanzenproduktion nach Walther et al. (2001).

Kultur	Ertrag					
	Hauptprodukte			Nebenprodukte		
	dt/ha	TS %	Produkt	dt/ha	TS %	Produkt
Winterweizen	60	85	Körner	75	85	Stroh
Sommerweizen	50	85	Körner	65	85	Stroh
Wintergerste	60	85	Körner	65	85	Stroh
Sommergerste	45	85	Körner	50	85	Stroh
Winterhafer	55	85	Körner	70	85	Stroh
Sommerhafer	55	85	Körner	70	85	Stroh
Winterroggen	55	85	Körner	75	85	Stroh
Winterkorn	50	85	Körner	75	85	Stroh
Korn (Dinkel)	50	85	Körner	75	85	Stroh
Wintertriticale	60	85	Körner	80	85	Stroh
Sommertriticale	55	85	Körner	75	85	Stroh
Emmer, Einkorn	25	85	Körner	45	85	Stroh
Körnermais Maiskolbensilage	80	85	Körner	95	85	Stängel
Silomais	160	100	Pflanze			
Grünmais	60	100	Pflanze			
Kartoffel (ausgereift)	450	22	Knollen	125	14	Stauden
Früh- und Saatkartoffel	250	18	Knollen	200	8	Stauden
Zuckerrüben	650	22	Rüben	500	15	Kraut
Futterrüben	160	100	Rüben	400	15	Kraut
Winterraps	35	90	Körner	65	85	Stängel
Sommerraps	25	90	Körner	45	85	Stängel
Sonnenblume	30	85	Körner	60	60	Stängel
Ölhanf	13	90	Körner	60	85	Stängel
Faserhanf	100	85	Stengel	40	90	Körner
Öllein	20	90	Körner	25	85	Stroh
Faserlein	45	85	Stengel	15	90	Körner
Chinaschilf	200	100	Pflanze			
Kenaf	50	100	Pflanze			
Eiweisserbsen	50	85	Körner	50	85	Stroh
Ackerbohnen	40	85	Körner	45	85	Stroh
Sojabohnen	25	85	Körner	25	85	Stroh
Süßlupinien	30	88	Körner	30	85	Stroh
Kabis	800	10	Köpfe	400	15	Strunk/Blatt
Rosenkohl	120	15	Rosen	140	15	Strunk/Blatt
Chicorée	400	30	Wurzel	300	10	Kraut
Karotten	600	12	Rüben	300	10	Kraut
Erbsen	65	18	Erbsen	300	22	Kraut
Bohnen	90	10	Bohnen	300	10	Kraut
Zwiebeln	500	13	Zwiebeln			
Spinat	120	8	Blätter	20	15	Stängel
Gründüngung (Leguminosen)	25	100	Pflanze			
andere Gründüngung	25	100	Pflanze			
Zwischenfrüchte	25	100	Pflanze			
Tabak Burley	25	100	Blätter	25	100	Stängel
Tabak Virginia	25	100	Blätter	25	100	Stängel

Tabelle 7: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in Futtermitteln und pflanzlichen Produkten in [mg/kg] Trockensubstanz.

