Schriftenreihe der FAL / Les cahiers de la FAL 54

SCHWERMETALLBILANZEN VON LANDWIRTSCHAFTS-PARZELLEN DER NATIONALEN BODENBEOBACHTUNG

NABO – Nationales Bodenbeobachtungsnetz der Schweiz

Armin Keller, Nicolas Rossier und André Desaules

NABO

agroscope
FAL RECKENHOLZ
Forschung für Landwirtschaft und Natur

Die Studie wurde durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) mitfinanziert.
Der Anhang sowie eine französische Fassung dieser Schriftenreihe ist unter der URL www.nabo.admin.ch verfügbar.

Impressum

ISSN	1421-4393 Schriftenreihe der FAL
ISBN	3-905608-76-6
Herausgeberin	Agroscope FAL Reckenholz Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich Tel. +41 (0)1 377 71 11, Fax +41 (0)1 377 72 01 info@fal.admin.ch www.reckenholz.ch
Redaktion	Gregor Klaus, CH-4467 Rothenfluh; Denise Tschamper, Agroscope FAL Reckenholz
Gestaltung	i.t. desktop, Iris Turke, CH-9506 Lommis; Ursus Kaufmann, FAL
Preis	CHF 30.00 / € 20.00; inkl. MWSt
Copyright	by FAL 2005

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 2

Zusammenfassung 3
Résumé 5
Summary 7

1 Einleitung 9

2 Bilanzierungsmethode 11
2.1 Bilanzraum 12
2.1.1 Systemgrenze NABO Parzelle 12
2.1.2 Betriebstypen und Nutzungsklassen 13
2.1.3 Parzellen und Kulturen 15
2.2 Bilanzierungsdaten 17
2.2.1 Atmosphärische Deposition 17
2.2.2 Landwirtschaftliche Hilfsstoffe 19
2.2.3 Erntegut 21
2.2.4 Düngungsregime 21
2.3 Unsicherheitsanalyse 22
2.3.1 Stoffbilanzen und Unsicherheiten 22
2.3.2 Bestimmung von unsicheren Bilanzgrössen 23
2.3.3 Simulation 25
2.3.4 Unsicherheitsanteile 25
2.4 Grafische Aufbereitung 26

3 Ergebnisse 28
3.1 Stoffbilanzen der NABO-Parzellen nach Betriebstyp 28
3.1.1 Cadmium 28
3.1.2 Blei 30
3.1.3 Kupfer 32
3.1.4 Zink 34
3.1.5 Düngung und Stoffbilanzen 36
3.2 Stoffbilanzen der NABO-Parzellen nach Kulturtyp 36
3.2.1 Cadmium 38
3.2.2 Blei 40
3.2.3 Kupfer 42
3.2.4 Zink 44

4 Diskussion 46

5 Schlussfolgerungen und Ausblick 50

6 Literatur 52

Abkürzungen und Symbole 55

Anhang 56
unter der URL www.nabo.admin.ch verfügbar

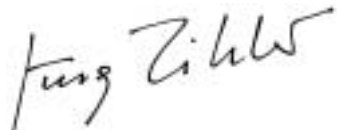
Vorwort

Schadstoffbelastungen im Boden frühzeitig zu erkennen und zu prognostizieren ist eines der wesentlichen Ziele der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO). In diesem Referenznetz werden seit 1985 periodisch Schadstoffbelastungen im Boden gemessen. Zu Beginn der Messungen wurde noch vermutet, dass die zeitliche Dynamik von Schwermetallgehalten in Böden eher gering sei. Doch nach einem Jahrzehnt wurden für einzelne Elemente bereits beachtliche Veränderungen der Schadstoffgehalte gemessen.

Der anthropogen verursachte Anteil dieser Veränderungen kann mit der Bilanzierung der stofflichen Ein- und Austräge ermittelt werden. Darüber hinaus liefern Stoffbilanzen Erkenntnisse zur Beurteilung der Nachhaltigkeit gegenwärtiger Landnutzungen und unterstützen die Umsetzung geeigneter Massnahmen zur Vermeidung von Schadstoffakkumulationen in Böden. Solche Massnahmen haben insbesondere den umweltgerechten Einsatz von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen wie Hof-, Mineral- und Abfalldünger sowie Pflanzenschutzmittel zum Ziel. Die Stoffbilanzierung stellt somit ein wichtiges Instrument des vorsorgenden Bodenschutzes dar.

Obwohl die Methode der Stoffbilanzierung sehr verbreitet ist und eine lange Tradition hat, sind ihrer praktischen Umsetzung nach wie vor enge Grenzen gesetzt. Die Aussagekraft von Bilanzierungen kann aus verschiedenen Gründen erheblich geschmälert werden. Dazu gehören die Beurteilung verfügbarer Daten über Schadstoffgehalte, die Auswahl von Berechnungsmethoden von Ein- und Austrägen, die zeitliche und räumliche Abgrenzung des Bilanzraums und der Umgang mit Variation und Unsicherheit bei den Stoffdaten. Der vorliegende Bericht liefert diesbezüglich methodische Grundlagen und erörtert die Zuverlässigkeit und Prognosesicherheit der Stoffbilanzen im NABO-Messnetz. Für 48 landwirtschaftlich genutzte NABO-Parzellen werden Stoffbilanzen der Jahre 1996 bis 2001 dokumentiert und diskutiert. Wir danken den Autoren und allen, die zum Gelingen dieses Berichts beigetragen haben, ganz herzlich.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)



J. Zihler
Chef Sektion Boden und allgemeine Biologie

Agroscope FAL Reckenholz

M. Winzeler
Leiter Forschungsbereich Öko-Controlling

Zusammenfassung

Mit der Stoffbilanzierung landwirtschaftlich genutzter Böden können frühzeitig Schadstoffanreicherungen erkannt und die Ursachen von gemessenen Veränderungen der Schadstoffkonzentrationen im Boden analysiert werden. In diesem Kontext wurden für 48 landwirtschaftlich genutzte Messparzellen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) für die Jahre 1996 bis 2001 Bilanzen für Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Blei (Pb) und Zink (Zn) mit einer stochastischen Bilanzierungsmethode berechnet, welche Unsicherheiten der Bilanzdaten sowie die räumliche und zeitliche Variation von Bilanzgrössen berücksichtigt. Die Stoffbilanzen wurden zum einen auf die Parzelle, zum anderen auf die Kulturen bezogen.

Berücksichtigt wurden Einträge über Hof-, Mineral- und Abfalldünger, Pflanzenschutzmittel und atmosphärische Deposition sowie Austräge über das Erntegut. Die Mengenangaben der Hilfsstoffe und des Ernteguts wurden jährlich parzellenscharf erfasst. Die Stoffkonzentrationen wurden aus zahlreichen Studien und Literaturangaben entnommen, welche sich überwiegend auf die Schweiz beziehen. Die atmosphärischen Depositionsdaten der Standorte wurden aus dem Moosmonitoring der Schweiz hergeleitet. Mehrheitlich wurden die Parzellen von «kombinierten Veredlungsbetrieben» sowie von «kombinierten Betrieben mit Schwerpunkt Verkehrsmilch und Ackerbau» bewirtschaftet. Im Bilanzzeitraum wurden 30 Parzellen ackerbaulich, zehn Parzellen als Wiesen und Weiden und acht Parzellen für Spezialkulturen genutzt.

Für Cd waren die parzellenbezogenen Stoffbilanzen mehrheitlich ausgeglichen. Die Cd-Nettofluxe lagen im Bereich von –1,1 bis 6,2 g/ha und Jahr. Cd-Nettofluxe grösser als 2,0 g/ha und Jahr wurden allerdings lediglich für einige Parzellen mit vermehrten Mineraldüngergaben festgestellt. Zwischen den Betriebstypen waren die Unterschiede der parzellenbezogenen Cd-Bilanzen gering. Die kulturspezifischen Cd-Bilanzen wiesen aber starke Unterschiede auf.

Der Pb-Nettoflux der Parzellen variierte zwischen –10,5 und 81,5 g/ha und Jahr. Der Pb-Eintrag wurde vor allem vom atmosphärischen Eintrag bestimmt und weniger von der betriebsspezifischen Nutzung. Pb-Nettofluxe von mehr als 40 g/ha und Jahr waren auf drei Parzellen mit Klärschlammgaben zu verzeichnen.

Für drei Rebbauparzellen resultierte durch die regelmässige Anwendung von Cu-haltigen Pflanzenschutzmitteln Cu-Nettofluxe von 1472 bis 2174 g/ha und Jahr. Ausser bei den Spezialkulturen hing sowohl der Cu-Eintrag als auch der Zn-Eintrag im Wesentlichen vom Tierbesatz der Betriebe ab, da Cu und Zn bedeutende Makroelemente in Futtermittelzusatzstoffen für die Tierhaltung sind. Für Betriebe mit mittlerem bis hohem Tierbesatz pro landwirtschaftlicher Nutzfläche wurden erhöhte Cu-Nettofluxe zwischen 101 und 279 g/ha und Jahr und Zn-Nettofluxe zwischen 370 und 952 g/ha und Jahr festgestellt. Für eine intensiv genutzte Wiese eines Veredlungsbetriebs lag der Zn-Nettoflux bei 1540 g/ha und Jahr. In diesen Fällen wurde der Cu- und Zn-Eintrag nahezu vollständig durch Hofdünger bestimmt.

Um die Relevanz der Stoffbilanzen für eine Stoffanreicherung im Boden beurteilen zu können, wurden diese in Akkumulationsraten im Oberboden für ein Jahrzehnt umgerechnet. Die Akkumulationsraten lagen für 11 (Cu), 9 (Cd) und 20 (Zn) der 48 NABO-Parzellen im Bereich von 1% und grösser des jeweiligen Richtwerts in einem Jahrzehnt. Insgesamt wiesen 60% der Parzellen Akkumulationsraten von >1% des jeweiligen Richtwerts innerhalb eines Jahrzehnts für Cu, Zn oder Cd auf. Dieser Befund deutet auf schleichende Anreicherungen dieser Stoffe im Oberboden hin. Die Ergebnisse befürworten insbesondere eine langfristige Bodenbeobachtung der Parzellen von «kombinierten Veredlungsbetrieben», «Verkehrsmilchbetrieben» sowie von «kombinierten Verkehrsmilch-Ackerbaubetrieben» und Spezialkulturen. Für Pb lagen die Akkumulationsraten für alle Parzellen unterhalb 1% des Richtwerts in einem Jahrzehnt, was unter anderem auf die Einführung des bleifreien Benzins zurückzuführen ist.

In dieser Studie wurde auch die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen mit Hilfe der stochastischen Methode bestimmt. Die Zuverlässigkeit war in erster Linie von der Unsicherheit der Konzentrationsdaten der landwirtschaftlichen Hilfsstoffe abhängig und weniger von der Unsicherheit der erfassten Mengenangaben. Insgesamt streuten die parzellenbezogenen Nettofluxe für Zn, Cu und Pb aufgrund der verfügbaren Bilanzdaten und deren Qualität um etwa die Hälfte und die Cd-Nettofluxe zu drei Viertel um ihren Mittelwert.

Je nach Bewirtschaftung, Betriebstyp, Kultur und Element waren die Nettofluxe unterschiedlich sensitiv auf die definierten unsicheren Bilanzgrössen. Die Unsicherheit der atmosphärischen Deposition und der Schwermetallkonzentrationen in den Pflanzen trug generell zu der Unsicherheit der Cd- und Pb-Nettofluxe bei, während die Streuung der Cu- und Zn-Nettofluxe im Wesentlichen durch unsichere Messdaten für spezifische Hofdüngertypen und Konzentrationen in den Pflanzen verursacht wurde.

Mit der stochastischen Bilanzierungsmethode steht ein Instrument für den vorsorgenden Bodenschutz zur Verfügung mit dem betriebs- und nutzungsspezifische Massnahmen zur Verringerung von Schadstoffeinträgen in Böden abgeleitet werden können. Anhand von Nutzungsszenarien können zudem geeignete Handlungsoptionen für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung gefunden werden.

Résumé

Bilans des métaux lourds sur les parcelles agricoles du réseau national d'observation des sols en Suisse

L'établissement d'un bilan de matière dans les sols à utilisation agricole permet de détecter rapidement une accumulation de substances nocives et d'analyser les causes de variations significatives des concentrations de telles substances dans le sol. Dans ce contexte, 48 parcelles agricoles du réseau national d'observation des sols (NABO) ont fait l'objet d'un bilan de cadmium (Cd), de cuivre (Cu), de plomb (Pb) et de zinc (Zn) pour les années 1996 à 2001. Une méthode stochastique d'établissement de bilan, tenant compte des incertitudes liées aux données et aux variations spatiales et temporelles des mesures du bilan, a été utilisée. Les bilans de matières ont été mis en relation avec les parcelles d'une part et avec les cultures d'autre part.

On a tenu compte des flux entrants par engrais de ferme, engrais minéraux et engrais à base de déchets, par produits phytosanitaires et par dépositions atmosphériques et des flux sortants par les récoltes. Les quantités de matières auxiliaires et les teneurs des cultures ont été déterminées chaque année pour chaque parcelle. Les concentrations de matières sont issues de multiples études et publications, en majorité relatives à la Suisse. Les données de dépositions atmosphériques locales sont issues du système de monitoring des mousses en Suisse. Les parcelles sont dans leur majorité situées dans des exploitations de type «combiné transformation» ou des exploitations «combinées avec prédominance de production de lait commercialisé et de grandes cultures». Pendant la période du bilan, 30 parcelles étaient occupées par des grandes cultures, 10 parcelles par des pâturages et prairies, 8 parcelles par des cultures spéciales.

Pour le cadmium, les bilans de matière par parcelle étaient en majorité équilibrés. Les flux nets de Cd se situaient entre –1,1 et 6,2 g/ha et par an. Des flux supérieurs à 2,0 g/ha ont en fait été mesurés uniquement sur quelques parcelles recevant plus d'engrais minéraux. Les différences de bilans de Cd par parcelle entre exploitations de différents types étaient faibles. Par contre les différences de bilans entre cultures étaient importantes.

Les flux nets de Pb des parcelles variaient de –10,5 à 81,5 g/ha et par an. Les flux entrants provenaient essentiellement d'apports atmosphériques et peu de l'utilisation spécifique de la parcelle par l'exploitation. Les flux nets supérieurs à 40 g/ha et par an ont été observés sur trois parcelles recevant des boues d'épuration.

Trois parcelles de vignes ont présenté des flux de cuivre de 1472 à 2174 g/ha et par an, résultant d'une utilisation régulière de produits phytosanitaires contenant du cuivre. En dehors de cultures spéciales, les teneurs en Cu comme en Zn dépendent essentiellement de la charge en bétail sur l'exploitation, le Cu et le Zn étant des macro-éléments significatifs des additifs alimentaires destinés aux bétail. Sur les exploitations avec une charge en bétail moyenne à élevée par rapport à la surface agricole utile, on a mesuré des flux nets supérieurs en Cu (entre 101 et 279 g/ha et par an) et en Zn (entre 370 et 952 g/ha et par an). Un flux net de Zn de 1540 g/ha et par an a été mesuré sur une pairie d'utilisation intensive dans une exploitation de type combiné transformation. Dans ces cas, les flux entrants de Cu et de Zn étaient dus quasi intégralement à l'utilisation d'engrais de ferme.

Afin d'évaluer la pertinence des bilans de matière pour évaluer l'accumulation de substances dans les sols, nous avons calculé les taux d'accumulation dans la couche arable du sol sur une période de 10 ans. Pour 11 (Cu), 9 (Cd) et 20 (Zn) des 48 parcelles NABO, les taux d'accumulation se situent autour de 1% ou plus des valeurs indicatives respectives pour une décennie. Dans l'ensemble, 60% des parcelles montrent des taux d'accumulation > 1% des valeurs indicatives respectives pour le Cu, le Zn ou le Cd en l'espace de 10 ans. Ceci indique une accumulation sournoise de ces substances dans la couche arable du sol. Ces résultats

militent en faveur d'une surveillance à long terme des parcelles des exploitations de type «combiné transformation», de «production de lait commercialisé», de type «combiné production laitière et grandes cultures» et de cultures spéciales. Pour le plomb, les taux d'accumulation de toutes les parcelles se situent à moins de 1% de la valeur indicative pour une décennie, ce qui s'explique notamment par l'introduction de l'essence sans plomb.

L'étude a également déterminé la fiabilité des bilans de matière au moyen de la méthode stochastique. Cette fiabilité dépendait avant tout des incertitudes sur les concentrations des produits auxiliaires agricoles, plus que des incertitudes sur les quantités mesurées. Dans l'ensemble, sur la base des données de bilan disponibles et leur qualité, les flux nets par parcelle pour le Zn, le Cu et le Pb variaient d'environ 50% autour de leur moyenne. Pour le Cd, cette variation était d'environ 75%.

Selon le mode de culture, le type d'exploitation, la culture et l'élément, les flux nets se sont avérés plus ou moins sensibles aux facteurs du bilan définis comme incertains. Les facteurs d'incertitude liés aux dépôts atmosphériques et aux teneurs dans les plantes contribuent d'une façon générale aux incertitudes sur les flux nets de Cd et de Pb. La variabilité des flux nets de Cu et de Zn est liée avant tout à l'incertitude des mesures sur les engrais de ferme et des teneurs dans les plantes.

La méthode stochastique des bilans est un instrument qui permet de prévoir une protection des sols par la mise en place de mesures spécifiques à l'exploitation ou à l'utilisation du sol, dans le but de réduire les apports en substances nocives. Des scénarios d'utilisation peuvent de surcroît permettre d'identifier des options d'actions en faveur d'une utilisation agricole durable des sols.

Le présent rapport est également disponible en français sous www.nabo.admin.ch > Bibliographie no 129 (PDF).

Summary

Heavy-metal balances of agricultural soil monitoring sites
NABO – Swiss Soil Monitoring Network

Element balances of agricultural soils provide to detect accumulation of soil pollutants at an early stage and to identify the origin of measured temporal changes of pollutants in soil. In this context, we calculated balances for cadmium (Cd), copper (Cu), lead (Pb) and zinc (Zn) for 48 agricultural sites of the Swiss Soil Monitoring Network (NABO) for the period 1996 to 2001. We applied a stochastic balance method that takes data uncertainty and spatial and temporal variation of model input parameters into account. Site-specific as well as crop-specific element balances were calculated.

The balance approach used considered inputs by animal manure, mineral and waste fertilizer, pesticides and atmospheric deposition as well as outputs by crops. For each site the data for the amounts of the fertilizers and harvest were gathered annually. Concentration data of the agricultural goods were taken from numerous literature and investigations that refer predominantly to Swiss studies. Atmospheric deposition rates were derived from the Swiss moss monitoring. The majority of the sites were cultivated by mixed farms focusing either on animal husbandry or dairy and arable farming. About two third of the sites were arable land, ten sites were permanent grassland and eight sites were used for special crops.

The majority of the site-specific Cd inputs and outputs were nearly balanced. The net Cd fluxes ranged between –1,1 and 6,2 g/ha year. Net Cd fluxes larger than 2 g/ha year were only found for sites that received augmented amounts of mineral fertilizers. The differences of the Cd-balances between the farm types were small, but large between the crop types.

The net Pb flux of the sites ranged between –10,5 and 81,5 g/ha year. The Pb inputs were mainly determined by atmospheric deposition and less by the farm-specific land use. Net Pb fluxes larger than 40 g/ha year occurred at three sites that received sewage sludge.

For three vineyards net Cu fluxes between 1472 and 2174 g/ha year were found. These large Cu inputs resulted from regular application of pesticides containing Cu. Besides the special crops Cu-inputs as well as Zn-inputs were mainly influenced by the livestock density of the farms. These elements are important for animal health and animal grow rates, and thus, are supplemented in feed additives. For farm types with medium and high animal density per agricultural land we found net Cu fluxes between 101 and 279 g/ha year and net Zn fluxes between 370 and 952 g/ha year. One intensive grassland site of a animal husbandry farm showed a net Zn flux of 1540 g/ha year. For these sites the inputs of Cu and Zn were almost completely caused by animal manure.

To assess the relevance of the element balances we transformed them into accumulation rates of the top soil for one decade. Increasing soil concentrations of 1% and larger of the Swiss guide value within one decade were predicted at 11 (Cu), 9 (Cd) and 20 (Zn) of the 48 NABO-sites. In total, for 60% of the sites accumulation rates >1% of the Swiss guide values within one decade were found for Cu, Cd or Zn. These findings indicate a slow but meaningful accumulation of these elements in the top soil. The results suggest among others to monitor the soils of husbandry farms, intensive dairy farms, mixed farms and special crops in the long term. The accumulation rates for Pb were less than 1% of the Swiss guide value within one decade. This can be attributed to the introduction of lead-free benzine.

The stochastic balance method applied in this study provides to assess the accuracy of the element balances. The accuracy was predominantly sensitive to the data uncertainty in fertilizer and crop concentrations and minor to the uncertainty of their quantity. Based on the

available balance data and data quality the net fluxes of Zn, Cu and Pb varied about half of their mean values, whereas the net Cd fluxes varied about three quarter of their mean values.

The net fluxes were sensitive in different manner to the uncertain balance parameters depending on land use, farm type, crop type and element. In general, the uncertainty in atmospheric deposition and crop concentrations accounted most to the uncertainty of the net fluxes of Cd and Pb, whereas the uncertainty of the net fluxes for Cu and Zn resulted mainly from uncertain concentration data of animal manure and crops.

The stochastic balance model supports the precautionary concept of soil protection. Land-use specific and farm-type specific measures can be derived to reduce the input of contaminants into soil. In addition, suitable options for a sustainable land use can be evaluated by model scenarios.

1 Einleitung

Das Nationale Bodenbeobachtungsnetz der Schweiz (NABO) wurde 1985 eingerichtet und umfasst insgesamt 105 Standorte mit unterschiedlicher Landnutzung (Desaules und Studer 1993). Ziel ist es, die Entwicklung der langfristigen Schadstoffbelastung im Boden zu verfolgen und mögliche Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit frühzeitig zu erkennen und zu prognostizieren. Zu diesem Zweck werden die Schadstoffgehalte im Boden periodisch gemessen (direktes Monitoring). Die bisherigen Ergebnisse des direkten Monitorings deuten auf eine grosse Dynamik von Gehaltsveränderungen im Oberboden hin (Desaules und Dahinden 2000).

Um die Ursachen der gemessenen zeitlichen Veränderungen der Schadstoffgehalte in Böden zu erforschen, werden neben dem direkten Monitoring auch Schadstoffflüsse für die landwirtschaftlich genutzten Parzellen im NABO-Messnetz erhoben (indirektes Monitoring). Mit der Bilanzierung der relevanten Ein- und Austräge von Schadstoffen wird der anthropogene Anteil der gemessenen Konzentrationsveränderungen im Boden quantifiziert. Dadurch können frühzeitig geeignete Massnahmen zur Vermeidung einer Anreicherung im Boden abgeleitet werden. Umgekehrt gestattet das direkte Monitoring eine Prüfung der Zuverlässigkeit von Stoffbilanzen (Validierung), so dass methodische Korrekturen und Erweiterungen des Bilanzierungsansatzes möglich werden.

Desaules und Studer (1993) haben für 37 NABO-Parzellen die Einträge von Schwermetallen über Hofdünger, Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel und der atmosphärischen Deposition der Jahre 1987 bis 1991 bestimmt. Die Studie bestätigte unter anderem die Haupteintragsquellen von Cadmium (Deposition, Mineraldünger), Blei (Deposition, Klärschlamm), Kupfer (Hofdünger, Fungizide, Klärschlamm) und Zink (Hofdünger, Klärschlamm) in landwirtschaftlich genutzte Böden.

Für eine Kausalanalyse von gemessenen zeitlichen Veränderungen im Boden und für die Planung und Umsetzung geeigneter Vermeidungsmassnahmen von Stoffanreicherungen im Boden muss jedoch die Zuverlässigkeit der Schadstoffbilanzen bekannt sein. Die Zuverlässigkeit wurde allerdings in den bisherigen klassischen Studien zur Stoffbilanzierung landwirtschaftlicher Böden nicht bestimmt.