Futtermittel [mg/kg TS]	n	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg	As	Co	Mo	Quellen
Gras / Heu	11	0.13	8.6	40	1.2	1.68	1.09	0.15	0.28	0.16	1.19	IPE94, NFP22, UBA 2004 (Pb)
Graspellets	5	0.1	13.9	36	1.7	6.8	1.7					UBA 2004
Körnermais	10	0.03	2.5	21.5	0.3	1.16	0.32	0	0.01	0.02	0.1	IPE94, NFP22
Maissilage	73	0.2	5	34.6	2	1	0.5					UBA 2004
Silomais	14	0.1	5	34.5	1.61	0.48	0.7	0.01	0.22	0.09	0.39	IPE94, IPE95, IPE96, IPE97, NFP22
Maiskleber	5	0.03	6.6	61.7	0.2	3.8	1.5					UBA 2004
CCM (Corn-Cob-Mix)	19	0.03	3.1	27.2	0.2	0.3	0.3					UBA 2004
Gersten-Erbсен-GPS1	11	0.1	5.4	21	0.5	0.5	1					UBA 2004
Getreidemischschrot	20	0.03	11.4	45	0.3	3	0.3					UBA 2004
Weizenschrot	6	0.1	4.8	45.6	0.2	0.2	0.4					UBA 2004
Weizenkleie	5	0.1	10.4	87	0.4	0.6	0.6					UBA 2004
Weizen	65	0.1	3.3	21.1	0.2	0.2	0.2					UBA 2004
Weizenkörner	15	0.15	5	45	0.16	0.3	0.3	0.01	0.22	0.03	0.44	IPE94
Weizenstroh	97	0.2	2.5	9.6	0.6	0.6	0.7					UBA 2004
Weizenstroh	4	0.21	4.15	12	2.85	0.34	0.35	0.06	0.17	0.06	0.51	NFP22
Gerste	14	0.03	4.3	26.6	0.2	0.1	0.1					UBA 2006
Gerstenkörner	6	0.08	6	44.5	0.41	0.39	0.37	0.06	0.17	0.02	0.81	IPE94
Gerstenstroh	8	0.13	5.1	13	2.9	0.41	0.42	0.1		0.07	0.33	NFP22
Gerstenstroh	16	0.1	4.8	11.1	0.6	0.8	1.2					UBA 2004
Triticale	31	0.1	4.3	28.4	0.2	0.2	0.1					UBA 2004
Triticalestroh	65	0.1	2.5	13.1	0.7	0.4	0.8					UBA 2004
Roggenstroh	20	0.1	3.2	13	0.4	0.7	0.5					UBA 2004
Hafer	10	0.1	4.8	29.1	0.2	0.7	0.4					UBA 2004
Biertreber	28	0.1	15	76.1	0.3	0.5	0.5					UBA 2004
Kartoffelschlempe	9	0.2	40.1	48.7	0.6	0.9	1.1					UBA 2004
Futterkartoffeln	26	0.1	3.8	12.9	0.3	0.2	0.3					UBA 2004
Kartoffeln	6	0.04	6.45	15	0.55	0.33	0.57	0.09	0.09	0.07	0.36	IPE94,NFP22
Kartoffelstärke	11	0.04	1.2	3.5	0.3	0.3	0.6					UBA 2004

Futtermittel [mg/kg TS]	n	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg	As	Co	Mo	Quellen
Kartoffelschalen	4	0.2	7.2	15.1	0.4	1	1.2					UBA 2004
Milchaustauscher	15	0.003	7.9	70.9	0.2	0.3	0.4					UBA 2004
Rapsextraktionsschrot	12	0.1	7.2	78.8	0.2	1.2	0.6					UBA 2004
Sojaextraktionsschrot	37	0.1	15.7	47.4	0.3	6.1	2.1					UBA 2004
Ackerbohnen	1	0.04	6	30.1	0.87	1.3	0.69	0	0.11	0.17	2.97	IPE94
Sojabohnen	1	0.06	15.1	47.7	0.08	5.32	0.52	0	0.05	0.16	1.11	IPE94
Erbsen	2	0.09	10	73	0.16	0.83	0.32	0.01	0.09	0.03	2.82	IPE94
Melasseschnitzel	10	0.3	8.1	31.7	3.1	4.3	2.2					UBA 2004
Zuckerrüben-Pressschnitzel	13	0.5	10.3	41.4	1.8	1.5	1.9					UBA 2004
Ergänzungsfutter, Milchkühe	35	0.1	31.4	176.1	0.9	3.9	2.4					UBA 2004
Mineralfutter Rind	70	0.4	747	3484	5.2	25.6	38.1					UBA 2004
Futterkalk	16	0.1	8.1	10.4	5.3	2.1	3.5					UBA 2004
Viehsalz	36	0.1	3.5	13.5	0.3	2	0.2					UBA 2004
Ergänzungsfutter Saugferkel	9	0.1	120	221	0.3	1.9	1.7					UBA 2004
Ergänzungsf. Aufzuchtferkel	16	0.1	139	177	0.4	2.2	1.6					UBA 2004
Alleinfutter Vormast	5	0.1	66	236	0.2	1.6	1.7					UBA 2004
Alleinfutter Endmast	28	0.1	30.2	158	0.3	1.6	1.5					UBA 2004
Alleinfutter Sauen	20	0.1	42	189	0.5	1.5	1.3					UBA 2004
Mineralfutter Ferkel	3	0.3	3133	3648	6.9	11.6	24					UBA 2004
Mineralfutter Mastschweine	2	0.8	818	4812	3.7	16.6	17.8					UBA 2004
Mineralfutter Sauen	4	1.6	734	2361	3.6	14.3	55					UBA 2004
Fischmehl	4	0.4	4.3	89.6	0.8	1.6	1.5					UBA 2004
Ferkelfutter (IP)			100	200								UBA 2004
Ferkelfutter (Bio)			6	95								Futtermittelliste Biolandbau 01/02
Mast-/Zuchtschweinefutter (IP)			25	100								RAP, C. Chaubert (pers. Mitt. 1999)
Mast-/Zuchtschweinefutter (Bio)			5	80								Futtermittelliste Biolandbau 01/02
Leghennen	13	0.06	14.6	119	0.7	3.5	3.8					UBA 2004
Pouletmast	4	0.03	40.2	123	<0.2	1.1	0.9					UBA 2004
Truthahnmast	30	0.1	29.9	80	0.5	1.5	1.3					UBA 2004

IPE94: (Houba und Uittenbogaard 1994)

IPE95: (Houba und Uittenbogaard 1995)

IPE96: (Houba und Uittenbogaard 1996)

IPE97: (Houba und Uittenbogaard 1997)

NFP22: (von Steiger und Baccini 1990)

UBA 2004: (Schultheiss *et al.* 2004)

Tabelle 8: Schwermetallgehalte in Hilfsstoffen der Tierproduktion (Schultheiss *et al.* 2004)

Hilfsstoffe	n	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zi
		mg/kg TS					
Weizenstroh	97	0,2	0,7	2,5	0,6	0,6	9,6
Gerstenstroh	16	0,1	1,2	4,8	0,8	0,6	11,1
Triticalestroh	65	0,1	0,8	2,5	0,4	0,7	13,1
Roggenstroh	20	0,1	0,5	3,2	0,7	0,4	13,0
Sägemehl	18	0,2	1,0	3,0	2,4	1,9	21,3
Kupfervitriol, Salz	4	0,7	0,9	275155	536,4	65,3	103,5
Kupfervitriol, Lösung	15	0,3	3,0	203267	334,3	5,3	87,0

Tabelle 9: Inhaltsstoffe in Pflanzenschutzmitteln berechnet nach Perkow und Ploss (1994)¹⁾. Weitere Angaben nach FAW (2000)

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

Tabelle 10: Durchschnittliche Schwermetallgehalte von Mineraldüngern (Desaules and Studer 1993)