In der vorliegenden Studie werden die Stoffeinträge und Stoffausträge für die NABO-Parzellen mit einer stochastischen Methode bilanziert, welche die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen im Hinblick auf die verfügbaren Bilanzdaten ausweist. Mit der stochastischen Methode werden für alle gemessenen – und damit wahrscheinlichen – Schwermetallgehalte der landwirtschaftlichen Hilfsstoffe, Kulturpflanzen und atmosphärischen Deposition die Stoffbilanzen berechnet und die Unsicherheiten in den Bilanzen quantifiziert. Die Ergebnisse der stochastischen Bilanzierungsmethode sind deshalb im Gegensatz zu klassischen Studien besser abgestützt und erhöhen die Prognosesicherheit von möglichen Schadstoffanreicherungen in Böden.

Unter den anorganischen Schadstoffen sind hauptsächlich Blei, Kupfer, Cadmium und Zink für anthropogene Bodenbelastungen verantwortlich. Daher beschränkte sich die Datenerfassung zur Bilanzierung zunächst auf diese Schwermetalle. Ist die Bilanzierungsmethode erprobt, kann sie auch für andere Schwermetalle und in erweiterter Form auch für persistente organische Schadstoffe im Boden angewendet werden.

Die Stoffbilanzierung kann sich auf unterschiedliche Systemgrenzen sowie räumliche und zeitliche Ebenen beziehen. In dieser Studie werden parzellenscharf Stoffe über einen Zeitraum von mehreren Jahren bilanziert. Die Bilanz auf Ebene der Parzelle erlaubt eine Validierung des Bilanzmodells mit Bodenmessungen im direkten Monitoring. Die Ein- und Austräge können auch auf unterschiedliche Kulturen und Fruchtfolgen bezogen oder auf Betriebsebene aggregiert werden. Der Vergleich von Stoffbilanzen zwischen verschiedenen Kulturen, Fruchtfolgen,

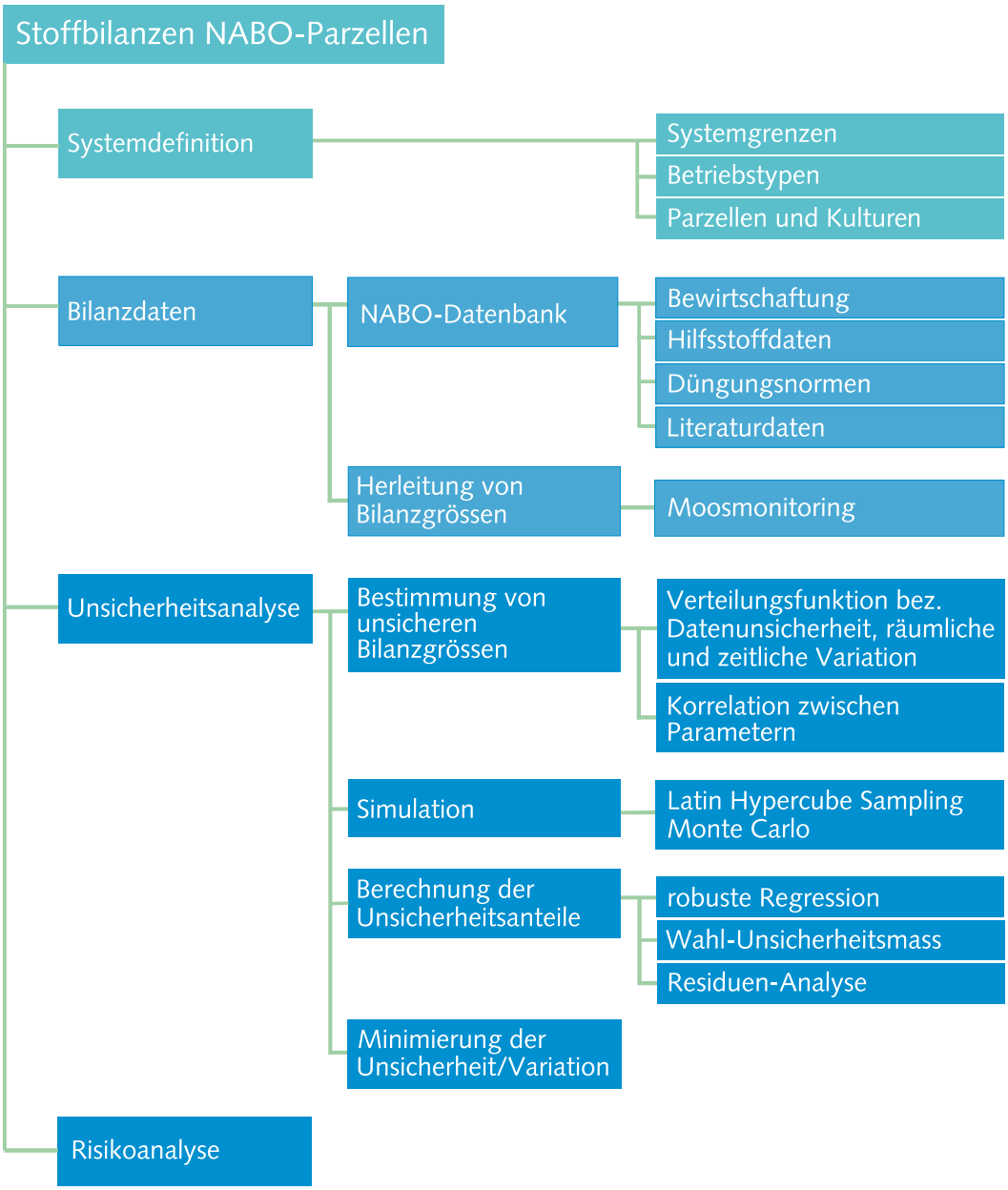
Bewirtschaftungsarten und Betriebstypen erlaubt ein besseres Verständnis der für die Bilanzen wesentlichen Einflussfaktoren. Entsprechend können zur Vermeidung von Schadstoffanreicherungen in Böden geeignete Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis formuliert werden.

Ein weiteres Ziel, welches mit Stoffbilanzen im Rahmen der Bodenbeobachtung verfolgt wird, ist der Vergleich von Bilanzen für unterschiedliche Zeitperioden. Dadurch kann der Einfluss einer veränderten landwirtschaftlichen Nutzung auf den Stoffhaushalt im Boden abgeschätzt werden – zum Beispiel aufgrund der Umstellung auf eine integrierte Produktion in Zusammenhang mit dem ökologischen Leistungsnachweis (öLN). In diesem Bericht wird auf Stoffbilanzen für NABO-Parzellen für die Zeit nach Einführung der integrierten Produktion eingegangen. Ein Vergleich mit Stoffbilanzen für frühere Zeitperioden, welche die Bewirtschaftung und Nutzung der NABO-Parzellen vor Einführung der integrierten Produktion berücksichtigt, soll in einer weiteren Studie vorgenommen werden.

2 Bilanzierungsmethode

In zahlreichen Studien wurden für unterschiedliche räumliche und zeitliche Ebenen die Ein- und Austräge von Schwermetallen für landwirtschaftlich genutzte Böden bilanziert. Beispielsweise wurden Stoffbilanzierungen von Schadstoffen auf nationaler Ebene (Schütze und Nagel 1998; Chambers *et al.* 1998), auf regionaler Ebene (von Steiger und Baccini, 1990; Tiktak *et al.* 1998, Keller and Schulin 2003a; Keller and Schulin 2003b; Marlburg-Graf 2003) oder auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs (Reiner et. al. 1996; LBP 1997; Moolenaar und Lexmond 1998; Bengtsson *et al.* 2003) durchgeführt.

Je nach Zielsetzung kommen unterschiedliche Bilanzmethoden und -daten zur Anwendung, deren Aussagekraft räumlich und zeitlich begrenzt sind. Beispielsweise kann auf nationaler Ebene lediglich die Tendenz einer Stoffanreicherung im Boden abgeschätzt werden, weil die Stoffflüsse von nationalen Stoffbilanzen nicht auf kleinräumigere Skalen übertragen werden können. Auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs hingegen werden betriebsspezifische Schadstoffbilanzen ermittelt, die nicht ohne weiteres auf eine grössere räumliche Ebene extrapoliert werden können.



Arbeitsschritte der Stoffbilanzierung für die NABO-Parzellen. *Abbildung 1*

Trotz unterschiedlicher Zielsetzungen sind allen Bilanzierungsstudien bestimmte Arbeitsschritte gemeinsam. Die in dieser Studie angewendete Bilanzmethode stützt sich auf die Stoffbilanzierungsmethode PROTERRA, welche für Phosphor- und Schwermetallbilanzen in landwirtschaftlichen Böden für Regionen von etwa 10 km^2 konzipiert wurde (von Steiger und Obrist 1993). Um die Unsicherheit von Bilanzdaten in den Stoffbilanzen zu berücksichtigen, wurde die Methode konzeptionell weiterentwickelt und mit einem stochastischen Ansatz (PROTERRA-S) verknüpft (Keller *et al.* 2001). Das stochastische Bilanzierungskonzept dieser Methode wurde für die Berechnung der Ein- und Austräge von landwirtschaftlich genutzten Parzellen im NABO-Messnetz angewendet.

Die einzelnen Arbeitsschritte der in dieser Studie verwendeten Bilanzmethode sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden die Arbeitsschritte der Bilanzmethode erläutert. Auf den letzten Arbeitsschritt, die Risikoanalyse von Schadstoffakkumulationen im Boden, kann in dieser Studie nur am Rande eingegangen werden. Eine detaillierte Risikoanalyse der langfristigen Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit erfordert eine dynamische Betrachtungsweise der Ein- und Austräge. Dies würde aber den Umfang dieser Arbeit sprengen.

Die Arbeitsschritte der Bilanzdatenerfassung und der Unsicherheitsanalyse können für eine effizientere Arbeitsweise iterativ durchlaufen werden. Beispielsweise kann in einem ersten Schritt die Stoffbilanz und deren Unsicherheit mit den vorhandenen und verfügbaren Bilanzdaten berechnet werden. In einem zweiten Schritt können gezielt Messungen der Bilanzgrössen vorgenommen werden, die am meisten zur Unsicherheit der Stoffbilanz beitragen.

2.1 Bilanzraum

2.1.1 Systemgrenze NABO-Parzelle

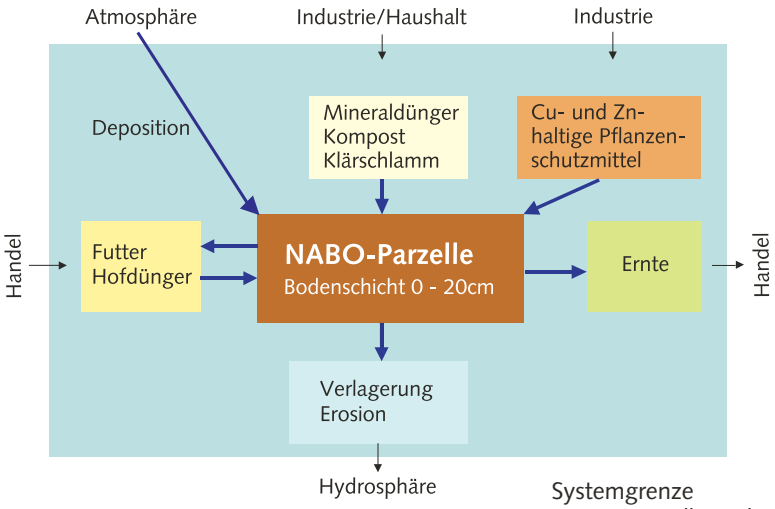
Von den landesweit 105 Standorten im NABO-Messnetz werden 70 landwirtschaftlich genutzt (Desaules und Dahinden 2000). Von 48 Standorten wird seit 1996 die landwirtschaftliche Nutzung erfasst. Jeder Standort gehört zu einem anderen landwirtschaftlichen Betrieb. Erfasst wird jährlich die Bewirtschaftung der Parzelle, auf der sich die Dauerbeobachtungsfläche (10 x 10 m^2) im NABO-Messnetz befindet. Jede Parzelle (und somit jede Stoffbilanz) lässt sich einem bestimmten Nutzungstyp, einem Betriebstyp und einer Fruchtfolge zuordnen. Von 18 Betrieben werden die Bewirtschaftungsangaben aller Parzellen erfasst. Dies erlaubt die Berechnung der Stoffbilanzen auf Betriebsebene, worauf aber im Rahmen dieser Studie nicht weiter eingegangen wird.

In einem ersten Schritt wurden für die Elemente Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Blei (Pb) und Zink (Zn) die Einträge durch Hof- und Mineraldünger, Klärschlamm und Pflanzenschutzmittel sowie die Austräge durch das Erntegut berücksichtigt (Abbildung 2). Die vier Schwermetalle wurden ausgewählt, weil sie anthropogen eingetragen werden und sich im Boden anreichern können. Das heisst aber nicht, dass andere anorganische Schadstoffe, die ebenfalls in der «Verordnung zu Belastungen des Bodens» (VBBo 1998) genannt werden, keine Relevanz für eine mögliche Anreicherung in Böden und einer langfristigen Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit haben können. Insbesondere gilt dies für Quecksilber (Hg), das neben Cd und Pb zwar im Rahmen eines internationalen Programms für kritische Schadstoffeinträge in Böden als prioritärer Schadstoff eingestuft wurde (UBA 2003). Allerdings lässt die Datenlage bis heute keine aussagekräftigen Bilanzen für Hg in landwirtschaftlich genutzten Böden zu.

In Abbildung 2 sind ebenfalls Stoffflüsse durch Bodenprozesse wie Erosion und Verlagerung angedeutet. Diese wurden bisher nicht in der Stoffbilanzierungsmethode berücksichtigt. Inwiefern diese Prozesse angesichts der Boden- und Standorteigenschaften der NABO-

Standorte substanziell zu einer Veränderungen der Konzentration eines Elements im Boden beitragen können, soll in einem weiteren Schritt geprüft werden.

Die über die Jahre 1996 bis 2001 berechneten Ein- und Austräge werden über die Menge und die Konzentration eines Hilfsstoffs oder Ernteguts als Fluxe in g/ha und Jahr berechnet. Die über den Bilanzzeitraum berechneten Stoffflüsse werden zeitlich gemittelt, um im Gegensatz zu jährlich schwankenden Bilanzen eine bessere Aussagekraft zu erreichen.



Systemgrenze NABO-Parzelle und Stoffflüsse. Verlagerung und Erosion wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. *Abbildung 2*

Der Nettoflux eines Stoffs bezeichnet die Differenz aus Ein- und Austrägen dieses Stoffs im Boden. Positive Werte geben eine Nettoanreicherung des Stoffs an, negative Werte einen Nettoentzug. Unter Berücksichtigung des Raumgewichts des Bodens (kg/m^3) und der Bodentiefe (m) wurde der Nettoflux (g/ha und Jahr) zudem in eine Akkumulationsrate (mg/kg und Jahr) umgerechnet. Messwerte für das Raumgewicht der jeweiligen NABO-Parzelle wurden aus Desaules und Studer (1993) entnommen. Unabhängig von der Nutzung der Parzellen wurden die Nettofluxe zur Umrechnung in eine Akkumulationsrate auf eine Anreicherung im Oberboden (0–20 cm) bezogen.

2.1.2 Betriebstypen und Nutzungsklassen

Die 48 NABO-Parzellen, für die die landwirtschaftliche Nutzung jährlich erfasst wird, sind über die ganze Schweiz verteilt (Abbildung 3a). Die Nummerierung der 48 Parzellen entspricht im Folgenden der Standortnummerierung im NABO-Messnetz (Desaules und Dahinden 2000). Etwa die Hälfte der Parzellen befindet sich im Mittelland. Von den 48 Parzellen werden jährlich die parzellenbezogenen Nutzungsangaben bezüglich Bodenbearbeitung, Saat, Düngung, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Ernte erhoben. Zudem werden die wichtigsten Eckdaten zur Charakterisierung der jeweiligen landwirtschaftlichen Betriebe wie Tierzahlen, Flächen oder Kulturen erhoben (Anhang 1a).

Anhand der erfassten Angaben wurden die landwirtschaftlichen Betriebe gemäss der Betriebstypologie FAT99 (FAT 2000) klassifiziert. Diese Typologie basiert im Wesentlichen auf der Bodennutzung und den Grossvieheinheiten (GVE) verschiedener Tierkategorien (Anhang 1b). Anhand von acht Kennzahlen werden insgesamt sieben spezialisierte und vier kombinierte Betriebstypen unterschieden. Kombinierte Betriebe mit den Schwerpunkten Veredlung und Verkehrsmilch-Ackerbau sind die häufigsten Betriebstypen der Dauerbeobachtungsflächen im NABO-Messnetz (Abbildung 3b und Tabelle 1).

Klassifizierung der Betriebe im NABO-Messnetz gemäss FAT (2000)

Betriebstypen	Anzahl	Anteil %	Tierbesatz[1] GVE/ha	Nutzfläche[2] ha
Kombiniert Veredlung	13	27	2,2	25,8
Kombiniert Verkehrsmilch-Ackerbau	10	21	1,0	36,2
Spezialkulturen	8	17	< 0,1	9,5
Kombiniert Andere	8	17	1,0	37,2
Verkehrsmilch	5	10	1,4	14,2
Ackerbau	4	8	0,2	33,7
Total	**48**	**100**		

[1] mittlerer Tierbesatz in Grossvieheinheiten pro Hektare
[2] mittlere landwirtschaftliche Nutzfläche der Betriebe
Tabelle 1

Direktes und indirektes Monitoring im NABO-Messnetz (a) und Klassifizierung der landwirtschaftlichen Betriebe (b). Die Ziffern geben die Standortnummern an. *Abbildung 3)*

Kombinierte Veredlungsbetriebe sind vor allem auf die Rinder- und Schweinehaltung spezialisiert (Mastbetriebe). Für diese Betriebe sind bei übermässiger Verwendung von Futtermittelzusatzstoffen erhöhte Cu- und Zn-Einträge mit dem Hofdünger zu erwarten. Kombinierte Verkehrsmilch-Ackerbaubetriebe weisen einen Anteil von über 40% offener Ackerfläche an der landwirtschaftlichen Nutzfläche und einen Rinderanteil von mehr als 75% des gesamten GVE-Bestandes auf. Dieser Betriebstyp umfasst somit vor allem gemischt produzierende Betriebe mit Milchvieh und Ackerbau. Verkehrsmilchbetriebe sind dagegen meist reine Milchviehbetriebe mit einem Anteil von weniger als 25% offener Ackerfläche.

Spezialkulturen von über 10% Flächenanteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche waren auf Obstbau (3), Rebbau (3) oder Gemüsebau (2) spezialisiert. Ein Betrieb, welcher zu der Klasse «Anderes Rindvieh» gehört (Standortnummer 28), wurde hier aus Darstellungsgründen dem verwandten Betriebstyp Verkehrsmilch zugeordnet.

Die Verteilung der Betriebe auf die Betriebsklassen im NABO-Messnetz spiegelt im Wesentlichen die gesamtschweizerischen Verhältnisse wider. Die bedeutendsten Betriebstypen im NABO-Messnetz stellen auch landesweit die wichtigen Betriebstypen dar. Gemäss der Stichprobe der Referenzbetriebe zur zentralen Auswertung (FAT 2000) dominieren in der Schweiz vor allem die Betriebstypen «Kombiniert Verkehrsmilch-Ackerbau» und «Kombiniert Andere». Insgesamt wurden fünf der 48 Betriebe nach den Vorgaben des biologischen Landbaus, ein Betrieb konventionell und die restlichen nach den Anforderungen der integrierten Produktion im Zusammenhang mit dem öLN bewirtschaftet.

Etwa drei Viertel der Betriebe hielten Vieh, wobei die Spanne der Grossvieheinheiten (GVE) der Betriebe von <0,1 bis 2,7 GVE/ha reichte. Ein Tierbesatz grösser als 1,5 GVE/ha war nur bei kombinierten Veredlungsbetrieben und spezialisierten Betrieben für Verkehrsmilch zu verzeichnen. Tabelle 1 zeigt den mittleren Tierbesatz der Betriebstypen. Aus Sicht der Tierkategorien hielten 17 Betriebe Rindvieh oder Kühe, 14 Rindvieh und Schweine und 12 Betriebe keinerlei Tiere.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche der Betriebstypen variierte von wenigen bis zu 150 Hektaren. Im Durchschnitt betrug sie 27 Hektaren. Die Betriebstypen «Kombiniert Verkehrsmilch-Ackerbau» und «Kombiniert Andere» wiesen durchschnittlich die grösste Nutzfläche auf (Tabelle 1), die Betriebe für Spezialkulturen die geringste. Drei Betriebe (Standortnummern 80, 1 und 69) bewirtschafteten eine landwirtschaftliche Nutzfläche von über 100 Hektaren und unterschieden sich damit in der Betriebsgrösse deutlich von den restlichen Betrieben.

2.1.3 Parzellen und Kulturen

Die Fruchtfolgen auf den NABO-Parzellen der Zeitperiode 1996 bis 2001 können im Wesentlichen als repräsentativ für die Schweiz bezeichnet werden. Je nach Ausrichtung des Betriebs können die Fruchtfolgen variieren (Anhang 2). Etwa zwei Drittel der Parzellen wurden in dem Bilanzzeitraum ackerbaulich genutzt (Tabelle 2), etwa die Hälfte hiervon häufig in der Fruchtfolge mit Kunstwiese. Von den zehn Wiesen und Weiden wurden vier extensiv und sechs intensiv bewirtschaftet.

Nutzung der Parzellen im NABO-Messnetz mit Stoffbilanzierung

Nutzung	Anzahl Parzellen	% Anteil
Ackerbau	30	63
Wiesen und Weiden	10	21
Rebbau	3	6
Obstbau	3	6
Gemüsebau	2	4
Total	**48**	**100**

Tabelle 2

Von den zehn Wiesen und Weiden wurden sechs von kombinierten Veredlungsbetrieben bewirtschaftet und jeweils zwei vom Betriebstyp «Kombiniert Andere» und «Verkehrsmilch». Die ackerbaulich genutzten Parzellen verteilen sich nicht nur auf den Betriebstyp «Ackerbau», sondern auch auf alle anderen Betriebstypen.

Wie oben erwähnt wurden – zusätzlich zur Erfassung der Parzellen im NABO-Messnetz – von 18 Betrieben die Daten aller Parzellen erhoben. Diese verteilen sich wie folgt auf die Betriebsklassen «Kombiniert Veredlung» (9), «Kombiniert Verkehrsmilch-Ackerbau» (6), «Verkehrsmilch» (2) und «Ackerbau» (1). Insgesamt liegen somit von 562 Parzellen über sechs Jahre hinweg die Nutzungsangaben vor. Tabelle 3 gibt die Häufigkeit der wichtigsten Kulturen für diese Parzellen wieder. Die unterschiedlichen Gemüsesorten wurden für die Stoffbilanzierung zu einer Klasse «Diverse Gemüse» zusammengefasst. Diese enthält unter anderem Karotten, Chinakohl, Fenchel, Rosenkohl, Salat, Spargel, Zucchini, Zwiebeln und Spinat. Weiterhin wurden jeweils Roggen und Dinkel sowie Bohnen und Erbsen zu einer Klasse zusammengefasst.

Um den Einfluss der spezifischen Bewirtschaftung einer Kultur auf die Stoffbilanz bestimmen zu können, wurden unabhängig von den Parzellen und Fruchtfolgen im NABO-Messnetz Stoffbilanzen für die Kulturen aller erfassten Parzellen berechnet. Dazu wurden die Bewirtschaftungsdaten aller Parzellen auf die jeweilige Dauer der Kultur bezogen. Mit der

Häufigkeit der Kulturen zwischen 1996 und 2001 auf den Parzellen mit Erfassung der Bewirtschaftung im NABO-Messnetz (n = 562)			
Kultur	**Abkürzung**	**Anzahl**	**% Anteil**
Getreide			
Winterweizen	WW	229	10,7
Wintergerste	WG	145	6,6
Wintertriticale	WT	42	2,0
Sommerweizen	SW	28	1,3
Roggen und Dinkel	RD	18	0,8
Sommergerste	SG	12	0,6
Hafer	HA	8	0,4
Hackfrüchte und Leguminosen			
Silomais	SM	167	7,8
Kartoffeln	KA	105	4,7
Zuckerrüben	ZR	80	3,5
Körnermais	KM	77	3,2
Raps	RA	56	2,6
Futterrüben	FR	26	1,2
Frühkartoffeln	FK	11	0,5
Eiweisserbsen	EE	9	0,4
Sonnenblume	SB	4	0,2
Soja	SO	3	0,1
Wiesen und Weiden			
Wiese intensiv	Wii	510	24,0
Wiese mittel intensiv	Wim	219	10,2
Weide intensiv	Wei	146	6,9
Wiese extensiv	Wie	111	5,2
Weide mittel intensiv	Wem	57	2,7
Weide extensiv	Wee	8	0,4
Spezialkulturen			
Diverse Gemüse	DG	22	1,4
Bohnen und Erbsen	BE	21	1,0
Reben	RE	16	0,8
Äpfel	AP	12	0,6
Kirschen	KI	6	0,3

Tabelle 3

Kulturdauer wird im Folgenden die Zeitperiode einer Kultur von der Saat bis zur Ernte bezeichnet. Die in Tabelle 3 definierten Abkürzungen der Kulturen finden sich in den grafischen Darstellungen der Stoffbilanzen in Kapitel 3 wieder.

Die Zuordnung der eingesetzten Hilfsstoffe auf die jeweilige Kulturdauer einer Kultur kann jedoch nicht immer eindeutig vorgenommen werden. So kann eine einzelne Düngergabe für die Versorgung mehrerer nachfolgender Kulturen dienen (Beispiel Grunddüngung). Die Aggregation der eingesetzten Hilfsstoffe auf die Bilanzeinheit der Kulturen ist also mit gewissen Fehlern behaftet und kann im Gegensatz zu den parzellenbezogenen Stoffbilanzen lediglich eine Tendenz wiedergeben.

2.2 Bilanzdaten

2.2.1 Atmosphärische Deposition

Durch industrielle Prozesse wie der Verbrennung von Kohle und Kehricht, durch metallverarbeitende Betriebe und den Verkehr gelangen Schwermetalle in die Umwelt. Schwermetalle werden in der Atmosphäre überwiegend an feine Schwebstaubpartikel gebunden. Je nach Partikelgrösse können diese in unmittelbarer Umgebung der Emissionsquelle oder über weite Strecken hinweg in Böden eingetragen werden.

Die Immissionsbelastung durch Schwermetalle im Schwebstaub ist in der Schweiz in den letzten Jahren durch gezielte Massnahmen in der Luftreinhaltung rückläufig. Beispielsweise nahm die Cd-Belastung im Schwebstaub an den sechs Messstellen im Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL), mit welchem Schwermetalle im Schwebstaub gemessen werden, in den letzten zehn Jahren um mehr als die Hälfte ab (BUWAL 2003). Im NABEL wird mit der Bergerhoff-Methode sowohl die Trocken- als auch die Nassdeposition erfasst.

Neben den Schwebstaubmessungen im NABEL liegen für die Schweiz Messwerte von über 150 emittentenfernen Standorten aus dem Moosmonitoring vor (Thöni 1998; Thöni 2004). Moose eignen sich als Bioindikator für die atmosphärische Deposition, da sie keine Wurzeln und keine Wachsschicht haben, und somit Wasser und Stoffe über die Oberfläche aufnehmen. Überdies sind die Stoffkonzentrationen in Moosen über die Jahre relativ konstant und unabhängig von saisonalen Schwankungen – allerdings nur, wenn bei den Probeentnahmen die Sprossen von mehreren Jahren genommen werden. Thöni (2004) verwendete in ihren Studien die in der Schweiz weit verbreiteten Moosarten *Hypnum cupressiforme* (Mittelland) und *Pleurozium schreberi* (restliche Schweiz). In den Jahren 1990, 1995 und 2000 ermittelte sie wiederholt die Konzentration von bis zu 49 Elementen in diesen Moosarten.

Um von den gemessenen Schwermetallgehalten in Moosproben auf die Trocken- und Nassdeposition schliessen zu können, haben Thöni *et al.* (1996) an drei Standorten für 32 Elemente sowohl die Moosgehalte als auch die Depositionsraten nach der Bergerhoff-Methode bestimmt. Sie fanden zwischen den Messwerten dieser beiden immissionsökologisch relevanten Methoden unter anderem lineare Zusammenhänge für die Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn. Infolgedessen können die auf Basis dieses Methodenvergleichs gemessenen Konzentrationen (µg/g) im Moos in Depositionswerte (g/ha und Jahr) umgerechnet werden. Da sich die Schwermetallgehalte in den Moosen bei den Untersuchungen von 1995 und 2000 kaum unterscheiden, wurden zur Berechnung der atmosphärischen Deposition auf den NABO-Standorten die Konzentrationen der Untersuchung 2000 von insgesamt 142 Standorten verwendet. Tabelle 4 fasst summarisch die gemessenen und transformierten Messwerte zusammen.

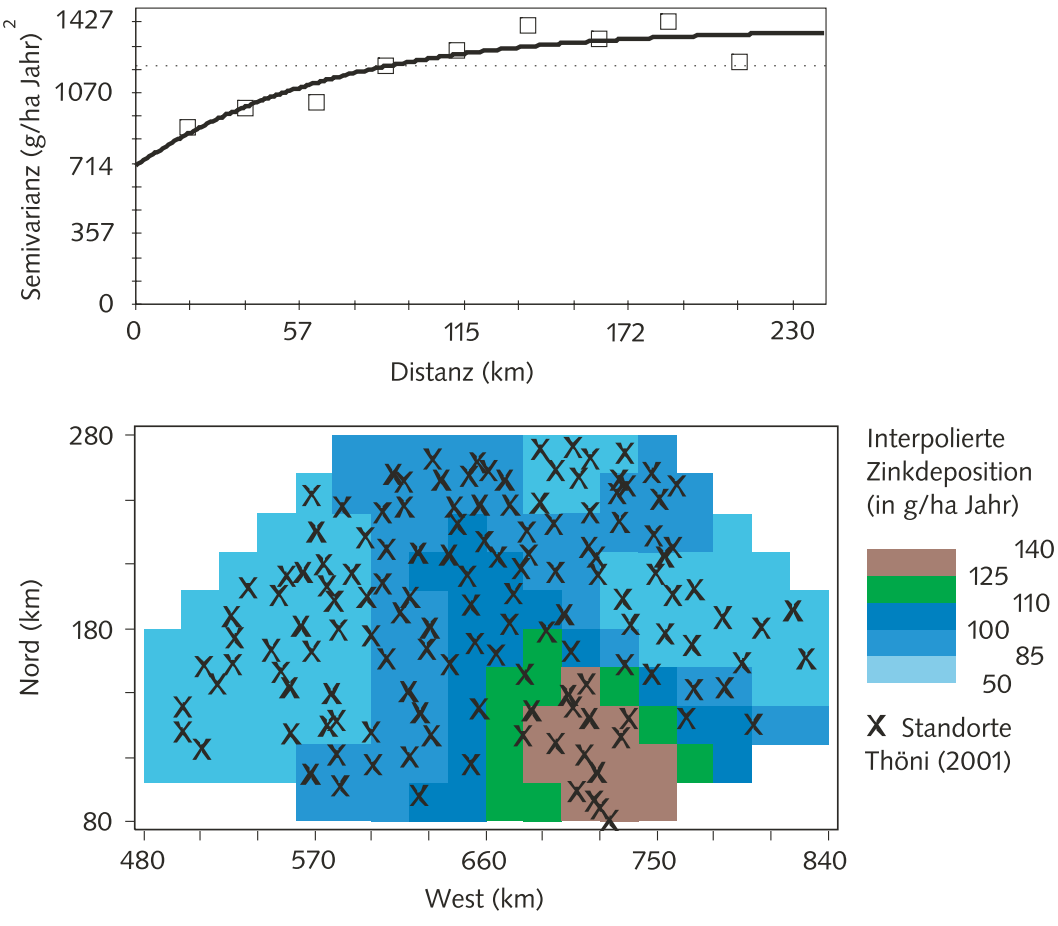
Im Vergleich zu Messwerten trockener und nasser Depositionsraten in ländlichen Regionen Deutschlands (Schütze und Nagel 1998; UBA 2001) sind die aus den Schwermetallgehalten der Moosproben transformierten Werte generell tiefer. Für 51 Standorte ergaben sich mit der Transformation der Cu-Gehalte in Moosen negative Werte, was auf systematische Fehler bei der von Thöni *et al.* (1996) angegebenen Regressionsgeraden hinweist. Die transformierten Cu-Werte dieser Standorte wurden für weitere Analysen nicht berücksichtigt.

Um die Messdaten aus dem Moosmonitoring den NABO-Standorten zuordnen zu können, wurden die Depositionsdaten mit geostatistischen Methoden räumlich analysiert und interpoliert. Eine detaillierte Beschreibung der angewendeten geostatistischen Methoden findet sich in Webster und Oliver (2001) sowie in Nielsen und Wendroth (2003). In einem ersten Schritt wurde für jedes Element das Variogramm bestimmt, welches die Semivarianzen der Depositionsraten für unterschiedliche Distanzklassen angibt. Abbildung 4a zeigt zur Illustration die Semivarianzen der Zn-Depositionsraten, welche mit einer exponentiellen Funktion angepasst wurden.

Deskriptive Statistik der gemessenen Schwermetallgehalte in Moosproben (Thöni 2004) und der transformierten Depositionsraten				
	Cd	**Cu**	**Pb**	**Zn**
Moosmonitoring: Konzentration in µg/g				
Anzahl Standorte	142	142	142	142
Minimum	0,05	2,68	0,7	14,6
Maximum	1,52	16,36	30,9	116,5
Median	0,18	4,35	3,3	29,6
Variationskoeffizient in %	70	42	97	42
Transformation: Depositionswerte in g/ha und Jahr				
Anzahl Standorte	142	91	142	142
Minimum	0,3	0,01	14,3	44,7
Maximum	3,9	64,9	66,7	354,7
Median	0,7	2,4	18,7	90,4
Variationskoeffizient in %	51	145	37	42

Tabelle 4

In einem zweiten Schritt wurden die Depositionsraten mittels Block-Kriging unter Berücksichtigung der Semivarianzfunktion auf ein 20 x 20 km^2 Gitter interpoliert (Abbildung 4b), und jedem NABO-Standort der Schätzwert der Gitterzelle zugeordnet. In Anhang 3 sind die auf diese Weise hergeleiteten Depositionsraten für Cd, Cu, Pb und Zn für die NABO-Standorte aufgelistet. Die Cu-, Pb- und Zn-Werte wiesen ein ähnliches räumliches Muster mit erhöhten Depositionsraten in der Südschweiz auf (siehe Maximalwerte in Tabelle 3). Verursacht werden diese Depositionsraten vermutlich durch Emissionen aus der Industrieregion Mailand. Die Cd-Werte zeigten hingegen mit Ausnahme einzelner erhöhter Cd-Depositionen im Jura und Mittelland kein räumliches Muster.



Räumliche Interpolation der Zn-Depositionsraten für die Schweiz: Variogramm (a) und Block-Kriging (b).
Abbildung 4

Ein Vorteil des Kriging ist es, dass neben dem Schätzwert für jede Gitterzelle auch die Schätzvarianz bestimmt wird. Aufgrund der Verteilung der Standorte im Moosmonitoring waren die Unterschiede der Schätzvarianz zwischen den Gitterzellen für Cd, Cu, Pb und Zn nur gering. Daher wurde zur Berechnung der Stoffbilanzen für alle Depositionswerte der NABO-Standorte eine mittlere Schätzvarianz verwendet. Es muss aber betont werden, dass die durch die Transformation der Mooskonzentrationen bedingten systematischen Fehler nicht in der Schätzvarianz der Interpolationsmethode enthalten sind.

2.2.2 Landwirtschaftliche Hilfsstoffe

Erfassung der Bilanzdaten

Die Bewirtschaftungsdaten der NABO-Parzellen werden jedes Jahr von den Landwirten direkt angefordert, kontrolliert und erfasst. Je nach Betriebstyp und Nutzung umfasst dies Unterlagen wie Feldkalender, Parzellenblatt, Fruchtfolgeplan und Wiesen-Journal sowie Angaben zur Nährstoffbilanz und zu den Tierzahlen mit Aufstallungssystem. Die Daten werden in einer Datenbank verwaltet und folgenden Plausibilitätsprüfungen unterzogen:

1. Kontrolle der Daten im Vergleich zu geltenden Düngungsnormen (GRUDAF 2001), zu den entsprechenden Empfehlungen zur guten landwirtschaftlichen Praxis sowie zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
2. Kontrolle der Phosphorbilanz im Vergleich zu den Anforderungen der integrierten Produktion und des öLN, die unter anderem eine ausgeglichene Nährstoffbilanz auf der Ebene des Betriebs fordern. Auf der Ebene der Parzellen kann die Phosphorbilanz allerdings unausgewogen sein.
3. Berechnung des Hofdüngeranfalls auf Betriebsebene gemäss den Tierzahlen und gemittelten Nährstoffausscheidungen der Nutztiere sowie der Verteilung der Hofdünger entsprechend dem Nährstoffbedarf der Kulturen. Letzteres kann jedoch nur für die 18 Betriebe mit Erfassung aller Parzellen durchgeführt werden. Dies erlaubt eine Überprüfung und Korrektur der vom Landwirt angegebenen Verdünnung der Gülle.

Falls aufgrund der Prüfungen die Angaben der Bewirtschafter nicht plausibel erscheinen, wird der Landwirt erneut kontaktiert. Erfahrungsgemäss können auf diese Weise die meisten Unklarheiten ausgeräumt und die Daten korrigiert werden.

Hofdünger

Hofdünger spielt eine wichtige Rolle zur Deckung des Nährstoffbedarfs der Kulturen auf den NABO-Parzellen. Auf 36 der 48 Parzellen wurde während der Bilanzperiode Hofdünger ausgebracht. Am häufigsten waren dies Vollgülle von Milchvieh sowie Rinder- und Schweinegülle.

In der Schweiz wurden in mehreren Untersuchungen Hofdünger von verschiedenen Tierarten auf ihre Nähr- und Schadstoffgehalte untersucht (GRUDAF 1994, 2001; Menzi *et al.* 1993; Kessler *et al.* 1994; Menzi und Kessler 1998; Menzi *et al.* 1999). Die Untersuchungen zum Nährstoffgehalt von Mist und Gülle erfolgten vor allem aus Gründen einer effizienteren Düngungsplanung. Die Schwermetallgehalte der Hofdünger variieren je nach Betriebstyp, Tierart, Stallungssystem, Jahreszeit, Futtermittel und Futtermittelzusatzstoff. Da Futtermittelzusatzstoffe aus Gründen der Tiergesundheit und zur Leistungsförderung sowohl mit Spurenelementen als auch mit Makroelementen wie beispielsweise Cu und Zn angereichert sind, können sie ein wichtiger Faktor für die Stoffbilanzen dieser Elemente sein (Schultheiss *et al.* 2004).

Menzi und Kessler (1998) untersuchten in einer landesweiten Studie in mehreren Etappen etwa 1100 Hofdüngerproben von etwa 30 Betrieben. Zehn dieser Betriebe bewirtschafteten Parzellen aus dem NABO-Messnetz. Die für die Bilanzen verwendeten Schwermetallkonzentrationen der unterschiedlichen Hofdüngertypen sind zusammen mit den Literaturangaben im Anhang 4 aufgelistet. Vereinzelt wurde die Datenlage mit Messwerten aus internationalen Studien ergänzt (Nicholson *et al.* 1999; Schultheiss *et al.* 2004).

Mineraldünger

Bei den Mineraldüngern wurden im Bilanzzeitraum auf den 48 NABO-Parzellen vor allem reine Stickstoffdünger und verschiedene Mehrnährstoffdünger eingesetzt. Kaliumdünger und reine Phosphordünger wie Supertriple wurden wenig angewendet. Zu Beginn der 1990er Jahre wurde in der Schweiz die Qualität von Mineraldüngern untersucht (Gsponer 1990; von Steiger und Baccini 1990; BUWAL 1991). Eine Zusammenstellung dieser Messwerte findet sich in Desaules und Studer (1993). Zu einem späteren Zeitpunkt wurden im Rahmen von Dünger-Kontrolluntersuchungen einige Mineraldüngertypen erneut auf ihre Schwermetallgehalte hin analysiert (AG 1997; IUL 1997). Ähnliche Untersuchungen wurden in Deutschland (Boysen 1992), England (Mortvedt 1996) und anderen Ländern durchgeführt. Eine Zusammenstellung der Messergebnisse deutscher Untersuchungen findet sich in Hackenberg und Wegener (1999).

Zwar wurden im letzten Jahrzehnt in der Schweiz mengenmässig weniger Mineraldünger eingesetzt (Spiess 1999), doch kann der Eintrag von Schwermetallen über Mineraldünger je nach Betriebstyp und Düngungsplan bedeutsam sein. Trotz der oben genannten Studien ist die Datenlage für Schwermetalle in Mineraldüngern unbefriedigend. Einerseits war die Stichprobenanzahl der Studien relativ klein, andererseits liegen seit einem Jahrzehnt keine neuen oder verfügbaren Messungen vor. Für die verschiedenen Mineraldüngertypen sind die verfügbaren Schwermetallgehalte in Anhang 4 zusammengefasst.

Klärschlamm und Kompost

Klärschlamm wurde im Bilanzzeitraum an fünf Standorten ausgebracht (Standortnummern 13, 25, 28, 46 und 103). Die Summe der applizierten Menge pro Parzelle variierte zwischen 0,7 t Trockensubstanz (TS) und 2,7 t TS. Kompost wurde lediglich an einem Standort eingesetzt (3,2 t TS auf Standortnummer 95).

Der letzte Einsatz von Klärschlamm auf den NABO-Parzellen fand im Jahr 2000 statt. Mit der Änderung der Stoffverordnung vom 1. Mai 2003 (StoV 2003) darf Klärschlamm in Zukunft in der Schweiz nicht mehr als Dünger verwendet werden, sondern muss umweltverträglich verbrannt werden. Im Futter- und Gemüsebau darf Klärschlamm bereits heute nicht mehr verwendet werden. Für die übrigen düngbaren Flächen gilt eine Übergangsfrist bis spätestens 2006, welche im Einzelfall von den Kantonen bis 2008 verlängert werden kann.

Die Konzentrationen der Schwermetalle im Klärschlamm sowie die angewendeten Mengen wurden den Lieferscheinen der Abwasserreinigungsanlagen entnommen (Anhang 4). Über die landesweite Verwertung von Klärschlamm wird seit 1985 im Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) eine Datenbank geführt. Die Werte der Analysen wurden am ehemaligen Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL) gespeichert. Auf der Grundlage dieser Daten haben Keller und Desaules (1997) die flächenbezogene Bodenbelastung durch Klärschlamm in der Schweiz abgeschätzt. Die Studie verdeutlicht den dominanten Einfluss von Klärschlammgaben auf den Schwermetallhaushalt im Boden. Herter *et al.* (2003) schätzten den Nutzen und die Risiken der Klärschlammanwendung in der Landwirtschaft anhand einer Gegenüberstellung der Schad- und Nährstofffrachten ab. In Bezug auf den P-Nährstoffgehalt weist Klärschlamm durchschnittlich dreifach höhere Schwermetallgehalte auf als Hof- oder Mineraldünger.

Zur Abschätzung der Qualität des Kompostes, welcher auf der NABO-Parzelle Nr. 95 eingesetzt wurde, waren Analysedaten vom landwirtschaftlichen Beratungsdienst der MIGROS erhältlich (Palasthy 1983). Die zur Berechnung der Stoffbilanzen verwendeten Daten zur Kompostqualität sind in Anhang 4 zu finden. In den Abbildungen für die Stoffbilanzen ist aus Darstellungsgründen der Stoffeintrag über Kompost und Klärschlamm der gleichen Eintragsklasse zugeordnet.

Pflanzenschutzmittel

Unter den schwermetallhaltigen Pflanzenschutzmitteln sind vor allem Cu- und Zn-haltige Fungizide relevant. Diese wurden im Bilanzzeitraum auf den 48 NABO-Parzellen vor allem für Spezialkulturen eingesetzt. Auf den drei Rebbauparzellen (5, 55 und 96) waren dies die Cu-

haltigen Produkte Kocide, Cuprosan, Microperl, Cuprofix, Turbofal und Recop. Das Insektizid Cuprofix wurde ausserdem auch auf einer Parzelle mit Obstbau (20) angewendet. Auf drei ackerbaulich genutzten Parzellen mit Kartoffelanbau (48, 54 und 78) wurden die Zn-haltigen Fungizide Mancozeb, Acrobat und Rover Star appliziert, auf zwei Gemüsebauparzellen (51 und 94) die Produkte Rover Star, Ridomil und Sandofan.

Die Cu- und Zn-Gehalte der jeweiligen Pflanzenschutzmittel wurden aus dem Zielsortiment der landwirtschaftlichen Genossenschaften – zum Beispiel LANDI (2003) – und aus dem Verzeichnis der Pflanzenschutzmittel (BLW 2004) entnommen (Anhang 4). Die von den Landwirten angegebenen Aufwandmengen bewegten sich in jenem Bereich, der von den Herstellern empfohlen wurde.

2.2.3 Erntegut

Die Aufnahme von essenziellen Elementen und nicht-essenziellen Schadstoffen durch die Pflanzen hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Neben pflanzen- und elementspezifischen Eigenschaften sind insbesondere pedologische Faktoren wie pH-Wert, Humus- und Tongehalt zu nennen, welche unter anderem die Pflanzenverfügbarkeit der Elemente in der Bodenmatrix bestimmen. Es muss aber betont werden, dass die in dieser Studie ausgewählten Elemente Cu und Zn für die Pflanzen essenziell sind und folglich nicht per se als Schadstoffe im Boden bezeichnet werden können (vgl. Hämmann und Gupta 1997).

Der Ernteertrag wurde aus dem Parzellenblatt oder dem Wiesenjournal entnommen und mit den Referenzerträgen aus GRUDAF (2001) verglichen oder ergänzt. Die auf der Parzelle verbleibenden Ernterückstände werden ebenfalls in der Datenbank erfasst. Zur Bilanzierung der Stoffausträge wurden Schwermetallkonzentrationen in Korn und Stroh für Getreide sowie in Blatt und Frucht von Futterrüben, Zuckerrüben und Mais unterschieden.

Direkte Messungen bei den in Tabelle 3 aufgeführten Kulturen auf NABO-Parzellen wurden bisher wegen des Zeit- und Kostenaufwandes nicht durchgeführt. Die Datenlage bei den Cd-, Cu-, Zn- und Pb-Konzentrationen in den wichtigsten Kulturpflanzen kann aber als gut bezeichnet werden, da die Problematik von Schadstoffen in Nahrungs- und Futterpflanzen Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im In- und Ausland in den 1980er und 1990er Jahren war. Die in dieser Studie verwendeten Schwermetallkonzentrationen von Kulturpflanzen basieren in erster Linie auf Untersuchungen in der Schweiz (Anhang 4). Darunter befinden sich die Studien von Vogler und Schmitt (1990), von Steiger und Baccini (1990), Jenka *et al.* (1996) sowie eine Auswertung von Untersuchungen zusammengefasst in Keller (2000). Die Phosphorgehalte der wichtigsten Kulturpflanzen basieren auf den häufig gemessenen Werten aus GRUDAF (2001). Für einige Kulturen wurde auf Literaturauswertungen, auf Untersuchungen aus Deutschland (Schütze und Nagel 1998; Knoche *et al.* 1999) und Österreich (Reiner *et al.* 1996) oder auf internationale Ringversuche zur Qualität von Nahrungs- und Futterpflanzen (IPE 1994) zurückgegriffen.