	Cd mg/kg Nährstoff	Cu mg/kg Nährstoff	Zn mg/kg Nährstoff	Pb mg/kg Nährstoff	Ni mg/kg Nährstoff	Cr mg/kg Nährstoff
Mineralische Dünger						
Harnstoff (46/0/0) kg N	0.11	13.04	95.65	2.39	4.35	4.35
Kalkstickstoff (20/0/0) kg N	0.25	60.00	155.00	5.50	90.00	10.00
Ammonsalpeter (27.5/0/0) kg N	0.18	25.45	181.82	6.91	47.27	14.55
Ammonsulfat (21/0/0) kg N	0.24	19.05	142.86	5.24	8.57	9.52
Kalk-Ammonsalpeter (27/0/0) kg N	0.19	8.52	100.00	5.93	12.59	2.96
Ammonsalpeter-Mg (23/0/0/5) kg N	0.43	56.52	4.35	4.35	21.74	6.09
<i>Generisches Mittel N</i>	<i>0.21</i>	<i>22.25</i>	<i>121.43</i>	<i>5.37</i>	<i>17.17</i>	<i>7.81</i>
Triple-Superphosphat (0/46/0) kg P ₂ O ₅	113.04	97.83	650.00	7.61	95.65	567.39
Superphosphat (0/19/0) kg P ₂ O ₅	52.63	121.05	852.63	578.95	105.26	342.11
Thomasmehl (0/16/0) kg P ₂ O ₅	1.56	250.00	425.00	75.00	125.00	12212.50
Hyperphosphat (0/26/0) (Roh) kg P ₂ O ₅	50.00	115.38	915.38	23.85	76.92	611.54
<i>Generisches Mittel P</i>	<i>51.32</i>	<i>118.22</i>	<i>751.32</i>	<i>49.42</i>	<i>100.46</i>	<i>589.46</i>
Kalisalz (KCl) (0/0/60) kg K ₂ O	0.10	8.33	76.67	9.17	3.50	3.33
Kalisulfat (0/0/50) kg K ₂ O	0.10	4.00	64.00	6.60	1.60	4.00
Patentkali (0/0/26/5) kg K ₂ O	0.19	173.08	153.85	11.54	11.54	173.08
Kalk kg CaO	0.12	4.00	8.00	3.60	12.20	314.00
<i>Generisches Mittel K</i>	<i>0.11</i>	<i>6.17</i>	<i>70.33</i>	<i>7.88</i>	<i>7.52</i>	<i>88.54</i>

Bemerkung:

Harnstoff-Ammoniumnitrat und Ammoniumnitrat-Phosphat (als N) werden wie Ammoniumnitrat gerechnet. Ammoniumnitrat-Phosphat (als P₂O₅) wird als Triple-Superphosphat gerechnet. Kaliumsulfat wird wie Kaliumchlorid gerechnet, Magnesium wie Kalk.

Tabelle 11: Medianwerte des Cu-, Zn-, Cd- und Pb Gehaltes in verschiedenen Wirtschaftsdüngertypen aus Menzi und Kessler (1998) (Cd, Cu, Zn, Pb) und Desaules und Studer (1993) (Cr, Ni, Hg).

Wirtschaftsdünger [mg/kg TS]	TS- Gehalt [%]	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Rindvieh Vollgülle	9 %	0,178	37,1	162,2	3,77	4,3	3,9	0,4
Rindvieh kotarme Gülle	7,5 %	0,16	19,1	123,3	2,92	3,1	2,1	0,6
Rindvieh Stapelmist ¹⁾	19 %	0,172	23,9	117,7	3,77	4,3	3,9	0,4
Rindvieh Laufstallmist ¹⁾	21 %	0,151	22	91,1	2,81	4,3	3,9	0,4
Schweine Gülle (Vollgülle)	5 %	0,21	115,3	746,5	1,76	8,6	6,7	0,8
Schweine Mist ¹⁾	27 %	0,21	115,3	746,5	1,76	8,6	6,7	0,8
Mastpoulets Mist ¹⁾	65 %	0,292	43,8	349,2	2,92	40	10	0,2
Legehennen Kot	30 %	0,2525	39,6	468,4	2,235	7,9	5,5	0,2
Legehennen Mist ¹⁾	45 %	0,2525	39,6	468,4	2,235	7,9	5,5	0,2

¹⁾ in kg/m³

Tabelle 12: Schwermetallgehalte [g/t TS] von Kompost (Candinas *et al.* 1999b) und Klärschlamm (Candinas *et al.* 1999a und Herter und Külling 2001) sowie durchschnittliche Nährstoffgehalte in [kg/t TS]

	Nährstoffe			Schwermetalle								
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Hg	Mo	Co
Kompost	10,0	9,2	3,6	57,7	183,5	0,36	49	16,3	22,3	0,12		
Klärschlamm	17,0	54,1	4,4	341	929	1,7	94	32	74	1,7	5,8	10

Mittlere Trockensubstanzgehalt von Klärschlamm (Herter 2000):

Flüssig: 6 % TS

Entwässert, gekalkt: 40 % TS

Kompostiert: 29% TS

Getrocknet 93 % TS

Tabelle 13: Mittlere Nährstoff- [kg/tTS] und Schwermetallgehalte [g/tTS] in diversen Abfällen nach Nottrodt (2001) und Herter und Külling (2001)

	N	P	K	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn
Tierische Abfälle												
Tiermehl				0,6		5,9	208	0,6		34	3,8	125,0
Fleischmehl	90	30	5	0,0	0,4	1,9	11,0			2,0	2,0	116,0
Hornmehl	137	10	5	0,2	0,4	65,0	7,3	0,1		2,8	8,3	135,3
Knochenmehl	45	85	5	0,2	0,2	251,3	22,3	0,0		12,1	5,9	100,0
Panseninhalt	13	2	8	1,6		6,0	15,2	0,0		5,2	5,8	75,9
Pflanzliche Abfälle												
Gemüse / Obstbrei	19	4	21	0,2		2,9	22,6	0,0		2,5	2,8	62,0
Obsttrester	13	2	8	0,1		6,0	15,2	0,1		21,0	1,9	27,5
Traubentrester	20	6	23	0,2		3,1	65,0	0,0		1,9	2,1	53,7
Pilzmycel	44	6	8			10,3	10,1			3,2	6,9	25,9
Grünguthäcksel	11	2	10	0,3		14,7	14,0	0,1		10,0	20,0	71,0
Holzhäcksel	7	1	5	0,5		12,0	11,9	0,7		5,3	22,0	106,8
Diverse												
Deinkingschlamm (Papierindustrie)	10	2	1	0,3		99,3	177,0	0,2		47,0	58,0	314,0
Papierschlamm (nicht näher definiert)	8	2	1	0,7	1,0	24,6	84,9	0,1		13,6	47,4	261,2
Rückstandskalk Wasseraufbereitung	1	1	1	0,4		92,7	21,5	0,4		34,5	38,3	82,6
Teichschlamm	2	1	2	0,6		25,8	30,8	0,2		11,8	38,4	188,2

Tabelle 14: Mittlere Nährstoff- [kg/tTS] und Schwermetallgehalte [g/tTS] in Holzaschen (Herter und Külling 2001)

Holzasche	N	P	K	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn
Rostaschen von:												
Naturbelassenem, stückigem Holz		8	75	1,1	10,0	29,0	376,3	0,5	7,3	36,5	39,9	522,0
Naturbelassenem, nicht stückigem Holz (Schnitzel)		10	62	2,7	11,7	38,2	129,6	0,5	3,2	49,5	8,3	304,3
Restholz (Schnitzel)		2	49	0,5	16,7	216,7	86,7	0,5	7,0	136,7	10,0	136,7
Rinde		8	35	0,8	13,6	39,5	65,2		1,1	61,5	9,9	183,1
Hackgut mit Rinde		16	51	0,3	8,7	26,8	87,7		0,7	45,3	6,6	81,0
von Sägespänen		12	67	0,6	11,8	112,9	159,0		1,2	56,0	3,4	369,7
Zyklonaschen von:												
naturbelassenem Schnitzelholz		10	65	9,4	12,5	42,7	133,7	0,5	6,6	48,0	21,0	745,4
Restholz (Schnitzel)		6	62	15,6	17,8	211,8	226,0	0,7	9,6	60,6	1181,8	3655,5
Rinde		8	45	16,5	12,8	41,8	80,5		2,7	68,6	50,8	2596,8
Hackgut mit Rinde		13	80	23,6	7,4	38,1	126,2		2,2	40,6	87,1	1906,5
Sägespäne		10	62	17,9	8,8	36,9	127,7		2,5	43,1	37,9	1532,7
Holzaschen (nicht näher definiert)	1,2	8,2	33,1	12,2	20,2	77,4	96,0	0,1		64,6	510,9	2475,6