Eine Besonderheit stellt die Arbeit von Knoche *et al.* (1999) dar. Die Wissenschaftler analysierten das Transferverhalten von Schwermetallen aus Böden in Pflanzen auf der Basis von über 300 000 Datenpaaren von Boden- und Pflanzenmessungen. Die Studie liefert für neun Elemente wertvolle Perzentilstatistiken über häufig gemessene Pflanzenkonzentrationen in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenkonzentration. Da von einigen Ausnahmen abgesehen die Böden im NABO-Referenzmessnetz weitgehend unbelastet bis gering belastet sind (Desaules und Dahinden 2000), wurden bei der Literaturauswertung Pflanzengehalte, die auf belasteten Flächen gemessen wurden, ausgeschlossen.

2.2.4 Düngungsregime

Die Bestimmung der Nährstoffversorgung der Kulturen gibt wichtige Hinweise auf häufig eingesetzte Hilfsstoffe und auf die damit verbundenen Stoffeinträge. Da Phosphor (P) im

Vergleich zu Stickstoff aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften einfacher bilanziert werden kann, wurden P-Bilanzen als Leitindikator zur Charakterisierung des Düngungsregimes der NABO-Parzellen bestimmt. Die Schwermetallbilanzen können auf diese Weise im Kontext der P-Versorgung der Kulturpflanzen interpretiert werden. Ausserdem kann die P-Bilanz einer Parzelle helfen, die Plausibilität einer Schwermetallbilanz zu prüfen, da beispielsweise P mit Cd in bestimmten Mineraldüngern (Mortvedt 1996) und P mit Cu und Zn in bestimmten Hofdüngertypen (von Steiger und Baccini 1990) einen engen Zusammenhang aufweist.

Der P-Bedarf der Kulturen wurde auf den Parzellen sehr unterschiedlich gedeckt. Auf Parzellen von kombinierten Veredlungsbetrieben, Verkehrsmilchbetrieben und anderen kombinierten Betrieben wurde die P-Versorgung der Pflanzen fast vollständig durch Hofdünger gewährleistet. Parzellen von Spezialkulturen und einige Parzellen von Ackerbaubetrieben und von kombinierten Betrieben mit Schwerpunkt Verkehrsmilch-Ackerbau erhielten dagegen grössere P-Düngergaben mit Mineraldünger. Auf drei Parzellen trug Klärschlamm zum P-Bedarf der Kulturen bei. Der P-Nettoflux variierte insgesamt zwischen –54 kg P_2O_5/ha und Jahr auf einer Parzelle eines Ackerbaubetriebs, welche nur geringfügig gedüngt wurde, und 92 kg P_2O_5/ha und Jahr auf einer Parzelle eines kombinierten Veredlungsbetriebs.

Im Durchschnitt war die P-Bilanz der 48 Parzellen mit 3,3 kg P_2O_5/ha und Jahr fast ausgeglichen. Allerdings waren die P-Bilanzen sowohl innerhalb als auch zwischen den Betriebstypen sehr unterschiedlich. Insgesamt zeigten die Parzellen der kombinierten Veredlungsbetriebe die höchsten P-Überschüsse, welche vor allem aus übermässigen Hofdüngergaben resultierten. Die vier Parzellen der Ackerbaubetriebe wurden hingegen kaum gedüngt. Dies konnte vereinzelt auch für Parzellen anderer Betriebstypen beobachtet werden. In diesen Fällen überstieg in der Regel der berechnete P-Austrag mit der Ernte die gedüngte P-Menge.

Hackfrüchte und Leguminosen wiesen durchschnittlich deutlich höhere P-Überschüsse auf als Spezialkulturen, Getreide sowie Wiesen und Weiden. Während der P-Bedarf von Getreide sowie Hackfrüchten und Leguminosen zu etwa gleichen Teilen durch Mineraldünger und Hofdünger gewährleistet wurde, erhielten die Wiesen und Weiden fast ausschliesslich Hofdünger. Die P-Düngung auf den intensiv genutzten Wiesen und Weiden war deutlich höher als auf jenen, die mittelintensiv und extensiv genutzt wurden.

Durchschnittlich lag der P-Überschuss bei den Hackfrüchten und Leguminosen bei 27,9 kg P_2O_5/ha und Kulturdauer. Getreide sowie Wiesen und Weiden wiesen dagegen negative P-Nettofluxe zwischen –6,7 und –5,8 kg P_2O_5/ha und Kulturdauer auf. Diese Unterschiede müssen jedoch im Zusammenhang mit den Fruchtfolgen gesehen werden. Wird beispielsweise nach einer Hackfrucht Wintergerste oder Winterweizen angebaut, ergibt sich insgesamt eine relativ ausgewogene P-Bilanz. Von allen Kulturen wurden für Bohnen und Erbsen, Sonnenblumen, Raps, Soja, Zuckerrüben sowie Körnermais die höchsten P-Einträge verzeichnet.

2.3 Unsicherheitsanalyse

2.3.1 Stoffbilanzen und Unsicherheiten

Für eine Kausalanalyse von gemessenen zeitlichen Veränderungen der Schadstoffkonzentration im NABO-Messnetz müssen die in den Stoffbilanzen involvierten Unsicherheiten bekannt sein. Auf diese Weise können mit den Stoffbilanzen Prognosen und Prognosebereiche für zukünftige Veränderungen der Schadstoffgehalte im Boden bestimmt werden. Generell kann zwischen drei verschiedenen Gruppen von Unsicherheiten in Stoffbilanzen unterschieden werden:

I. Modellunsicherheiten: Relevante Prozesse sind im Bilanzmodell nicht oder nur unvollständig erfasst oder können nur vereinfacht abgebildet werden. Für die vorliegende Studie be-

trifft dies unter anderem den Einfluss der Erosion und der Verlagerung auf den Stoffhaushalt im Oberboden. Ausserdem können – um nur ein Beispiel von weiteren Prozessen zu nennen – für die Zn-Bilanz Einträge durch Korrosion der Stalleinrichtung relevant sein (Schultheiss *et al.* 2004).

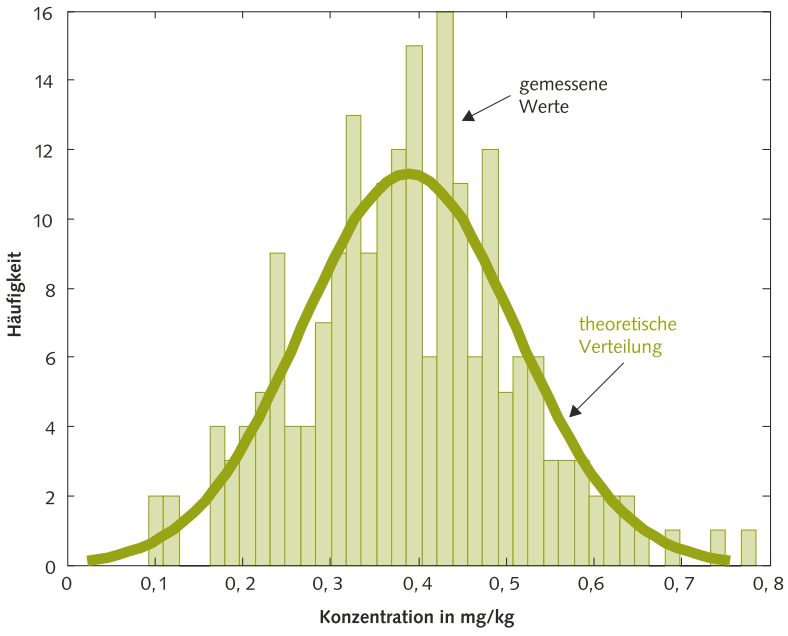
II. Unsicherheit in den Bilanzdaten: Diese resultieren aus Messunsicherheiten von Konzentrationen und Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter. Abhängig von der Messmethode, der Probenahme sowie dem Stichprobenumfang können Bilanzierungsdaten zudem qualitativ sehr unterschiedlich sein. Unsicherheiten resultieren auch aus der Übertragung von Bilanzdaten aus Untersuchungen und Literaturdaten mit einem anderen räumlichen und zeitlichen Bezug. Als Beispiel für Unsicherheiten in Bilanzdaten sei die oben genannte Studie von Menzi und Kessler (1998) genannt. Die Messwerte dieser Studie für Schwermetallgehalte in den Hofdüngern weisen eine grosse Streuung auf. Da diese nicht einem spezifischen Betriebstyp zugeordnet werden kann, ist ein mittlerer Schwermetallgehalt für einen Hofdüngertyp kaum aussagekräftig. Folglich muss die in der Untersuchung gemessene Streuung der Messdaten in vollem Umfang in der Stoffbilanz berücksichtigt werden.

III. Räumliche und zeitliche Variation von Bilanzgrössen: Stoffgehalte und Stoffmengen weisen im Boden, in der Bio-, Hydro- und Atmosphäre aufgrund chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse eine natürliche Variation auf. Beispielsweise streuen Bodeneigenschaften innerhalb einer Parzelle, oder weisen Depositionsdaten in der Regel erhebliche zeitliche Variationen auf.

Modellunsicherheiten können nur durch den Vergleich verschiedener Bilanzmethoden oder durch einen Vergleich mit gemessenen Veränderungen von Schadstoffgehalten in Böden quantifiziert werden. Die Unsicherheit in den Bilanzdaten kann hingegen durch zusätzliche spezifische Messungen reduziert werden. Dies allerdings trifft nicht für die natürliche Variation von Bilanzgrössen zu. Mit der stochastischen Bilanzierungsmethode werden die Unsicherheiten der Gruppen II und III in den Stoffbilanzen für die NABO-Parzellen mit einbezogen.

2.3.2 Bestimmung von unsicheren Bilanzgrössen

Unsichere Bilanzgrössen können im Bilanzmodell als Zufallsvariablen (ZV) betrachtet werden, die durch den Verteilungstyp sowie durch die Lage- und Streuparameter charakterisiert sind. Abbildung 5 veranschaulicht dies am Beispiel der Cd-Konzentration einer Kulturpflanze. Anhand der Häufigkeitsverteilung von Messdaten wurde eine theoretische Verteilung hergeleitet (Normalverteilung mit Mittelwert 0,4 mg/kg, Minimum 0,05 mg/kg, Maximum 1,0 mg/kg und Standardabweichung 1,2 mg/kg). Aus der theoretischen Verteilung können anschliessend beliebig viele Werte zur Berechnung der Bilanz generiert werden (siehe unten).



Bestimmung unsicherer Bilanzgrössen (Zufallsvariablen) am Beispiel des Cd-Gehalts einer Kulturpflanze: Aus der Häufigkeitsverteilung der Messwerte wird eine theoretische Verteilung abgeleitet, welche zur Simulation der Cd-Gehalte in den Stoffberechnungen verwendet wird. *Abbildung 5*

Die Auswahl der Zufallsvariablen kann in mehreren Schritten erfolgen. In einer ersten Auswahl sollten die Konzentrationen und Mengen jener Hilfsstoffe und Kulturpflanzen in Betracht gezogen werden, welche für die Bewirtschaftung der NABO-Parzellen bedeutsam sind, und bei denen es die Datenlage erlaubt, die Unsicherheit bzw. Variation zu quantifizieren. Konzentrationen und

Mengen von unbedeutenden Hilfsstoffen und Kulturpflanzen brauchen nicht als Zufallsvariable berücksichtigt werden und gehen als konstante Werte in die Stoffberechnung mit ein, auch wenn die entsprechenden Bilanzdaten sehr unsicher sind.

In dieser Studie wurden die Lage- und Streuparameter der ZV abhängig von der Verfügbarkeit der Daten spezifisch für Parzellen, Betriebe oder für die ganze Schweiz hergeleitet. Falls für gemessene Daten oder Literaturdaten lediglich Minima, Mittelwert und Maxima bekannt waren, wurde unter Annahme einer Normalverteilung die Varianz der Messdaten geschätzt.

Tabelle 5 fasst die Anzahl der ZV der einzelnen Stoffbilanzen zusammen. Beispielsweise wurden für die Zn-Bilanzen der 48 NABO-Parzellen die Unsicherheiten der Zn-Konzentration von 13 verschiedenen Hofdüngertypen berücksichtigt. Der Streubereich der Zn-Konzentration jedes einzelnen Hofdüngertyps basiert wiederum auf unterschiedlichen Untersuchungen und Daten aus der Literatur. Insgesamt wurden 97 ZV für die Berechnung der Zn-Bilanz jeder NABO-Parzelle einbezogen. In Anhang 5 sind Verteilungstyp, Lage- und Streuparameter aller ZV aufgelistet. Die Daten zur Herleitung der ZV für Konzentrationen wiesen meistens eine lognormale und nur selten eine normale Verteilung auf.

Anzahl unsicherer Bilanzgrössen (Zufallsvariablen), die zur Berechnung der Stoffbilanzen der NABO-Parzellen berücksichtigt wurden

	Cd	Pb	Cu	Zn	Verteilungstyp
Atmosphärische Deposition[1]	1	1	1	1	lognormal
Hofdünger[2]					
Konzentration	11	11	10	13	lognormal
Menge	11	11	10	13	uniform
Mineraldünger[3]					
Konzentration	3	14	9	15	lognormal
Menge	3	14	9	15	uniform
Klärschlamm[4]					
Konzentration	5	9	8	10	lognormal
Menge	0	0	0	0	–
Pestizide[5]					
Konzentration	0	0	0	0	–
Menge	0	0	17	18	uniform
Kulturpflanzen[6]					
Konzentration	12	11	12	12	lognormal
Menge	0	0	0	0	–
Anzahl Zufallsvariablen pro Bilanz	46	71	76	97	

[1] Flux Deposition in g/ha und Jahr; [2] Konzentration im Hofdünger und Mengen von unterschiedlichen Tierkategorien und Betrieben; [3] Konzentration und Mengen von unterschiedlichen Mineraldüngern; [4] Konzentration im Klärschlamm mit unterschiedlicher Herkunft; [5] Applikationsmengen verschiedener Pestizide; [6] Konzentration in unterschiedlichen Kulturtypen.

Tabelle 5

Neben den Konzentrationsdaten sind auch die Angaben zu den Mengen der Hof- und Mineraldünger sowie der Pflanzenschutzmittel mit einer Unschärfe behaftet. Aufgrund von Erfahrungswerten in der landwirtschaftlichen Beratung wurde angenommen, dass die Mengenangaben für diese Hilfsstoffe um bis zu 10% variieren können. Für die Stoffbilanzen wurde deshalb für eine Güllegabe von beispielsweise 20 m^3/ha Werte von 18 bis 22 m^3/ha als gleich wahrscheinlich (d.h. uniform verteilt) berücksichtigt. Eine zehnprozentige Unsicherheit der Mengenangaben entspricht ausserdem der Toleranz für Stickstoff- und Phosphorbilanzen im Rahmen des öLN.

2.3.3 Simulation

Sind die ZV ausgewählt und quantifiziert, können beliebig viele Werte aus der theoretischen Verteilung generiert werden. Für jeden dieser Werte wird die Stoffbilanz erneut berechnet. In dieser Studie wurden die Werte der ZV mit der Methode «Latin Hypercube» simuliert (McKay *et al.* 1979). Im Gegensatz zur herkömmlichen Simulation von Parameterwerten mit der Monte-Carlo-Methode, in der aus dem ganzen Parameterbereich zufällig Werte generiert werden, wird mit der «Latin Hypercube»-Methode der Bereich eines Parameters zuerst stratifiziert. Dann werden die Werte entsprechend der vorgegebenen theoretischen Verteilung systematisch aus den Straten gezogen. Dies hat den Vorteil, dass mit erheblich weniger generierten Werten bereits eine erwartungstreue Stichprobe einer ZV erreicht werden kann. In dieser Studie wurden für alle Stoffbilanzen jeweils 1000 Werte für eine ZV generiert.

2.3.4 Unsicherheitsanteile

Inwiefern die Streuung der ZV zur Streuung der berechneten Nettobilanz beiträgt, wird mit dem Unsicherheitsanteil einer ZV angegeben. Je nach Bilanzmodell und Anwendungsfall können sich verschiedene Masszahlen eignen, um die Unsicherheitsanteile adäquat zu bestimmen (Saltelli *et al.* 2004). In dieser Studie wurde der Beitrag einer unsicheren Bilanzierungsgrösse (Zufallsvariable X_i) zu der Streuung des Bilanzierungsergebnisses (Nettobilanz Y) mit Hilfe eines multiplen Regressionsmodells bestimmt:

$$Y_j = b_0 + \sum_{i=l}^{p} b_i X_i + \varepsilon_j \qquad \mathrm{j} = 1, \ldots, N \qquad [1]$$

b_0 und b_i sind dabei die Regressionskoeffizienten, ε_j steht für die Residuen, p ist die Anzahl der Zufallsvariablen, und N ist die Anzahl der simulierten Werte. Die Residuen werden als normalverteilt mit Mittelwert Null und Varianz σ^2_ε angenommen. Für jede Zufallsvariable wurde der Beitrag zur Unsicherheit als standardisierter Regressionskoeffizient *(SRC)* (Janssen 1994) wie folgt berechnet:

$$SRC_i = b_i \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Y} \qquad i = 1, \ldots, p \qquad [2]$$

σ_Y ist die Standardabweichung von Y, und σ_{Xi} die Standardabweichung von der Zufallsvariable X_i. Der *SRC* gibt somit die relative Änderung in der Nettobilanz ΔY zur relativen Änderung der Zufallsvariable ΔX_i an, wobei beide relativen Änderungen mit der jeweiligen Standardabweichung normiert wurden. Die Unsicherheitsanteile werden in dieser Studie in Bezug zum Variationskoeffizienten der Nettofluxe dargestellt. Hierzu wurden die SRC-Anteile der unsicheren Bilanzgrössen (ausgedrückt in Prozent der Summe aller SRC-Werte) proportional auf den Variationskoeffizient der Nettobilanz bezogen.

Um den Einfluss von extremen Werten auf die Bestimmung der Unsicherheitsanteile zu beschränken und damit die Unsicherheitsanalyse zuverlässiger zu gestalten, wurde eine robuste Regressionsmethode verwendet (Keller *et al.* 2002). Zur Bestimmung der Lage- und Streuungsparameter wurden der Median sowie die robuste Standardabweichung (std_{MAV}, median absolute deviation) nach Huber (1981) verwendet:

$$std_{MAV} = median\left| x_i - median(x) \right| / 0.6745 \qquad [3]$$

2.4 Grafische Aufbereitung

Angesichts der grossen Anzahl von Bilanzen kann mit Hilfe von Tabellen und Zahlenwerten kaum ein Überblick über die Berechnungsergebnisse gewonnen werden. Um die wesentlichen Merkmale und Unterschiede zwischen den Stoffbilanzen zu erkennen, wurden die Bilanzen auf eine grafische Art und Weise aufbereitet. Die Darstellung der 48 Bilanzen und Unsicherheitsanalysen für ein Schwermetall besteht jeweils aus folgenden drei Teilgrafiken:

a) Die Verteilung der Nettofluxe anhand von Boxplots. In Anhang 6 sind die statistischen Kenngrössen der Boxplot-Darstellung erläutert.

b) Der Anteil der einzelnen Einträge am Gesamteintrag (in %, auf der Y-Achse nach oben) sowie der Anteil des Stoffaustrags über die Ernte gegenüber dem Gesamteintrag (in %, auf der Y-Achse nach unten). Werden dem Boden mit den Pflanzen über 100% des eingetragenen Stoffs wieder entzogen, resultiert ein negativer Nettoflux.

c) Variationskoeffizient der Nettofluxe (in %) und Unsicherheitsanteile (siehe oben). Die einzelnen Unsicherheitsanteile wurden für jeden Eintragspfad sowie für die Konzentrationen (c) und Mengen (m) der Hilfsstoffe und Erntegüter, die die ZV betreffen, summiert. Wird beispielsweise ein Variationskoeffizient zu einem gewissen Anteil von der Unsicherheit in den Stoffkonzentrationen im Hofdünger bestimmt, kann dieser Unsicherheitsanteil von mehreren Hofdüngertypen verursacht werden.

3 Ergebnisse

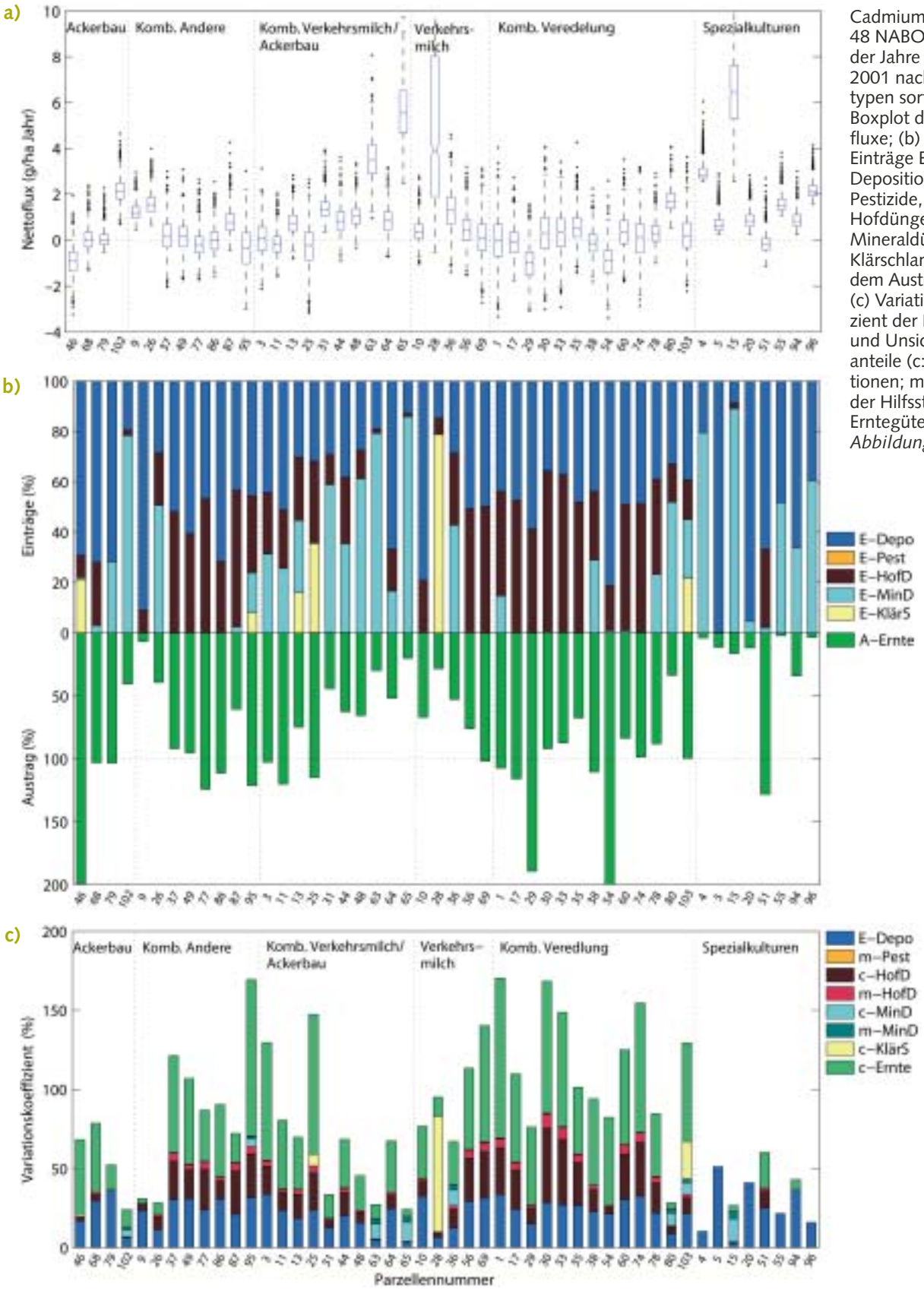
3.1 Stoffbilanzen der NABO Parzellen nach Betriebstyp

3.1.1 Cadmium

Die Ein- und Austräge von Cd waren für die meisten der 48 Parzellen ausgeglichen (Abbildung 6a). Anhang 7 zeigt die berechneten Werte für die Ein- und Austräge von Cd. Der Cd-Nettoflux der 48 NABO-Parzellen variierte zwischen –1,1 und 6,2 g/ha und Jahr. Für einige Parzellen mit vermehrten Mineraldüngergaben wurden Cd-Nettofluxe von mehr als 2,0 g/ha und Jahr festgestellt (Standortnummern 4, 15, 63, 65 und 102). Hierbei handelte es sich um Supertriple, Thomaskorn und binären Phosphor-Kaliumdünger. Der erhöhte Cd-Eintrag auf der Parzelle Nr. 28 wurde durch Klärschlamm verursacht.

Insgesamt waren die Unterschiede der Cd-Bilanzen zwischen den Betriebstypen gering. Die Cd-Nettofluxe werden vom Düngungsregime nur vereinzelt stark beeinflusst. Die Einflüsse der atmosphärischen Deposition sowie der pflanzenspezifischen Cd-Aufnahme spielten eine weitaus grössere Rolle für den Cd-Haushalt im Oberboden (Abbildung 6b). Neben den Zunahmen konnten vor allem bei Fruchtfolgen mit Körner- oder Silomais auch Abnahmen von Cd im Boden verzeichnet werden. Der Austrag von Cd auf Naturwiesen und Weiden wurde in der Regel durch die Cd-Einträge über die atmosphärische Deposition und die Hofdünger wieder kompensiert. Der berechnete Eintrag aus der atmosphärischen Deposition variierte zwischen 0,6 und 0,9 g/ha und Jahr. Durchschnittlich trug er 40% zu den gesamten Cd-Einträgen auf den Parzellen bei.

Die Variationskoeffizienten der Cd-Bilanzen betrugen teilweise bis zu 170%. Allerdings galt dies vor allem für ausgeglichene Cd-Bilanzen (Abbildung 6c). Im Durchschnitt betrug der Variationskoeffizient 76%. Für die Hälfte der Parzellen lagen die Werte zwischen 42 und 112%. Diese Streuung in den Cd-Bilanzen wurde überwiegend durch Unsicherheiten in den Bilanzdaten für Cd-Konzentrationen der Kulturen und durch die Variation der atmosphärischen Deposition verursacht. Die Streuung von Messdaten der Cd-Konzentration in verschiedenen Hofdüngertypen trug hierzu nur unwesentlich bei.



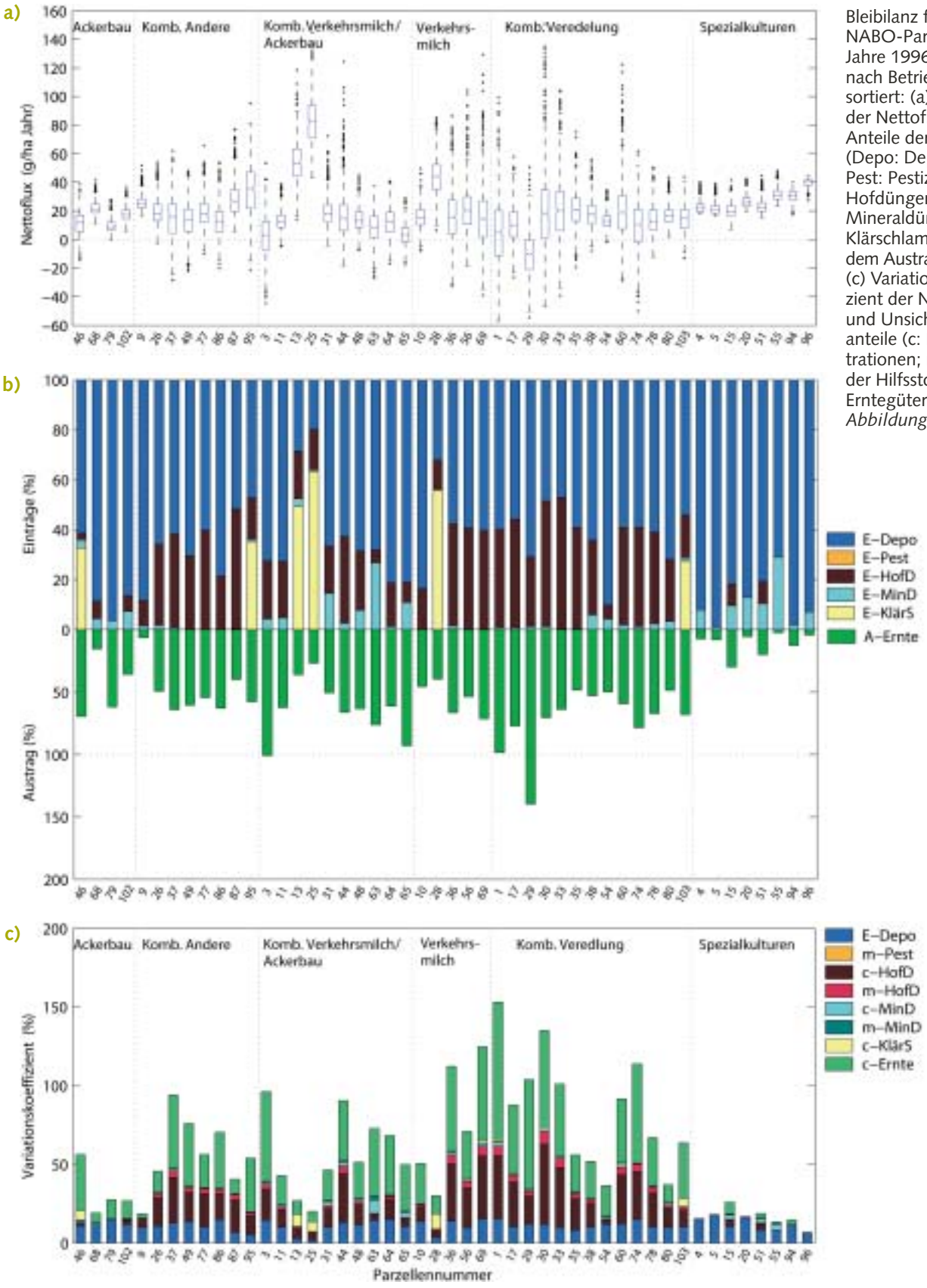
Cadmiumbilanz für 48 NABO-Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 nach Betriebstypen sortiert: (a) Boxplot der Nettofluxe; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 6a–6c*

3.1.2 Blei

Der Pb-Nettoflux der Parzellen lag zwischen –10,5 und 81,5 g/ha und Jahr. Die meisten Parzellen wiesen einen Pb-Nettoflux von 10 bis 30 g/ha und Jahr auf (Abbildung 7a). Werte von mehr als 40 g/ha und Jahr wurden für drei Parzellen verzeichnet. Diese Werte waren auf Klärschlammgaben zurückzuführen (Standortnummern 13, 25 und 28). Dies zeigt, dass selbst geringe Klärschlammgaben einen grossen Einfluss auf den Schwermetallhaushalt im Boden haben können. In Anhang 8 sind die berechneten Ein- und Austräge von Pb für alle Parzellen aufgelistet.

Ähnlich wie bei Cd wird die Pb-Bilanz der Parzellen vor allem vom atmosphärischen Eintrag bestimmt und weniger von der betriebsspezifischen Nutzung. Der atmosphärische Eintrag dominierte den Pb-Eintrag auf den Parzellen mit durchschnittlich 70%. Lediglich auf Parzellen von «Kombinierten Veredlungsbetrieben» und «Kombiniert Anderen» betrug der geschätzte Pb-Eintrag durch Hofdünger bis zu 40% der gesamten Einträge. In der Regel wurde aber die Hälfte der Pb-Einträge dem Boden wieder mit dem Erntegut entzogen (Abbildung 7b).

Trotz der Bedeutung der atmosphärischen Deposition für die Pb-Bilanzen trug die Streuung der Pb-Depositionsraten kaum nennenswert zu der Unsicherheit der Pb-Nettofluxe bei (Abbildung 7c). Diese wurde vielmehr durch die Streuung der Messdaten für die Pb-Konzentration in verschiedenen Pflanzen und Hofdüngertypen verursacht. Der durchschnittliche Variationskoeffizient der Pb-Nettofluxe lag bei 51%. Für die Hälfte der Parzellen lag dieser Wert zwischen 27% und 82%.



Bleibilanz für 48 NABO-Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 nach Betriebstypen sortiert: (a) Boxplot der Nettofluxe; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 7a–7c*

3.1.3 Kupfer

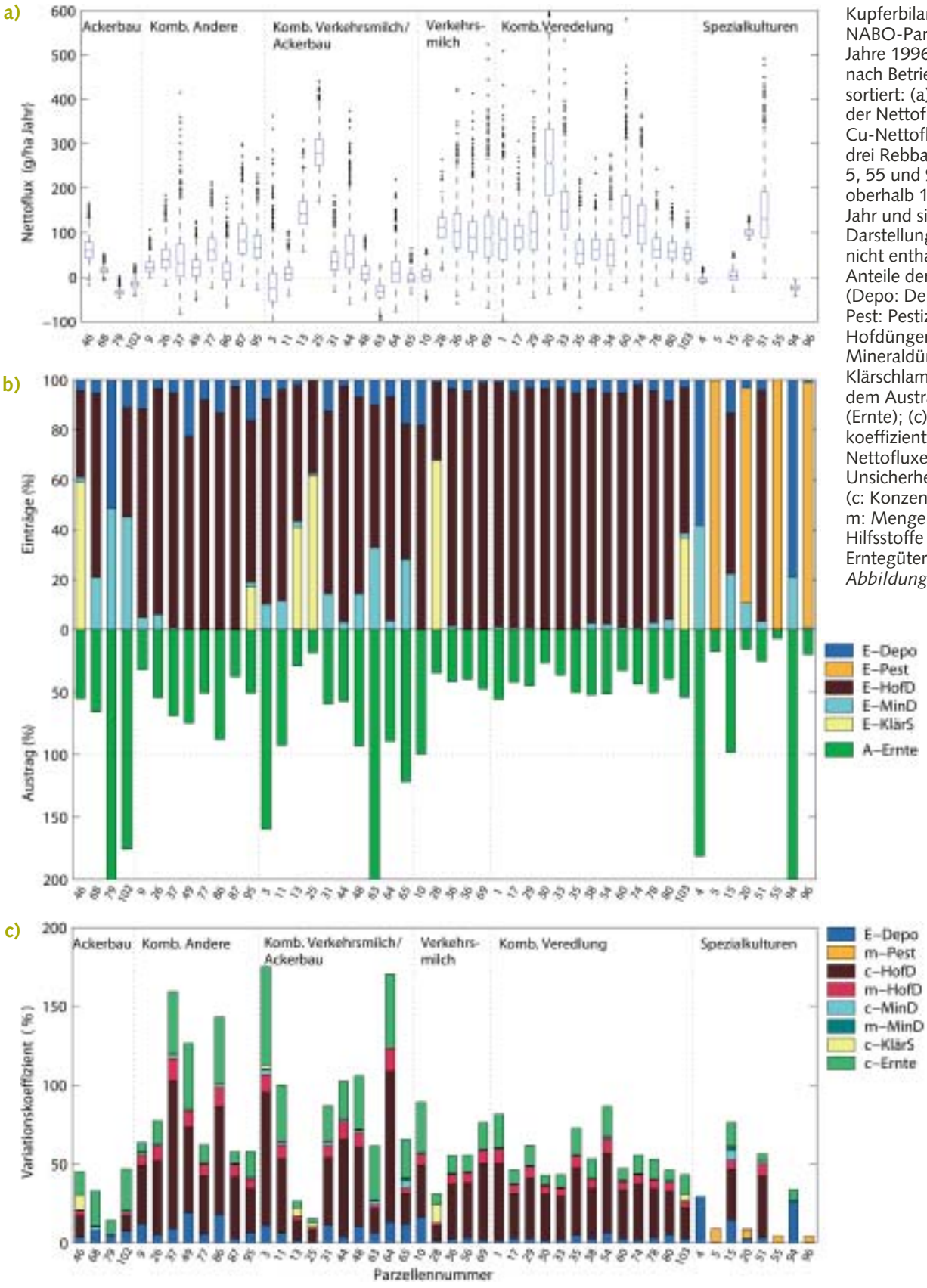
Das Muster der Cu-Bilanzen für die NABO-Parzellen kann auf mehrere unterschiedliche Eintragspfade zurückgeführt werden. Die regelmässige Anwendung von Cu-haltigen Pflanzenschutzmitteln führte bei drei Rebbauparzellen (5, 55 und 96) zu Cu-Nettofluxe von 1472 bis 2174 g/ha und Jahr (siehe Kap. 2.2.2). Aus Darstellungsgründen sind diese Nettofluxe nicht in Abbildung 8a enthalten. Eine komplette Auflistung der Cu-Bilanzen findet sich in Anhang 9. Die Cu-Konzentration im Boden der drei Rebbauparzellen überschreitet den Richtwert von 40 mg/kg (VBBo 1998) um das fünf- bis zehnfache. Dies lässt eine intensive Anwendung der Pflanzenschutzmittel über Jahrzehnte hinweg vermuten.

Auch der Einsatz von Klärschlamm kann die Cu-Bilanz stark beeinflussen (Abbildung 8b). Für die oben genannten Parzellen mit Klärschlammgaben trug der Abfalldünger bis zu 60% der gesamten Cu-Einträge bei. Neben diesen dominanten Cu-Einträgen für einzelne Parzellen hingen die Cu-Nettofluxe der Parzellen stark vom Hofdüngereinsatz und damit vom Betriebstyp ab. Die grössten Cu-Einträge durch Hofdünger wurden bei den Betrieben mit dem höchsten Tierbesatz pro landwirtschaftlicher Nutzfläche («Kombiniert Veredlung», «Verkehrsmilch») festgestellt. Die Cu-Nettofluxe dieser Betriebe lagen zwischen 101 und 279 g/ha und Jahr und wurden nahezu vollständig vom Cu-Eintrag durch Hofdünger bestimmt (Abbildung 8b). Der grösste Cu-Entzug von –36 g/ha und Jahr wurde auf einer Parzelle eines Ackerbaubetriebs (Standortnummer 79) festgestellt.

Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, können die erhöhten Cu-Einträge durch Hofdünger vor allem auf den Einsatz von Cu-haltigen Futtermittelzusatzstoffen zurückgeführt werden. Schultheiss *et al.* (2004) zeigten für 20 Tierproduktionsbetriebe in Deutschland, dass Futtermittel und Futterzusatzstoffe die wesentlichen Eintragsquellen für Cu und Zn im Hofdünger – und damit für die mit Hofdünger gedüngten Böden – darstellen.

Bei der Mehrzahl der NABO-Parzellen wurden 40 bis 60% der Cu-Einträge wieder über das Erntegut dem Boden entzogen. Die atmogenen Cu-Einträge lagen zwischen 1,7 und 21,5 g/ha und Jahr und trugen in Betrieben mit Viehhaltung weniger als zehn Prozent zu den Gesamteinträgen bei.

Der Variationskoeffizient der Cu-Nettofluxe war im Mittel 56% und lag für die Hälfte der Parzellen zwischen 43% und 80% (Abbildung 8c). Der grösste Unsicherheitsanteil resultierte aus der Streuung der Cu-Konzentrationen verschiedener Hofdüngertypen. Dies gilt insbesondere für Vollgülle aus der Rinder- und Schweinemast. Die Annahme, dass die Applikationsmengen der Pflanzenschutzmittel im Rebbau mit einer Unsicherheit von 10% behaftet sind, führt für diese Parzellen wegen der hohen Cu-Nettofluxe nur zu relativ geringen Variationskoeffizienten.



Kupferbilanz für 48 NABO-Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 nach Betriebstypen sortiert: (a) Boxplot der Nettofluxe, die Cu-Nettofluxe der drei Rebbaustandorte 5, 55 und 96 liegen oberhalb 1000 g/ha Jahr und sind aus Darstellungsgründen nicht enthalten; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 8a–8c*

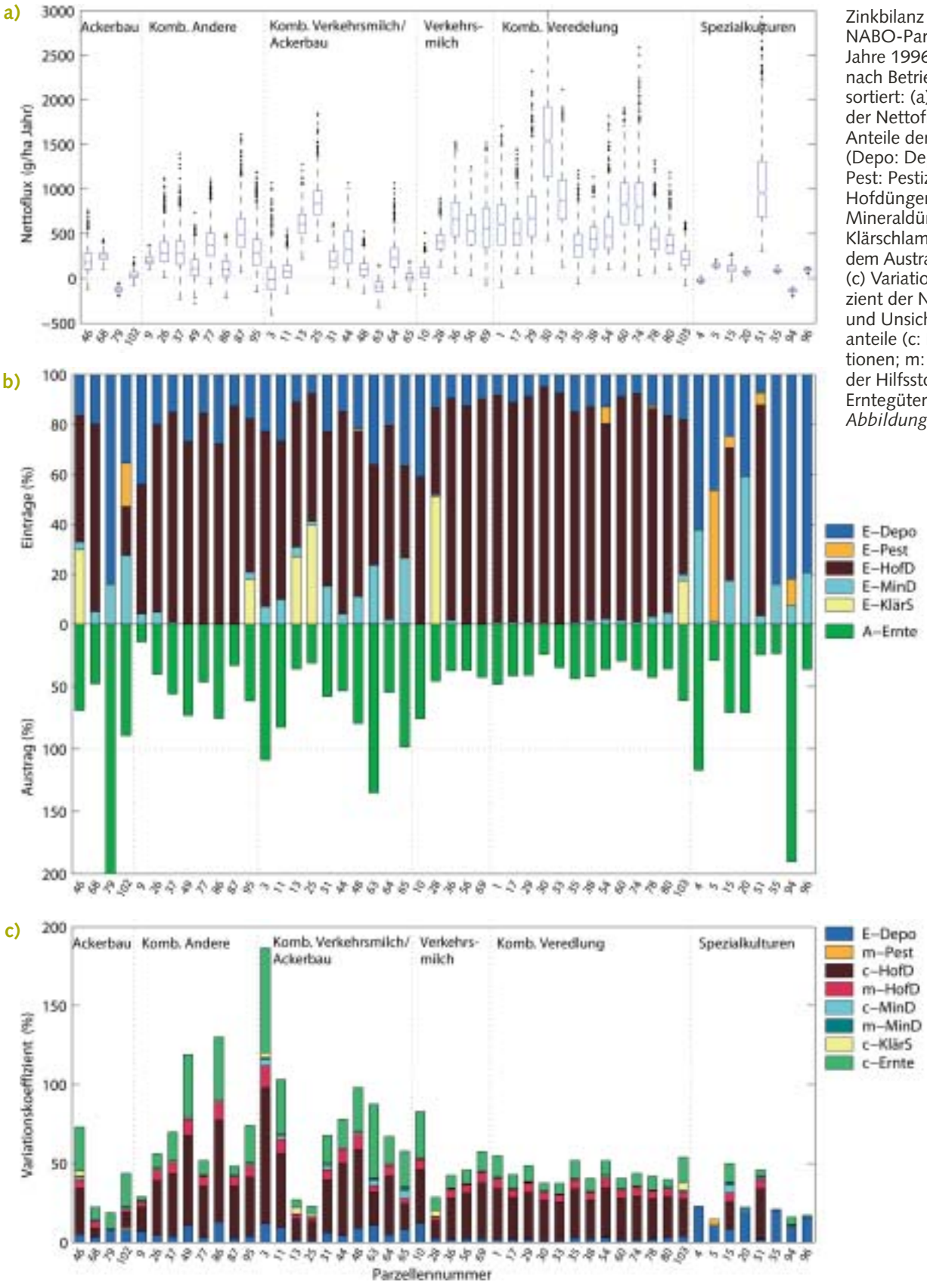
3.1.4 Zink

Da Zn ein bedeutendes Makroelement in Futtermittelzusatzstoffen für die Tierhaltung ist, werden die Zn-Bilanzen der Parzellen ähnlich wie beim Cu vom Hofdüngereinsatz dominiert. Der Zn-Eintrag über die Hofdünger lag für Tierhaltungsbetriebe zwischen 310 und 1900 g/ha und Jahr und dominierte für diese Betriebe die Zn-Bilanz. Für eine Wiese eines kombinierten Veredlungsbetriebs (Parzelle Nr. 30) mit einem Viehbesatz von 2,8 GVE/ha und hohen Hofdüngergaben lag der Zn-Nettoflux bei 1,54 kg/ha und Jahr.

Die Zn-Nettofluxe der restlichen NABO-Parzellen variierten zwischen –129 und 952 g/ha und Jahr. Niedrige oder negative Zn-Nettofluxe wurden in der Regel für Parzellen mit keinem oder geringem Hofdüngereinsatz festgestellt (Abbildung 9a). Anhang 10 zeigt die Ein- und Austräge der Zinkbilanzen.

Weitere bedeutende Zn-Fluxe waren die atmosphärische Deposition mit Werten von 80 bis 127 g/ha und Jahr sowie der Austrag über das Erntegut mit 30 bis 540 g/ha und Jahr. In der Regel wurde dem Boden aber weniger als 50% des eingetragenen Zn wieder durch die Pflanzen entzogen (Abbildung 9b). Für einige Parzellen waren ausserdem Zn-Einträge über Pflanzenschutzmittel (Parzelle Nr. 5) oder Klärschlamm relevant.

Aufgrund von unsicheren Bilanzgrössen streute der Zn-Nettoflux in der Regel zwischen 33 und 67%. Der durchschnittliche Variationskoeffizient betrug 56% (Abbildung 9c). Wie bei den Cu-Bilanzen trug die Streuung in den Messdaten der Zn-Konzentration verschiedener Hofdünger am meisten zu der Unsicherheit der Zn-Nettofluxe bei.



Zinkbilanz für 48 NABO-Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 nach Betriebstypen sortiert: (a) Boxplot der Nettofluxe; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 9a–9c*

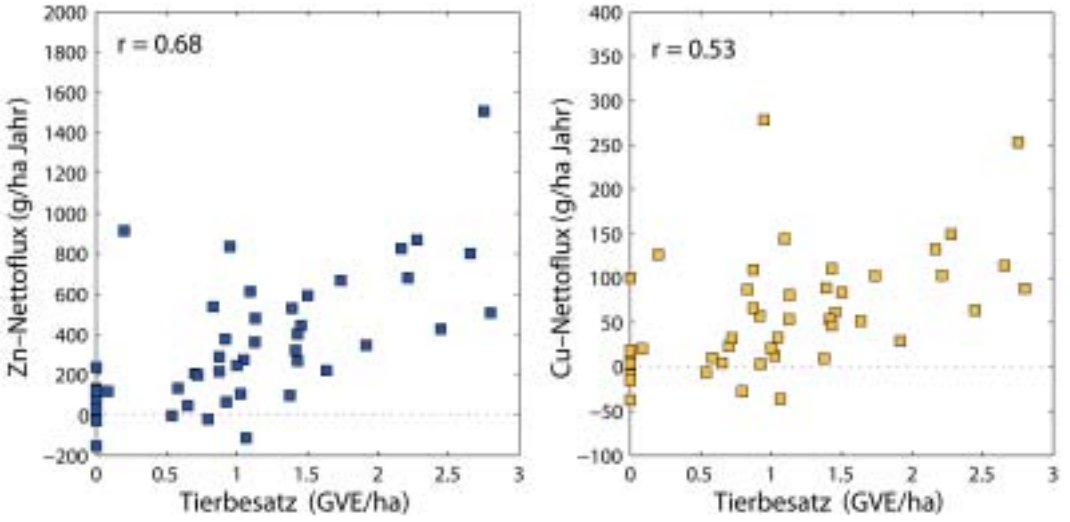
3.1.5 Düngung und Stoffbilanzen

Die Parzellen mit erhöhten Cu- und Zn-Einträgen wurden in der Regel von Betrieben mit mittlerer bis hoher Tierdichte bewirtschaftet. Insgesamt korrelierte der Tierbesatz der Betriebe – ausgedrückt in GVE/ha – mit den Zn- und Cu-Nettofluxen der NABO-Parzellen (Abbildung 10). Die Zn-Nettofluxe zeigten mit einem Korrelationskoeffizienten von r = 0,68 einen etwas stärkeren Zusammenhang mit dem Tierbesatz der Betriebe als die Cu-Nettofluxe (r = 0,59).