Tabelle 15: Durchschnittliche Gewichtsanteile verschiedener Erzeugnisse vom Schwein und Rind nach Nottrodt et al. (2001)

Produkt	Schwein (90 kg)	Rind (400 kg)
Fleisch	64 %	40 %
Essbare Innereien (Zunge, Herz, Nieren etc.)	20 %	39 %
Ungenießbare Bestandteile (Knochen, Fell, Fett etc.)	10 %	5 %
Blut	3 %	3 %
Diverses	2 %	13 %

Tabelle 16: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in tierischen Erzeugnissen. Wo nicht anders vermerkt sind die Angaben in mg/kg Frischgewicht (¹Souci *et al.* 2000; ²Schultheiss *et al.* 2004; ³Heiz 2004)

Erzeugnis	Cd [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Hg [mg/kg]
Schaf (Muskelfleisch)	0,0005 ³	0,9 ¹	23 ¹	0,0065 ³	0,02 ¹	0,04 ¹	
Schaf (Niere)	0,1570 ³	3,52 ¹	22 ¹	0,0772 ³			
Schaf (Leber)	0,0464 ³	76 ¹	44 ¹	0,0977 ³	0,26 ¹		
Kalb (Muskelfleisch)	0,0001 ³	1,6 ¹	30 ¹	0,0007 ³	0,035 ¹		
Kalb (Niere)	0,0936 ³	3,7 ¹	18 ¹	0,1337 ³			
Kalb (Leber)	0,0125 ³	55 ¹	84 ¹	0,0708 ³	0,064 ¹		
Rind (Muskelfleisch)	0,0001 ³	0,87 ¹	43 ¹	0,0049 ³	0,058 ¹	0,053 ¹	
Rind (Niere)	0,1727 ³	4,34 ¹	21 ¹	0,0891 ³	0,015 ¹	0,02 ¹	
Rind (Leber)	0,0381 ³	32 ¹	48 ¹	0,0478 ³	0,19 ¹	0,049 ¹	
Milchkuh / Mastrind (Tierkörper) (mg/kg TS)	0,03 ²	6 ²	81 ²	0,4 ²	0,9 ²	0,3 ²	
Schwein (Muskelfleisch)	0,0002 ³	0,87 ¹	24 ¹	0,0027 ³	0,051 ¹	0,029 ¹	
Schwein (Niere)	0,1842 ³	7,74 ¹	27 ¹	0,0095 ³	0,072 ¹	0,01 ¹	
Schwein (Leber)	0,0329 ³	13 ¹	65 ¹	0,0093 ³	0,067 ¹	0,038 ¹	
Mastschwein (Tierkörper) (mg/kg TS)	0,04 ²	3,7 ²	56 ²	0,4 ²	0,7 ²	0,2 ²	
Huhn (Durchschnitt)		0,42 ¹	9,96 ¹		0,036 ¹	0,03 ¹	
Leghennen (Tierkörper) (mg/kg TS)	0,03 ²	5 ²	60 ²	0,1 ²	0,1 ²	0,1 ²	
Ei (Gesamtei-Inhalt)		0,65 ¹	1,3 ¹		0,091 ¹	0,025 ¹	
Milch (mg/kg TS)	0,01 ²	2,3 ²	17,6 ²	0,3 ²	1,1 ²	0,1 ²	