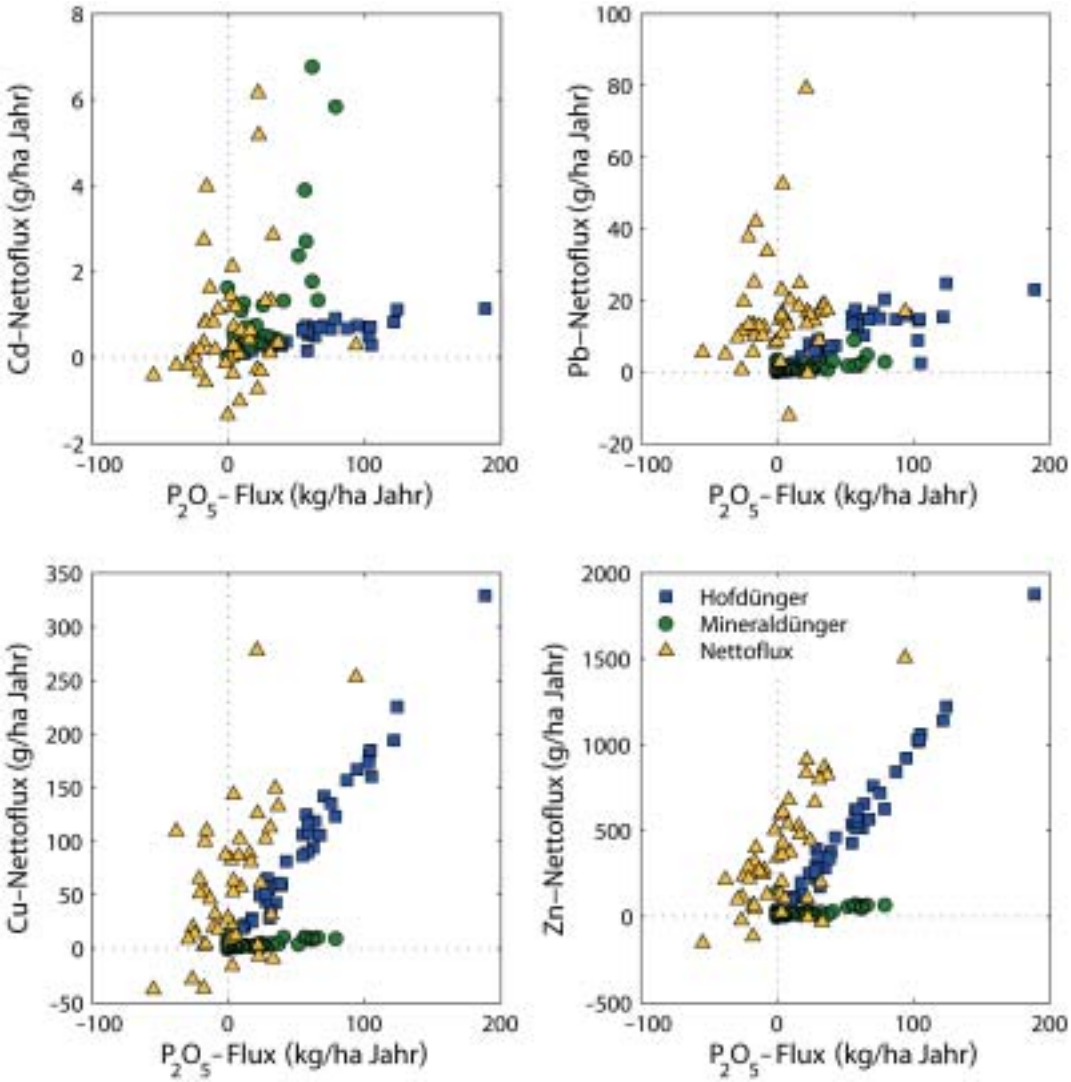
Auf den Betrieben mit mittlerer bis hoher Tierdichte wurde die P-Bilanz der NABO-Parzellen fast ausschliesslich vom P-Eintrag über die Hofdünger bestimmt. Dies hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Cd-, Pb-, Cu- und Zn-Bilanzen (Abbildung 11). Während die Cu- und Zn-Einträge stark mit den P-Einträgen über Hofdünger zunehmen, verursacht die P-Düngung über Mineraldünger sehr geringe Einträge dieser beiden Elemente. Für die Cd-Bilanz verhält es sich hingegen genau umgekehrt. Vermehrte Gaben bestimmter Mineraldüngertypen verursachten Cd-Einträge von bis zu 6 g/ha und Jahr. Für Pb spielt das Düngungsregime nur eine untergeordnete Rolle. Diese Zusammenhänge sind in qualitativer Hinsicht bekannt, können aber nun anhand der 48 NABO-Parzellen mit unterschiedlicher Nutzung und für unterschiedliche Betriebstypen quantifiziert werden.

3.2 Stoffbilanzen der NABO Parzellen nach Kulturtyp

Die Stoffbilanz einzelner Kulturen gibt einen generellen Überblick über die kulturspezifische Bewirtschaftungsweise. Da jedoch nicht jeder Hilfsstoffeinsatz direkt einer Kultur zugeordnet werden kann, gestatten die Stoffbilanzen der Kulturen nur einen tendenziellen Vergleich. Die Stoffbilanzen beziehen sich auf 562 Parzellen von 48 Betrieben, für die im Bilanzzeitraum 1996 bis 2001 die Bewirtschaftung erfasst wurde. Die Kulturen (siehe Tabelle 3) sind nachfolgend in die Gruppen Getreide, Hackfrüchte und Leguminosen, Wiesen und Weiden sowie Spezialkulturen unterteilt.



Zusammenhang zwischen Tierbesatz der Betriebe in Grossvieheinheiten pro Hektare (GVE/ha) und Zink- und Kupfer-Nettofluxe (r: Spearman Rangkorrelation)
Abbildung 10



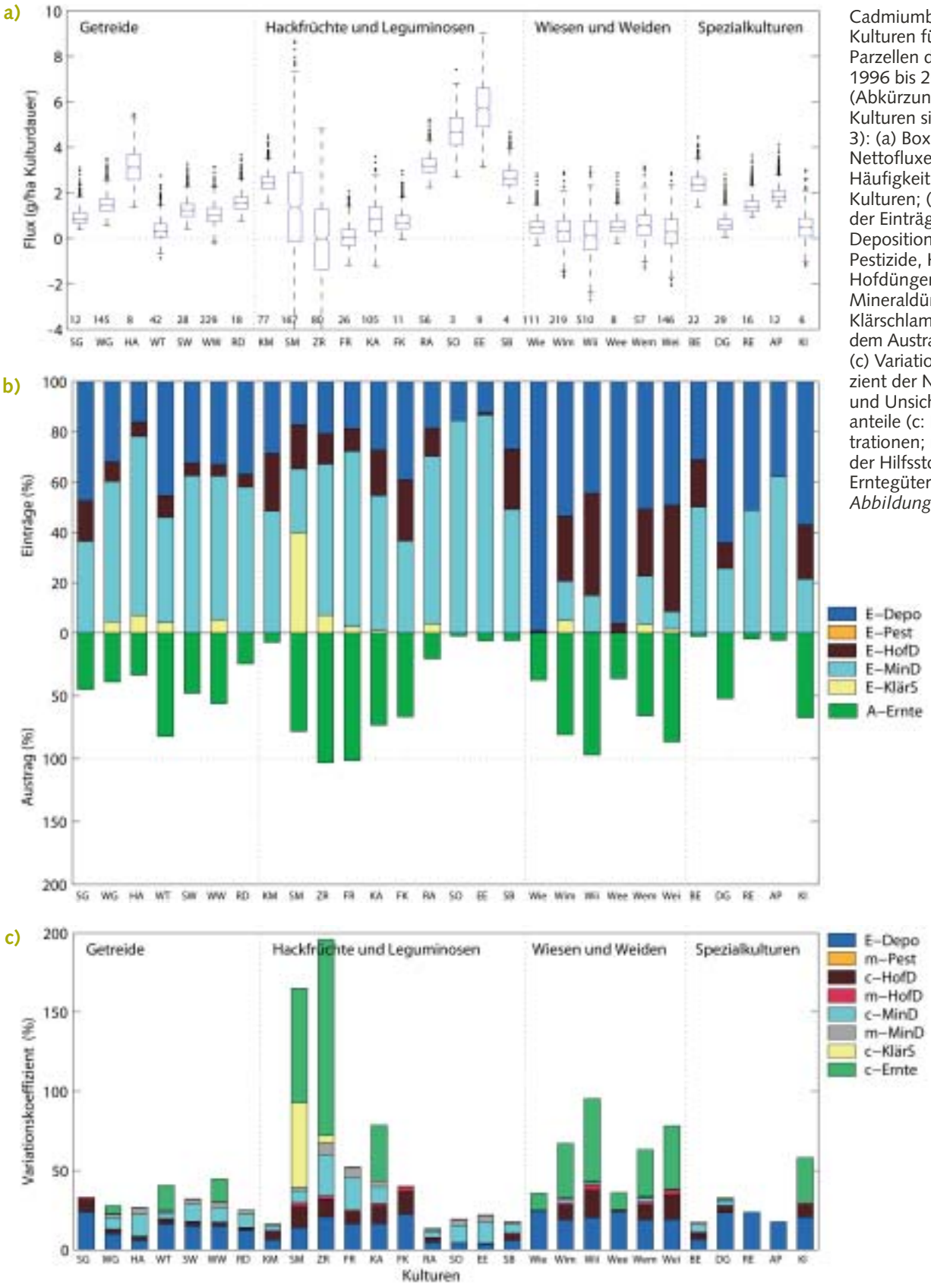
Phosphordüngung mit Hof- und Mineraldünger auf den NABO-Parzellen und berechnete Schwermetalleinträge (Phosphor berechnet in kg P_2O_5).
Abbildung 11

3.2.1 Cadmium

Im Gegensatz zu den parzellenbezogenen Bilanzen weisen die kulturspezifischen Cd-Nettofluxe deutliche Unterschiede auf (Abbildung 12a). Kulturen wie Getreide, Hackfrüchte, Leguminosen und einige Spezialkulturen, die vermehrte P-Düngergaben mit Mineraldünger erhielten, wiesen erhöhte Cd-Nettofluxe auf. Die erhöhten Cd-Nettofluxe von bis zu 6 g/ha und Kulturdauer für Eiweisserbsen, Soja sowie Hafer sind angesichts der geringen Stichprobenzahlen wenig aussagekräftig. Diese Kulturen wurden zwischen 1996 und 2001 auf den 562 Parzellen weniger als zehn Mal angebaut. Einzig der erhöhte Cd-Nettoflux für Raps von 3,2 g/ha und Kulturdauer basiert auf einem grösseren Stichprobenumfang. Die vollständige Cd-Bilanz der Kulturen findet sich in Anhang 11.

Die Cd-Einträge – im Wesentlichen verursacht durch die atmosphärische Deposition und durch Mineraldünger – wurden bei Wintertriticale, Silomais, Zucker- und Futterrüben, Kartoffeln und Frühkartoffeln sowie bei mittelintensiven und intensiven Wiesen und Weiden zu einem grossen Teil wieder durch den Austrag des Ernteguts kompensiert (Abbildung 12b).

Im Gegensatz zu der Unsicherheitsanalyse der parzellenbezogenen Cd-Bilanzen verdeutlicht die kulturspezifische Cd-Bilanz den Einfluss von unsicheren Cd-Konzentrationsdaten der Pflanzen auf die Gesamtbilanz (Abbildung 12c). Die Streuungen der Cd-Nettofluxe von Zuckerrüben, Silomais, Kartoffeln sowie Wiesen und Weiden waren sehr sensitiv auf die Unsicherheiten in den Messdaten für die Cd-Konzentrationen.

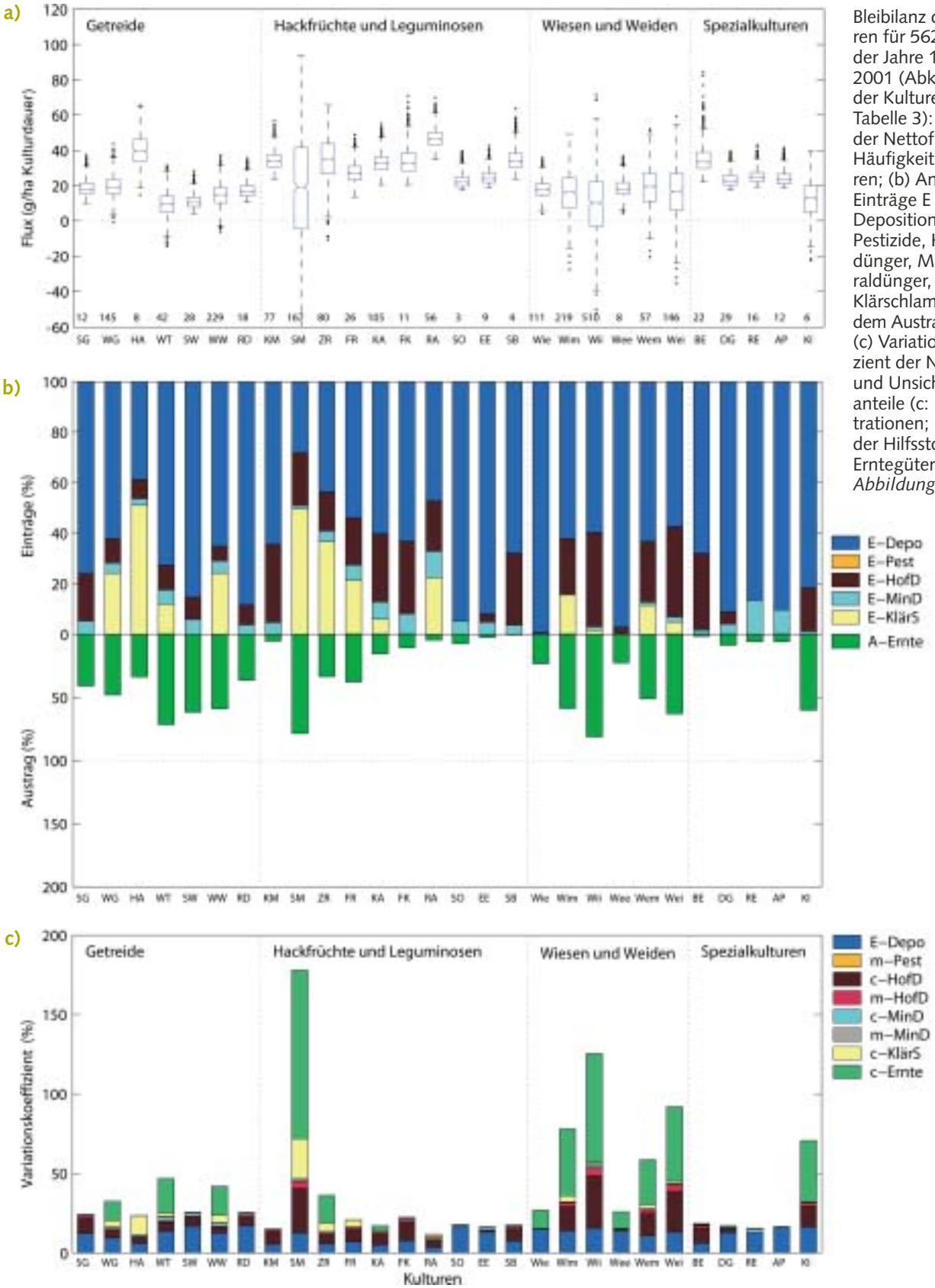


Cadmiumbilanz der Kulturen für 562 Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 (Abkürzungen der Kulturen siehe Tabelle 3): (a) Boxplot der Nettofluxe und Häufigkeit der Kulturen; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, Klär5: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 12a–12c*

3.2.2 Blei

Die Pb-Bilanzen zeigten zwischen den Kulturen nur geringfügige Unterschiede. Der Pb-Nettoflux variierte zwischen 9,4 g/ha und Jahr für Triticale und 46,2 g/ha und Jahr für Raps (Abbildung 13a). Die Einträge wurden durchschnittlich zu 70% durch Einträge über die atmosphärische Deposition bestimmt. Der Pb-Eintrag über Klärschlamm trug für Silomais und Hafer gemittelt über alle 562 Parzellen bis zu 50% der gesamten Pb-Einträge bei (Abbildung 13b). Etwa die Hälfte der Pb-Einträge wurde dem Boden bei Parzellen mit Getreideanbau, Silomais, Zucker- und Futterrüben sowie mittelintensiven und intensiven Wiesen und Weiden wieder entzogen. Die Pb-Bilanz der Kulturen findet sich in Anhang 12.

Der Variationskoeffizient der Pb-Nettofluxe lag für die Kulturen in der Regel bei 20 bis 30% (Abbildung 13c). Lediglich Silomais und mittelintensive und intensive Wiesen und Weiden wiesen aufgrund von unsicheren Pb-Konzentrationen Variationskoeffizienten von bis zu 170% auf.

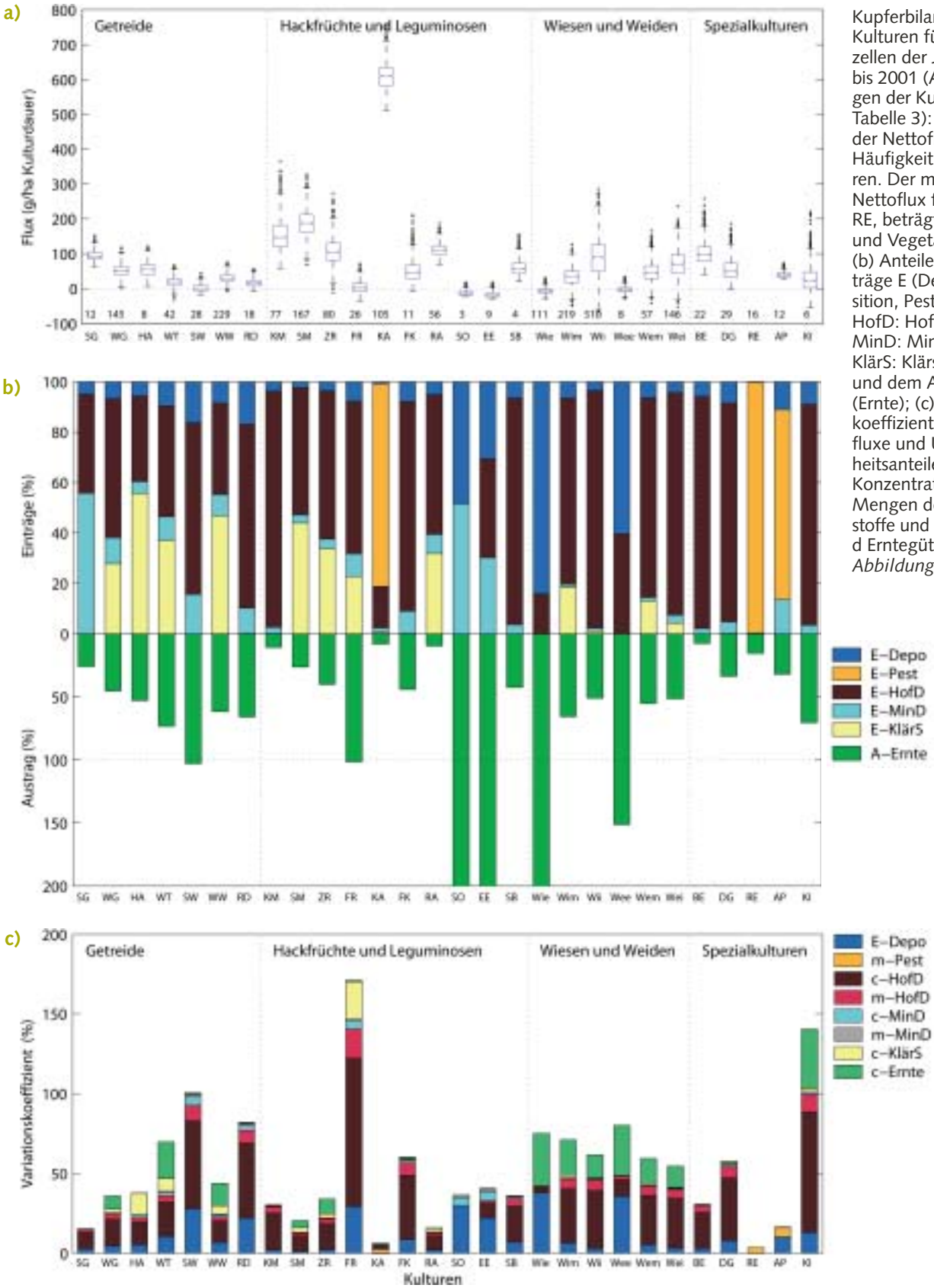


Bleibilanz der Kulturen für 562 Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 (Abkürzungen der Kulturen siehe Tabelle 3): (a) Boxplot der Nettofluxe und Häufigkeit der Kulturen; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 13a–13c*

3.2.3 Kupfer

Die parzellenbezogene Cu-Bilanz für die drei Rebbauparzellen entsprach der kulturspezifischen Cu-Bilanz. Der mittlere Cu-Nettoflux betrug aufgrund der Cu-haltigen Fungizide für Reben 1747 g/ha und Kulturdauer. Fungizide im Kartoffelbau verursachten ebenfalls einen stark erhöhten Cu-Nettoflux von durchschnittlich 609 g/ha und Kulturdauer (Abbildung 14a). Die Anwendung von Cu-haltigen Fungiziden im Obstbau (Äpfel) führte dagegen aufgrund geringer Applikationsmengen zu keinen bedeutenden Cu-Einträgen.

Erhöhte Cu-Nettofluxe von etwa 100 bis 200 g/ha und Kulturdauer wurden für Körner- und Silomais, Zuckerrüben, Raps sowie intensive Wiesen und Weiden festgestellt. Der Cu-Eintrag für diese Kulturen war im Wesentlichen auf Hofdünger und Klärschlamm zurückzuführen (Abbildung 14b). Die Cu-Bilanz der Kulturen findet sich in Anhang 13. Die Unsicherheit der Nettofluxe mit Variationskoeffizienten von 40 bis 80% wurden vor allem von unsicheren Messdaten für Cu-Gehalte in den Hofdüngern verursacht (Abbildung 14c).



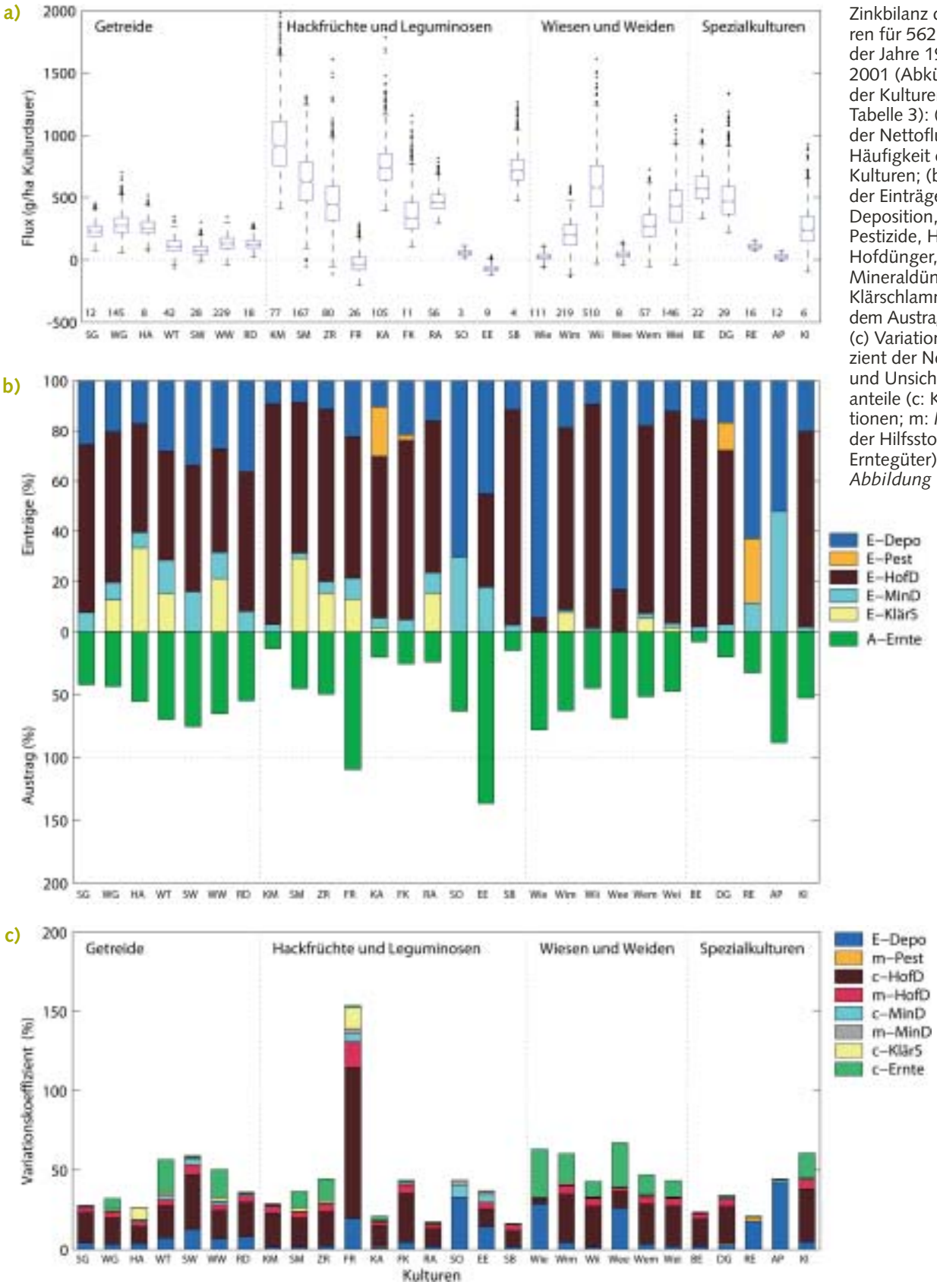
Kupferbilanz der Kulturen für 562 Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 (Abkürzungen der Kulturen siehe Tabelle 3): (a) Boxplot der Nettofluxe und Häufigkeit der Kulturen. Der mittlere Nettoflux für Reben, RE, beträgt 1747 g/ha und Vegetationszeit; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). d Erntegüter). *Abbildung 14a–14c*

3.2.4 Zink

Die Zn-Nettofluxe waren für einige Kulturen wie Futterrüben, Soja sowie extensive Wiesen und Weiden fast ausgeglichen. Für Getreide lagen diese bei etwa 100 bis 300 g/ha und Kulturdauer (Abbildung 15a). Erhöhte Zn-Einträge, welche vor allem auf Hofdünger zurückzuführen waren, wurden insbesondere für Silomais, Körnermais, Kartoffeln, Raps, Sonnenblumen, Bohnen und Erbsen, diverse Gemüse sowie intensiv genutzte Wiesen und Weiden festgestellt. Neben dem Hofdünger trug auch die atmosphärische Deposition, Klärschlamm sowie vereinzelt Pflanzenschutzmittel (Reben und Kartoffeln) und Mineraldünger (Sommerweizen, Soja und Äpfel) zu den Zn-Einträgen bei (Abbildung 15b). Die Zn-Bilanz der Kulturen ist in Anhang 14 aufgelistet.

Die Zn-Entzüge bei Getreide sowie bei Wiesen und Weiden waren etwa halb so gross wie die Zn-Einträge. Für Hackfrüchte, Leguminosen und Spezialkulturen war dieses Verhältnis sehr unterschiedlich. Daten aus der verwendeten Literatur zeigen, dass Silo- und Körnermais, Zucker- und Futterrüben sowie die intensiv genutzten Wiesen und Weiden dem Boden die höchsten Zn-Mengen entziehen können.

Wie bei den parzellenbezogenen Bilanzen wurde die Unsicherheit der kulturspezifischen Zn-Nettofluxe im Wesentlichen durch unsichere Zn-Konzentrationen der Hofdünger verursacht. Auch die Streuung der Zn-Konzentration von Futterpflanzen auf Wiesen und Weiden sowie von Triticale, Winterweizen, Silomais sowie Zuckerrüben trägt nennenswert zur Gesamtunsicherheit der Zn-Bilanz bei (Abbildung 15c). Die Zn-Nettofluxe der Kulturen streuten mit Ausnahme der Futterrüben etwa um 50% des Mittelwerts.



Zinkbilanz der Kulturen für 562 Parzellen der Jahre 1996 bis 2001 (Abkürzungen der Kulturen siehe Tabelle 3): (a) Boxplot der Nettofluxe und Häufigkeit der Kulturen; (b) Anteile der Einträge E (Depo: Deposition, Pest: Pestizide, HofD: Hofdünger, MinD: Mineraldünger, KlärS: Klärschlamm) und dem Austrag A (Ernte); (c) Variationskoeffizient der Nettofluxe und Unsicherheitsanteile (c: Konzentrationen; m: Mengen der Hilfsstoffe und Erntegüter). *Abbildung 15a–15c*

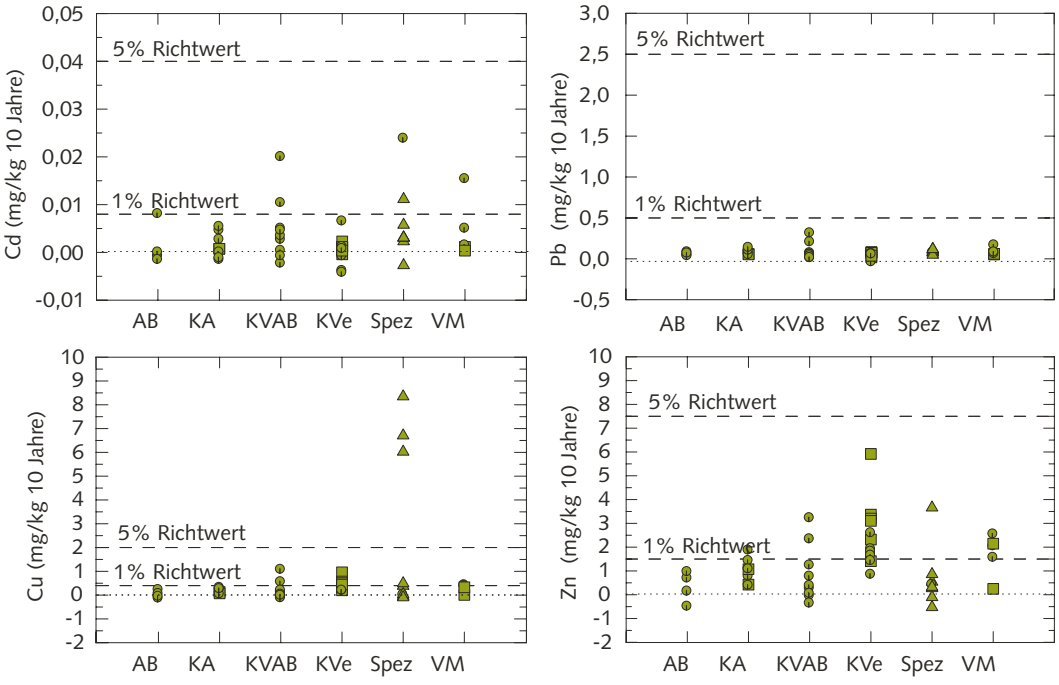
4 Diskussion

Relevanz der Stoffbilanzen

Die Beurteilung der langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist anhand der Stoffbilanzen nicht direkt möglich. Um die Ergebnisse von Stoffbilanzen mit der Beurteilung von Umweltrisiken verknüpfen zu können, werden unterschiedliche Ansätze angewandt. Im Konzept zur Berechnung der kritischen Einträge für Schwermetalle in Böden (UBA 2003) werden Nettofluxe über Transferfunktionen für Schwermetallgehalte im Boden mit jenen in der Bodenlösung verknüpft. Diese Nettofluxe werden für eine Risikobeurteilung der Bodenqualität und der Bodenorganismen herangezogen. Die Beurteilungsmethode erfordert allerdings eine grosse Anzahl von Messdaten zu Bodenparametern und toxikologischen Kennwerten von Bodenorganismen. Eine weitere Möglichkeit, die Relevanz von Stoffbilanzen zu beurteilen, stellen Indikatoren dar, die eine Stoffanreicherung im Boden den möglichen Risiken für die Boden-, Pflanzen- und Wasserqualität gegenüberstellen (Moolenaar *et al.* 1997).

In dieser Studie wurden zur Beurteilung der Relevanz der Bilanzen die mittleren parzellenbezogenen Stoffbilanzen der Jahre 1996 bis 2001 in Akkumulationsraten im Oberboden für ein Jahrzehnt umgerechnet und mit dem entsprechenden Richtwert der Schwermetalle (VBBo 1998) verglichen. Die Akkumulationsrate gibt somit eine transformierte und zeitlich gemittelte Stoffbilanz für die jeweilige Fruchtfolge der Parzellen wieder. Die Betrachtung über ein Jahrzehnt erlaubt eine erste Einschätzung zu möglichen langfristigen Stoffanreicherungen im Boden der NABO-Parzellen. Es gilt zu beachten, dass für den Vergleich mit gemessenen Bodenkonzentrationen der Bodentiefe 0 bis 20 cm die Akkumulationsraten sowohl für Ackerbauparzellen als auch für Wiesen und Weiden auf die Bodentiefe 0 bis 20 cm bezogen wurden. Die Anreicherung in den obersten Bodenzentimetern von Dauerwiesen und -weiden kann deshalb durchaus höher sein.

Die weitaus höchsten Akkumulationsraten von 5,7 bis 8,4 mg/kg in zehn Jahren wurden auf den drei Rebbaustandorten für Cu festgestellt (Abbildung 16). Innerhalb eines Jahrzehnts wäre somit eine Zunahme der Cu-Konzentration im Boden von 14 bis 21% des Cu-Richtwerts von 40 mg/kg zu erwarten. Die Cu-Konzentrationen im Oberboden der drei Rebbauparzellen



Stoffbilanzen transformiert in Akkumulationsraten im Oberboden (0 bis 20 cm) der 48 NABO-Parzellen für ein Jahrzehnt (AB: Ackerbau, KA: Komb. Andere, KVAB: Komb. Verkehrsmilch-Ackerbau, KVe: Komb. Veredlung, Spez: Spezialkulturen, VM: Verkehrsmilch). Die Symbole kennzeichnen die Nutzung der Parzellen: Wiesen und Weiden (■), Ackerbau (●) und Spezialkulturen(▲). *Abbildung 16*

variierten zwischen 223 und 456 mg/kg und überschritten den Richtwert um das fünf- bis elffache. Solch hohe Cu-Konzentrationen in Rebbauböden wurden hinreichend untersucht (Studer *et al.* 1995; Gsponer 1996). Die Akkumulationsraten dieser Studie deuten darauf hin, dass die Cu-Konzentration in rebbaulich genutzten Böden durch die Anwendung von Cu-haltigen Pflanzenschutzmitteln auch weiterhin zunehmen wird.

Elf NABO-Parzellen wiesen aufgrund der Hofdünger- und Klärschlammgaben erhöhte Cu-Akkumulationsraten von 1 bis 5% des Richtwerts auf (siehe Abbildung 16). Die Cu-Konzentrationen im Oberboden waren bei vier der elf Parzellen erhöht und lagen in der Höhe des Richtwerts. Für die restlichen sieben Parzellen wurden niedrige Cu-Konzentrationen im Boden gemessen.

Die Transformation der Zn-Nettofluxe führte zu zwanzig Parzellen mit Akkumulationsraten von >1 bis 5% des Richtwerts für Zn (150 mg/kg). Für die intensiv genutzte Wiese des kombinierten Veredlungsbetriebs mit dem höchsten Zn-Nettoflux (siehe Kapitel 3.1.4) lag die Zn-Akkumulationsrate bei 5,9 mg/kg in zehn Jahren. Die Zn-Konzentration im Oberboden dieser Parzelle lag bei 92,7 mg/kg und bestätigt prinzipiell die prognostizierte Zn-Anreicherung. Insgesamt wiesen von den zwanzig Parzellen mit erhöhten Zn-Einträgen sieben erhöhte Zn-Konzentrationen im Boden mit Werten von 77 bis 110 mg/kg auf. Dieser Befund lässt vermuten, dass die für die Bilanzperiode 1996 bis 2001 erfasste Bewirtschaftung für einige dieser Parzellen seit längerem praktiziert wird und erhöhte Zn-Einträge verursacht.

Neun Parzellen zeigten sowohl eine Cu- als auch Zn-Akkumulationsrate von >1% des jeweiligen Richtwerts auf. Vier Parzellen waren Ackerbauparzellen, vier waren Wiesen und Weiden. Diese Parzellen erhielten in sechs Fällen Güllegaben von Rindern und Schweinen von kombinierten Veredlungs- und Verkehrsmilchbetrieben. Der Tierbesatz dieser Betriebe war mittel bis hoch und lag zwischen 1,7 und 2,8 GVE/ha. Von den neun Parzellen mit erhöhter Cu- und Zn-Akkumulationsrate wiesen eine Ackerbauparzelle (25) und zwei Wiesen (74 und 33) für beide Elemente erhöhte Konzentrationen im Boden auf. Dies deutet darauf hin, dass in der Vergangenheit Cu und Zn auf diesen Parzellen gemeinsam über Hofdünger oder Klärschlamm eingetragen wurde.

Die Akkumulationsraten für Cd lagen für neun Parzellen nahe 1% des Richtwerts von 0,8 mg/kg oder darüber. Keine der Parzellen wies erhöhte Cd-Konzentrationen im Boden auf. Für Pb wurde auf keiner Parzelle eine Zunahme der Bodenkonzentration grösser als 1% des Richtwerts in zehn Jahren festgestellt. Dieser Befund ist unter anderem auf die Einführung des bleifreien Benzins zurückzuführen.

Insgesamt wiesen die Stoffbilanzen bei 29 der 48 Parzellen (60%) für mindestens ein Schwermetall auf Akkumulationsraten von >1% des jeweiligen Richtwerts in einem Jahrzehnt hin. Auch wenn die Beträge der Akkumulationsraten im Zeitraum von einem Jahrzehnt sehr gering erscheinen, muss beachtet werden, dass auch eine langsame, schleichende Stoffanreicherung im Boden über mehrere Generationen hinweg ein Gefährdungspotenzial für die Bodenfruchtbarkeit darstellt. In diesem Sinne stellen die in Abbildung 16 prognostizierten Zunahmen lediglich die Situation für ein kleines Zeitfenster dar.

Prognosen über Zeiträume von Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten sind allerdings nur mit dynamischen Stoffbilanzen sinnvoll, welche die Wechselwirkung zwischen Stoffeintrag, Bodenkonzentration und Stoffaustrag berücksichtigen und anhand von periodisch gemessenen Bodengehalten validiert wurden. Eine Prognose zu Stoffanreicherungen über längere Zeiträume muss zudem zeitliche Änderungen der landwirtschaftlichen Nutzung und der Qualität der eingesetzten Hilfsstoffe berücksichtigen. Im Vergleich zu Bilanzstudien, welche zu Beginn der 1990er Jahre durchgeführt wurden, weisen neuere Studien im Allgemeinen auf eine Verminderung der Schwermetalleinträge in landwirtschaftlich genutzte Böden hin (Keller und Schulin 2003a; Marlburg-Graf 2003). Dies wird insbesondere auf eine veränderte

Düngungspraxis, eine verbesserte Qualität der eingesetzten Düngemittel und auf niedrigere atmosphärische Depositionsraten zurückgeführt. Die Schwermetallbilanzen der NABO-Parzellen für die Zeitperiode 1996 bis 2001 bestätigen diesen Trend.

Reduzierung der Schadstoffeinträge

Sind die wichtigsten Eintragsquellen mit Stoffbilanzen identifiziert, können betriebs- und nutzungsspezifische Massnahmen zur Verringerung von Schadstoffeinträgen in Böden direkt abgeleitet werden. Für die landwirtschaftliche Praxis wurden von Seiten des Gesetzgebers neben der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises detaillierte Empfehlungen und Richtlinien für eine umweltgerechte Düngung (BUWAL 1996) sowie für die Qualität, Zulassung und Verwendung von Düngern (FAL 1999; StoV 2003) erlassen. Kürzlich wurden weitergehende Massnahmenpakete zur Reduktion von Umweltrisiken durch die Anwendung von Düngern und Pflanzenschutzmitteln vorgeschlagen (Schweizerischer Bundesrat 2003). Die aus den Stoffbilanzen der 48 NABO-Parzellen resultierenden Massnahmen zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen (siehe unten) sind in diesem gesetzlichen Handlungsrahmen zu sehen.

In Fällen mit einem einzelnen dominanten Eintragspfad für verschiedene Schadstoffe können Massnahmen zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen relativ einfach umgesetzt werden. In der Regel wird aber eine Schadstoffakkumulation im Boden durch eine Überlagerung von mehreren Eintragspfaden verursacht. Daher müssen entsprechende Massnahmen zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen in Böden an mehreren Quellen ansetzen. Hierbei muss beachtet werden, dass sich eine Massnahme zwar positiv auf den Eintrag eines Schadstoffs im Boden auswirken kann, gleichzeitig kann sie aber den Eintrag eines anderen Schadstoffs begünstigen. Verminderungsmassnahmen müssen deshalb immer aus integraler Sicht für alle relevanten Schadstoffe betrachtet werden.

Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen

Die in dieser Studie ermittelte Streuung der Nettofluxe umfasst sowohl die zeitliche und räumliche Variation von Bilanzgrössen als auch die Unsicherheiten in den Bilanzdaten. Je nach der Bedeutung von unsicheren Stoffdaten für die Bilanz einer Parzelle oder Kultur können die Variationskoeffizienten der Nettofluxe sehr unterschiedlich sein. Abgesehen von einzelnen extremen Variationskoeffizienten für Nettofluxe bestimmter Parzellen wiesen die meisten Parzellen Werte zwischen 30 und 80% für Zn, Cu und Pb auf. Der durchschnittliche Variationskoeffizient für die Nettofluxe dieser Elemente betrug rund 50%.

Die Cd-Nettofluxe zeigten generell eine grössere Streuung. Der mittlere Variationskoeffizient lag bei 76%. Für die meisten Cd-Bilanzen lagen die Werte für das Streuungsmass bei 42 bis 112%. Die Cd-Nettofluxe sind somit im Vergleich zu den Nettofluxen für Zn, Cu und Pb weniger zuverlässig. Dies wird im Wesentlichen durch die Streuung in den Messdaten für die Cd-Konzentrationen in den Pflanzen und für die Werte der atmosphärischen Deposition verursacht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aufgrund der derzeit verfügbaren Bilanzdaten die parzellenbezogenen Nettofluxe für Zn, Cu und Pb um etwa die Hälfte und die Cd-Nettofluxe um drei Viertel um ihren Mittelwert streuen.

Diese Aussage bezieht sich allerdings nur auf die in dieser Studie berücksichtigten Zufallsvariablen (siehe Tabelle 5). Sind für weitere relevante Stoffkonzentrationen die Streuungen in den Messdaten verfügbar, kann sich die Unsicherheit der Nettofluxe erhöhen. Die Auswahl und Bestimmung der Streu- und Lageparameter der Zufallsvariablen ist hierbei entscheidend für die Aussagekraft der Nettofluxe und deren Zuverlässigkeit. Die stochastische Bilanzierungsmethode erfüllt nur dann ihren Sinn, wenn die Streuung der Zufallsvariablen realistisch und auf Messdaten basierend definiert werden, damit die resultierende Streuung der Nettofluxe entsprechend inhaltlich interpretiert werden kann. Insofern wurden in dieser

Studie lediglich jene Unsicherheiten in den Bilanzdaten berücksichtigt, die mit Messdaten belegt werden können. Es wurden keine Annahmen über unbekannte Unsicherheiten von Bilanzgrössen getroffen.

Modellunsicherheiten wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Inwiefern mit einer Erweiterung des Bilanzmodells – zum Beispiel mit den Prozessen Verlagerung und Erosion – die Zuverlässigkeit erhöht werden kann, muss untersucht werden. Für die berechneten Stoffeinträge und Stoffausträge können ausserdem durch die im Folgenden beschriebenen Aspekte systematische Fehler verursacht werden.

Die Transformation der Schwermetallgehalte in Moosen in Depositionsraten stützt sich auf Regressionsfunktionen, die lediglich auf einer kleinen Stichprobenanzahl beruhen. Die Gehalte in Moosen wurden je nach Element mit Depositionsmessungen nach der Bergehoff-Methode über drei Jahre hinweg an acht bis fünfzehn Standorten verglichen. Insbesondere die Transformation der Cu-Moosgehalte deutet auf systematische Fehler der Regressionsfunktion hin. Zuverlässigere Depositionsdaten könnten durch eine breiter abgestützte Regressionsfunktion erreicht werden. Dies betrifft in erster Linie die Stoffbilanzen für Cd und Pb.

Ein weiterer systematischer Fehler ergibt sich dadurch, dass in der Bilanzmethode die Pflanzen- und Bodenkonzentrationen unabhängig betrachtet wurden. Zwar weisen nur wenige der 48 NABO-Parzellen Bodenkonzentrationen oberhalb des Richtwerts auf, doch müssen für diese Parzellen erhöhte Pflanzenkonzentrationen vermutet werden. Anstatt gemessener Pflanzenkonzentrationen können diese auch über empirische Regressionsbeziehungen zwischen Boden- und Pflanzengehalten (Knoche *et al.* 1999) abgeschätzt werden.

Bei der Erfassung der Bewirtschaftungsdaten und mit den Annahmen zur Berechnung der Hofdüngereinträge sind ebenfalls systematische Fehler möglich. Aufgrund der verfügbaren Messdaten für Stoffkonzentrationen im Hofdünger wurde für alle Betriebe und unabhängig von der Hofdüngerquantität die gleiche Hofdüngerqualität angenommen. Mit der Überprüfung dieser Annahmen könnte die Zuverlässigkeit der berechneten Cu- und Zn-Einträge über die Hofdünger verbessert werden.

Nicht zuletzt sind transparente und gut dokumentierte Bilanzstudien für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von grosser Bedeutung. Oft können Ergebnisse verschiedener Bilanzstudien aber aufgrund mangelnder Begleitinformationen nicht miteinander verglichen werden. Öborn *et al.* (2003) schlagen deshalb ein definiertes Vorgehen für die Stoffbilanzierung von landwirtschaftlich genutzten Böden vor, um Bilanzstudien besser miteinander vergleichen zu können. Um die Bedeutung von Stoffbilanzen für die landwirtschaftliche Praxis und entsprechende Handlungsempfehlungen zu stärken, haben Oenema *et al.* (2003) ein Kontroll- und Qualitätssystem für Stoffbilanzen vorgeschlagen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Schleichende Stoffanreicherung im Boden

Im Gegensatz zu klassischen Bilanzierungsmethoden, die lediglich mittlere Stoffkonzentrationen und -mengen berücksichtigen, wurde in dieser Studie die Zuverlässigkeit von Stoffbilanzen für 48 landwirtschaftlich genutzte NABO-Parzellen mit Hilfe einer stochastischen Methode bestimmt. Die Streuung von Messdaten fliesst bei dieser Methode in die Stoffberechnungen mit ein und geht nicht durch eine Mittelwertbildung von Messdaten verloren. Dadurch werden die Bilanzen besser abgestützt und ihre Aussagekraft verbessert. Infolgedessen wird die Prognosesicherheit für Veränderungen von Schadstoffbelastungen im Boden erhöht. Die stochastische Bilanzierungsmethode erfüllt allerdings nur dann ihren Sinn, wenn die Streuung der Messdaten realistisch definiert und die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen damit fachlich interpretiert werden kann.

Die aus den Stoffbilanzen resultierenden Akkumulationsraten lagen für 11 (Cu), 9 (Cd) und 20 (Zn) der 48 NABO-Parzellen im Bereich von 1% und grösser des jeweiligen Richtwerts in einem Jahrzehnt. Die schleichende Anreicherung dieser Elemente im Boden sind für den Zeitraum einer Fruchtfolge zwar kaum messbar aber über mehrere Generationen hinweg durchaus relevant. In diesem Kontext befürworten wir eine langfristige Bodenbeobachtung der Parzellen von «kombinierten Veredlungsbetrieben», «Verkehrsmilchbetrieben» sowie von einigen «kombinierten Verkehrsmilch-Ackerbaubetrieben» und Spezialkulturen.

Handlungsempfehlungen

Aus den Stoffbilanzen können betriebs- und nutzungsspezifische Handlungsmassnahmen zur Verringerung von Schadstoffeinträgen in Böden der NABO-Parzellen abgeleitet werden. Folgende Massnahmen werden empfohlen:

- Eine behutsame Anwendung von Cd-reichen Mineraldüngern wie zum Beispiel Triple-Superphosphat.
- Ein an die landwirtschaftliche Nutzfläche und an den Betrieb angepasster Viehbesatz sowie eine reduzierte Anwendung von mit Cu und Zn angereicherten Futtermittelzusätzen.
- Eine umweltgerechte Düngung, die den Pflanzenbedarf und Bodenvorrat an Nährstoffen berücksichtigt.
- Eine beschränkte Anwendung von Cu-haltigen Pflanzenschutzmitteln und ein Ersatz mit alternativen Cu-freien Stoffen.
- Eine Integration des Kartoffel- und Gemüseanbaus in eine abwechslungsreiche Fruchtfolge.

In qualitativer Hinsicht sind diese Forderungen nicht neu. Mit der stochastischen Bilanzierungsmethode kann nun aber in quantitativer Hinsicht das Verminderungspotenzial einzelner Schadstoffeinträge ausgewiesen werden. Betriebs- und nutzungsspezifisch kann die Wirksamkeit von präventiven Massnahmen zur Vermeidung von Schadstoffeinträgen in Böden mit der Bilanzmethode geplant werden. Beispielsweise kann die Auswirkung reduzierter Cu- und Zn-Gehalte spezifischer Hofdüngertypen auf die Stoffbilanzen für unterschiedliche Betriebstypen quantifiziert und die Zuverlässigkeit der resultierenden Nettofluxe bestimmt werden. Ausserdem können mit der Bilanzmethode anhand von Nutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien geeignete Handlungsoptionen für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung gefunden werden. Der Vergleich der parzellen- und kulturbezogenen Bilanzen zeigt beispielsweise die Unterschiede der Stoffeinträge für einzelne Kulturen im Vergleich zu Fruchtfolgen auf.

Prognosesicherheit der Stoffbilanzen

Die Unsicherheitsanalyse der Stoffbilanzen hat die unterschiedlichen Beiträge der unsicheren Bilanzdaten auf die parzellen- und kulturspezifischen Stoffbilanzen verdeutlicht. Aus der Analyse der Unsicherheitsanteile können im Hinblick auf eine verbesserte Kausalanalyse und Prognosesicherheit in der Bodenbeobachtung die Datenlücken identifiziert werden. Mit zusätzlichen Recherchen beziehungsweise Messungen kann so die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen erhöht werden.

Datenlücken bestehen insbesondere hinsichtlich der aktuellen Schwermetallgehalte der Mineraldünger und dem Schwermetalleintrag über die Atmosphäre. Eine verbesserte Datenlage zur Immission von Schwermetallen könnte mit breiter abgestützten Regressionsfunktionen zwischen Moosgehalten und Depositionsraten nach der Bergerhoff-Methode erreicht werden. Die Unsicherheitsanalyse der Bilanzen für die NABO-Parzellen befürwortet zudem Messungen der Cu- und Zn-Konzentrationen spezifischer Hofdüngertypen sowie zusätzliche Messungen der Schadstoffgehalte von Pflanzen. Vor allem Messungen der Schadstoffkonzentrationen in Gras- und Klee würde die Zuverlässigkeit der Cd- und Pb-Bilanzen erheblich verbessern.

Die angenommene Unschärfe von 10% für die erfassten Mineral- und Hofdüngermengen hatte kaum einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen. Inwiefern die Mengenangaben dieser Dünger mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind, muss weiter abgeklärt werden. Grundsätzlich verdeutlicht die Unsicherheitsanalyse jedoch, dass die Zuverlässigkeit der Stoffbilanzen in erster Linie von der Unsicherheit der Konzentrationsdaten der landwirtschaftlichen Hilfsstoffe abhängt und weniger von der Unsicherheit der erfassten Mengenangaben.

Ausblick

Die Stoffbilanzen der NABO-Parzellen dienen der Früherkennung von Schadstoffbelastungen im Boden. Sie ergänzen die periodisch wiederholten Bodenmessungen im NABO-Messnetz, die zur Diagnose effektiver Veränderungen von Schadstoffkonzentrationen im Boden unerlässlich sind. Ein weiterer Schritt für die Bodendauerbeobachtung stellt die Validierung der Stoffbilanzen mit den gemessenen Veränderungen im direkten Monitoring dar. Die Validierung gestattet methodische Korrekturen und Erweiterungen des stochastischen Bilanzmodells. Unter anderem muss geprüft werden ob für die NABO-Standorte Bodenprozesse wie Erosion und Verlagerung für den Stoffhaushalt des Oberbodens relevant sind. Ist die Bilanzierungsmethode erprobt und validiert, kann sie für andere Schwermetalle und zukünftig in erweiterter Form für persistente organische Schadstoffe im Boden angewendet werden.

Um den Einfluss veränderter Bewirtschaftungsbedingungen in der Landwirtschaft auf den Stoffhaushalt im Boden zu untersuchen, sollen in einer weiteren Studie die Stoffbilanzen der NABO-Parzellen für Zeitperioden vor und nach Einführung der integrierten Produktion verglichen werden. Für Betrachtungen des Stoffhaushalts im Boden über längere Zeiträume hinweg, das heisst in der Grössenordnung von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, ist die Entwicklung und Anwendung eines dynamischen Stoffbilanzmodells erforderlich, das Bodenprozesse, Wechselwirkungen zwischen Stoffeintrag, Bodenkonzentration und Stoffaustrag sowie zeitliche Änderungen der Bilanzgrössen berücksichtigt. Mit einem dynamischen Stoffbilanzmodell kann die Ursache der gegenwärtigen Schadstoffbelastung im Boden anhand von früheren Nutzungen analysiert (a posteriori assessment) sowie mögliche längerfristige Schadstoffanreicherungen anhand von Nutzungsszenarien prognostiziert werden (a priori assessment).

6 Literatur

AG, 1997. Schwermetalle und Nährstoffgehalte in landwirtschaftlichen Handelsdüngern. Jahresbericht 1997, Kantonales Laboratorium Aargau, Sektion Chemiesicherheit und Stoffe, CH-5000 Aarau.

BLW, 2004. Pflanzenschutzmittelverzeichnis. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Sektion Pflanzenschutzmittel und Dünger (Hrsg.). URL: http://www.blw.admin.ch/pflanzenschutzverz/pb_home_d.html

BUWAL, 1991. Schwermetalle und Fluor in Mineraldüngern. Schriftenreihe Umwelt Nr. 162. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern.

BUWAL, 1996. Erläuterungen zur Düngung und Umwelt. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern. 75 S.

BUWAL, 2003. NABEL – Luftbelastung 2003. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Schriftenreihe Umwelt Nr. 370, CH-3003 Bern.

Bengtsson H., Öborn I., Jonsson S., Nilsson I. und Andersson A., 2003. Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming. European Journal of Agronomy 20, 101–116.

Boysen P., 1992. Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln. Forschungsbericht 107 01 016/01. Umweltbundesamt, D-14191 Berlin.

Chambers B.J., Nicholson F.A., Soloman D.R. und Unwin R., 1998. Heavy-metal loadings from animal manures to agricultural land in England and Wales. p.475–483. In J. Martinez (ed.) «Proc. of the FAO-Network on recycling agricultural, municipal and industrial residues in agriculture (RAMIRAN 98) ». Rennes, France. May 1998. FAO, Rome.

Desaules A. und Studer K., 1993. Nationales Bodenbeobachtungsnetz – Messresultate 1985–1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), CH-3003 Bern.

Desaules A. und Dahinden R., 2000. Nationales Boden-Beobachtungsnetz – Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Schriftenreihe Umwelt Nr. 320. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), CH-3003 Bern.

FAL, 1999. Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), CH-8046 Zürich. S. 54.

FAT, 2000. Neue Methodik für die zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten an der FAT. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon. S. 16.

Gsponer R., 1990. Schwermetalle in Düngemitteln: Ein Diskussionsbeitrag. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Fachstelle Bodenschutz Zürich, Zürich.

Gsponer R., 1996. Ursachendifferenziertes Vorgehen zur verdachtsorientierten Erkundung von Schwermetallbelastungen im Boden. Dissertation Nr. 11862 an der ETH Zürich. 203 S.

GRUDAF, 1994. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 1(7).

GRUDAF, 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 8(6).

Hackenberg S. und Wegener H.R., 1999. Schadstoffeinträge in Böden durch Wirtschafts- und Mineraldünger, Komposte und Klärschlamm sowie durch atmosphärische Deposition. Baeza Verlag, D-37213 Witzenhausen. S. 256.

Hämmann M. und Gupta S.K., 1997. Herleitung von Prüf- und Sanierungswerten für anorganische Schadstoffe im Boden. Umwelt-Materialien Nr. 83. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern. S. 100.

Herter U., Kupper T. und Külling D., 2003. Risikoabschätzung zur landwirtschaftlichen Abfalldüngerverwertung. Schriftenreihe der FAL 48. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), CH-8046 Zürich. S. 127.

Huber J.P., 1981. Robust statistics. John Wiley & Sons, New York.

IPE, 1994. International Plant-Analytical Exchange. Chemical composition of various plant species. Wageningen Agricultural University, the Netherlands.

IUL, 1997. Resultate von Stichprobenuntersuchungen im Rahmen der Düngerkontrolle in den Jahren 1996 und 1997. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Bern. (unveröffentlicht).

Janssen P.H.M., 1994. Assessing sensitivities and uncertainties in models: A critical evaluation. p. 344–361. In J. Grasman and G. van Straten (eds.). Predictability and nonlinear modelling in natural science and economics. Kluwer Academic Publ. Dordrecht, the Netherlands.

Jenka B., Pozzi A. und Meili E., 1996. Cadmiumtransfer Boden-Nahrungspflanzen. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Zürich. S. 57 plus Anhang.
Keller T. und Desaules A., 1997. Flächenbezogene Bodenbelastung mit Schwermetallen durch Klärschlamm Schriftenreihe der FAL 23. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau – Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (FAL-IUL), CH-3003 Bern. S. 82
Keller A., 2000. Assessment of uncertainty in modelling heavy metal balances of regional agroecosystems. Dissertation No. 13944. ETH Zürich. S. 165.
Keller A. von Steiger B., van der Zee S.E.A.T.M. und Schulin R., 2001. A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. J. Environ. Qual. 30, 1976–1989.
Keller A., Abbaspour K.C. und Schulin R., 2002. Assessment of Uncertainty and Risk in Modeling Regional Heavy-Metal Accumulation in Agricultural Soils. J. Environ. Qual. 31, 175–187.
Keller A., und Schulin R., 2003a. Phosphorus and heavy metal balances of agro-ecosystems and their uncertainty sources. Nutrient Cycling in Agroecosystems 66, 271–284
Keller A. und Schulin R., 2003b. Modelling regional-scale mass balances of phosphorus, cadmium and zinc fluxes for arable and dairy farms. European Journal of Agronomy 20, 181–198.
Knoche H., Brand P., Viereck-Götte L. und Böken H., 1999. Schwermetalltransfer Boden-Pflanze. Umweltbundesamt Berlin. Texte 11/99. Forschungsbericht 10706001/20. S. 213.
Kessler J., Zogg M. und Bächler E., 1994. Phosphor, Kupfer und Zink im Schweinetrog. Agrarforschung 1(11–12), 480-483.
LANDI, 2003. Zielsortiment 2003 – Pflanzenbehandlungsmittel im Futter- und Ackerbau. Fa. fenaco-LANDI, CH-3001 Bern.S. 56.
LBP, 1997. Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (DBF), Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985–1995, Teil 2. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising-München. 5/97.
Marlburg-Graf B., 2003. Schwermetallbilanzen als Indikatoren nachhaltiger landwirtschaftlicher Bodennutzung. Stuttgarter Geographische Studien. Band 134. Institut für Geographie der Universität Stuttgart. Sprint Druck Stuttgart. S. 307.
McKay D.M., Beckmann R.J. und Conover W.J., 1979. A comparison of three methods selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 21, 239–245.
Menzi H., Haldemann C. und Kessler J., 1993. Schwermetalle in Hofdüngern – Ein Thema mit Wissenslücken. Schweiz. Landw. Forschung 32, 159–167.
Menzi H. und Kessler J., 1998. Heavy Metal Content of Manure in Switzerland. p. 495–506 In J. Martinez (ed.) «Proc. of the FAO-Network on Recycling Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98)». Rennes, France. May 1998.
Menzi H., Lehmann E. und Kessler J., 1999. Anfall und Zusammensetzung von Hofdüngern aus der Rindviehmast. Agrarforschung 6, 417–420.
Moolenaar S.W. und Lexmond T.M., 1998. Heavy-metal balances of agro-ecosystems in the Netherlands. Netherlands J. Agric. Sci. 46, 171–192.
Moolenaar S.W., van der Zee S.E.A.T.M. und Lexmond Th.M., 1997. Indicators of the sustainability of heavy-metal management in agro-ecosystems. Sci. Total Environ. 201, 155–169.
Mortvedt J.J., 1996. Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. Fertilizer Research 43, 55–61.
Nicholson F.A., Chambers B.J., Williams J.R. und Unwin R.J., 1999. Heavy-metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. Bioresource Technology 70, 23–31.
Nielsen R. und Wendroth O., 2003. Spatial and Temporal Statistics. GeoEcology Textbook. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany. p.398.
Oenema O., Kros H. und de Vries W., 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. European Journal of Agronomy 20, 3–16.
Öborn I., Edwards A.C., Witter E., Oenema O., Ivarsson K. *et al.*, 2003. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. European Journal of Agronomy 20, 211–225.

Palasthy A., 1983. Matières organiques, engrais et amendements organiques. Recueil des analyses et leur interprétation. Mise à jour 1995. Service Agro-écologique Migros, Lausanne (non publié).
Reiner I., Lampert C., Piterovka M. und Brunner P., 1996. Stoffbilanzen landwirtschaftlicher Böden von ausgewählten Betriebstypen bei Verwendung von Klärschlamm und Kompost. TU Wien, im Auftrag des Amtes der Oberösterreichischen Landesregierung, Wien.
Saltelli A., Tarantola S., Campologno F. und Ratto M., 2004. Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models. Wiley Verlag. England. p. 217.
Schütze G. und Nagel H.D., 1998. Kriterien für die Erarbeitung von Immissionsminderungszielen zum Schutz der Böden und Abschätzung der langfristigen raümlichen Auswirkungen anthropogener Stoffeinträge auf die Bodenfunktion. Forschungsbericht 204 02 825. Umweltbundesamt, D-14191 Berlin.
Schultheiss U., Döhler H., Roth U., Eckel H. *et al.*, 2004. Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Texte 06/04. Umweltbundesamt, D-14191 Berlin. 130 S.
Schweizerischer Bundesrat, 2003. Reduktion der Umweltrisiken von Düngern und Pflanzenschutzmittel. Hrsg: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). CH-3003 Bern. 135 S.
Spiess E., 1999. Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. Schriftenreihe der FAL 28. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), CH-8046 Zürich.
StoV, 2003. Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung, StoV). SR 814.013. Änderung vom 1. Mai 2003.
Studer K., Gsponer R. und Desaules A., 1995. Erfassung und Ausmass der flächenhaften Kupferbelastung in Rebbergböden der Schweiz. Schriftenreihe der FAC-Liebefeld Nr. 20. Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (Hrsg.), CH-3097-Liebefeld-Bern. 44 S.
Thöni L., Schnyder N. und Krieg F., 1996. Comparison of metal concentrations in tree species of mosses and metal freights in bulk precipitations. Fresenius J. Anal. Chem. 354, 703–708.
Thöni L., 1998. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–1995. Umwelt-Materialen Nr. 101. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern.
Thöni L., 2004. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Moosanalysen 1990–2000. Umweltmaterialien Nr. 180. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), CH-3003 Bern.
Tiktak A., Alkemade R., van Grinsven H. und Makaske K., 1998. Modelling cadmium accumulation on a regional scale in the Netherlands. Nutrient Cycling Agroecosyst. 50, 209–222.
UBA, 2001. Grundsätze und Massnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Texte Nr. 59. Umweltbundesamt, D-14191 Berlin. S. 126.
UBA, 2003. Proceedings of the Expert Meeting on Critical Limits for Heavy Metals and Methods for their Application. Texte Nr. 47. Umweltbundesamt, D-14191 Berlin. S. 216.
VBBo, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). SR 814.12.
Vogler K. und Schmitt H.W., 1990. Schwermetalltransfer Boden-Pflanze. Nationales Forschungsprogramm Boden (NFP22). Forschungsbericht Nr. 53. CH-3097-Liebefeld-Bern. S.97.
von Steiger B. und Baccini P., 1990. Regionale Stoffbilanzierung von landwirtschaftlichen Böden mit messbarem Ein- und Austrag. Nationales Forschungsprogramm «Boden». Report Nr. 38. CH-3097-Liebefeld-Bern. 53 S.
von Steiger B. und Obrist J., 1993. Available databases for regional mass in agricultural land. P. 35–46. In R. Schulin, A. Desaules, R. Webster and B. von Steiger (eds). Soil monitoring – Early Detection and Surveying of Soil Contamination and Degradation. Birkhäuser Verlag Basel.
Webster R. und Oliver M.A., 2001. Geostatistics for Environmental Scientists. Wiley & Sons. New York, Weinheim, Toronto. p. 271.

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen	
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Cd	Cadmium
Cu	Kupfer
FAT	Agroscope FAT Tänikon, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik
FG	Frischgewicht
GVE	Grossvieheinheiten
ha	Hektare
Hg	Quecksilber
IP	Integrierte Produktion
Max	Maximum
Min	Minimum
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NABO	Nationales Boden-Beobachtungsnetz
öLN	ökologischer Leistungsnachweis
P	Phosphor
Pb	Blei
Q	Quartile
Std	Standardabweichung
t	Tonnen
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens
VK	Variationskoeffizient
Zn	Zink
ZV	Zufallsvariable

Anhang

Der Anhang kann vollständig in pdf-Format (Acrobat Reader) von der folgenden Internetseite der Nationalen Bodenbeobachtung heruntergeladen werden:

www.nabo.admin.ch | **Modul NABO-Flux**

Anhang 1a:	Parzellen und Betriebstypen
Anhang 1b:	Kriterien zur Klassifikation der landwirtschaftlichen Betriebe nach FAT (2000).
Anhang 2:	Fruchtfolgen und Nutzungen der NABO Parzellen von 1996 bis 2001.
Anhang 3:	Räumlich interpolierte Werte der atmosphärischen Deposition
Anhang 4:	Konzentrationsdaten für landwirtschaftliche Hilfsstoffe und Kulturen.
Anhang 5:	Definition von unsicheren Bilanzgrössen für die Berechnung der Schwermetallbilanzen
Anhang 6:	Legende zu der Boxplot-Darstellung
Anhang 7:	Cadmium-Bilanz der NABO-Parzellen
Anhang 8:	Blei-Bilanz der NABO-Parzellen
Anhang 9:	Kupfer-Bilanz der NABO-Parzellen
Anhang 10:	Zink-Bilanz der NABO-Parzellen
Anhang 11:	Cadmium-Bilanz der Kulturen
Anhang 12:	Blei-Bilanz der Kulturen
Anhang 13:	Kupfer-Bilanz der Kulturen
Anhang 14:	Zink-Bilanz der Kulturen

Schriftenreihe der FAL
Les cahiers de la FAL

22–35	siehe im Internet unter www.reckenholz.ch >Publikationen >Schriftenreihe der FAL voir à l'internet sous www.reckenholz.ch >Publications >Les cahiers de la FAL		
36	Ertrags- und Umweltleistungen integrierter und biologischer Anbausysteme des Ackerbaus Rendements et prestations environnementales des sytèmes de production intégré et biologique en grandes cultures 2001 FAL-Tagung vom 26. Januar 2001 / Journée FAL du 26 janvier 2001	D F	vergriffen CHF 20.–
37	Evaluation der Ökomassnahmen – Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion Evaluation des mesures écologiques – La charge des eaux de surface en phosphore liée à l'érosion des sols 2001 *Volker Prasuhn und Kaspar Grünig*	D	CHF 30.–
38	Ökobilanzen – Beitrag zu einer nachhaltigen Landwirtschaft Bilans écologiques: Contribution à une agriculture durable 2002 FAL-Tagung vom 18. Januar 2002 / Journée FAL du 18 janvier 2002	D/F	CHF 30.–
39	Artenreiche Wiesen Prairies à haute diversité biologique 2002 *Thomas Walter et al.*	D	CHF 30.–
40	Ausmass und mögliche Auswirkungen der Abdrift von Pflanzenschutzmitteln auf ökologische Ausgleichsflächen Dimension et possible effets de la dérive des produits phytosanitaires sur des surfaces de compensation écologiques 2002 *Rudolf Büchi und Franz Bigler*	D	CHF 20.–
41	Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln Structure du sol – classification et évaluation visuelle 2002 *Jakob Nievergelt, Milan Petrasek und Peter Weisskopf*	D	CHF 40.–
42	Biogene VOC und Aerosole – Bedeutung der biogenen flüchtigen organischen Verbindungen für die Aerosolbildung COV biogènes et aérosols – Les composés organiques volatils biogènes et leur contribution aux aérosols 2002 *Christoph Spirig und Albrecht Neftel*	D	CHF 20.–
43	Stickstoff in Landwirtschaft und Umwelt – Probleme, Lösungswege und Perspektiven im internationalen, nationalen und lokalen Umfeld L'azote dans l'agriculture et l'environnement – Problèmes, voies de solution et perspectives à l'échelon international, national et local 2003 FAL-Tagung vom 24. Januar 2003 / Journée FAL du 24 janvier 2003	D	CHF 30.–
44	Carbon stocks and carbon sequestration potentials in agricultural soils in Switzerland 2003 *Jens Leifeld, Seraina Bassin and Jürg Fuhrer*	E	CHF 30.–
45	Forschung für den biologischen Landbau Recherche en agriculture biologique 2003 *Beat Boller et al.*	D/F	CHF 30.–
46	Von der Kontrollstation zum Nationalen Zentrum für Agrarökologie Zur Geschichte der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Zürich-Reckenholz 1878–2003 2003 *Josef Lehmann*	D	CHF 30.–
47	Agrar-Umweltindikatoren – Machbarkeitsstudie für die Umsetzung in der Schweiz Indicateurs agro-environnementaux – Etude de faisabilité pour la réalisation en Suisse 2003 *Gérard Gaillard et al.*	D	CHF 30.–
48	Risikoabschätzung zur landwirtschaftlichen Abfalldüngerverwertung Estimation des risques liés à l'utilisation agricole des engrais de recyclage 2003 *Ulrich Herter, Thomas Kupper und David Külling*	D	CHF 25.–
49	Forschung für die Agrarlandschaft Recherche pour les paysages agricoles 2004 FAL-Tagung vom 23. Januar 2004 / Journée FAL du 23 janvier 2004	D/E/F	CHF 30.–
50	La structure du sol – observer et évaluer Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln 2004 *Gerhard Hasinger, Jakob Nievergelt, Milan Petrasek und Peter Weisskopf*	F	CHF 45.–
51	Umweltmonitoring gentechnisch veränderter Pflanzen in der Schweiz Monitoring environnemental en Suisse de plantes génétiquement modifiées 2004 *Olivier Sanvido, Franz Bigler, Franco Widmer, Michael Winzeler*	D	CHF 30.–
52	Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain Productions intégrée et biologique en comparaison – l'essai des systèmes de production au Burgrain 2004 *Urs Zihlmann et al.*	D	CHF 30.–
53	Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs Bilan écologique de l'exploitation agricole 2004 *Dominique Rossier, Gérard Gaillard*	D	CHF 30.–