



Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung

Nährstoffe und Schwermetalle 1985–2017

Thomas Gross, Armin Keller, Michael Müller, Andreas Gubler





Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Thomas Gross, thomas.gross@agroscope.admin.ch
Titelbild	© NABO
Copyright	© Agroscope 2021
ISSN	2296-729X
DOI	10.34776/as123g

Zusammenfassung

Gesunde Böden sind für eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion und funktionierende Ökosysteme essenziell. Physikalische, chemische und biologische Abläufe sind im Boden eng verknüpft, und Böden übernehmen dadurch wichtige Funktionen in Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffkreisläufen. Die Stoffbilanzierung von Böden ermöglicht es, stoffliche Gefährdungen der Bodengesundheit frühzeitig zu erkennen, deren Ursachen zu ermitteln und damit eine Grundlage zur Auswahl geeigneter Schutzmassnahmen zu schaffen. Die Stoffbilanzierung ist ein Instrument des indirekten Bodenmonitorings und ein wichtiger Bestandteil des Monitorings der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) der Schweiz.

Vor diesem Hintergrund wurden Oberflächenbilanzen von Nährstoffen und Schwermetallen auf 46 landwirtschaftlich genutzten Parzellen des NABO-Messnetzes berechnet. Diese NABO-Parzellen befinden sich in verschiedenen Regionen der Schweiz und decken unterschiedliche Landnutzungen (Ackerbau, Grasland und Spezialkulturen) und Bewirtschaftungstypen ab. Die Böden dieser Parzellen werden seit 1985 regelmässig beprobt und untersucht. Zudem werden jährlich Daten zur Bewirtschaftung der Parzellen erhoben. Mithilfe dieser Bewirtschaftungsdaten wurden von 1985–2017 jährliche Oberflächenbilanzen für die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) und die Schwermetalle Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Cadmium (Cd) berechnet. Als Einträge wurden Dünger und Pflanzenschutzmittel (PSM) und für Cu, Zn und Cd auch atmosphärische Deposition berücksichtigt. Als Austrag floss die Ernte in die Bilanzierung ein. Zudem wurden Einträge von Uran (U) durch P-haltige Mineraldünger berechnet. Nährstoffe wurden in dieser Arbeit zur Gegenüberstellung mit Schwermetalleinträgen als Düngerbilanzen berechnet, weshalb Einträge über die atmosphärische Deposition und N-fixierende Organismen nicht berücksichtigt wurden. Die Stoffbilanzen wurden nach Betriebstyp, Landnutzung und Hauptkultur eingeteilt und Unsicherheiten mittels einer stochastischen Methode quantifiziert.

Die Mengen eingesetzter Dünger und PSM und geernteter Erträge wurden jährlich von den Bewirtschaftern (landwirtschaftliche Betriebe) der Parzellen erfragt. Stoffkonzentrationen wurden aus zahlreichen Studien, vorwiegend aus der Schweiz, abgeleitet und für Hofdünger (Gülle und Mist) auf einigen der Betriebe beprobt (2006: 14 Betriebe und 2018: 30 Betriebe). Die atmosphärische Deposition wurde auf Basis publizierter Resultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) geschätzt. Ein Grossteil der NABO-Parzellen wurde von kombinierten Veredlungsbetrieben (13 Parzellen) und kombinierten Betrieben mit Schwerpunkt auf Milchkühen und Ackerbau (11 Parzellen) bewirtschaftet. Weitere Parzellen waren auf Betrieben mit Fokus auf Rindviehhaltung (Milch- und/oder Rindvieh, 8 Parzellen), Ackerbau (5 Parzellen), Spezialkulturen (7 Parzellen) und mit diversen Betriebsfeldern (2 Parzellen). Insgesamt wurden 27 Parzellen ackerbaulich, 11 Parzellen als Grasland, sieben Parzellen als Spezialkulturen und eine Parzelle zunächst als Grasland und später ackerbaulich bewirtschaftet.

Cu- und Zn-Einträge waren, ausser im Rebbau, mehrheitlich auf die Anwendung von Hofdüngern zurückzuführen. Beide Schwermetalle sind essenzielle Mikronährstoffe und gelangen durch Futter und Futtermittelzusatzstoffe über das Verdauungssystem der Nutztiere in Gülle und Mist. Cu- und Zn-Einträge auf die Parzellen waren signifikant mit der Anzahl Nutztiere pro landwirtschaftliche Nutzfläche auf dem jeweiligen Betrieb korreliert, was mit grösseren Hofdüngergaben bei grösserer Nutztierbestockung erklärt werden kann. Auf Parzellen, welche von kombinierten Veredlungsbetrieben bewirtschaftet werden, betragen die Mediane jährlicher Nettoflüsse von 1985-2017 rund 90 g Cu pro Hektar und Jahr ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) und 405 g Zn ($\text{g Zn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Auf Betrieben mit grossem Tierbesatz erreichten die Mediane bis zu 400 g Cu ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) und 950 g Zn ($\text{g Zn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Die höchsten Cu- Nettoflüsse wurden jedoch auf Rebbauparzellen mit Medianen zwischen 1'400-2'400 g Cu ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) aufgrund von PSM-Anwendungen festgestellt. Cu- und Zn-Nettoflüsse waren auf intensiv genutzten Graslandparzellen positiv mit einem Median von ca. 80 g Cu ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) und 370 g Zn ($\text{g Zn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) aufgrund von Hofdüngerausbringung, während sie auf extensiven Graslandparzellen ungefähr ausgeglichen waren.

Im Gegensatz zu Cu und Zn waren Cd-Einträge bei intensiverem Mineraldüngereinsatz höher. Cd kam mehrheitlich durch Mineraldünger und bis 2006 auch via Klärschlamm auf die Böden. Auf Parzellen mit geringem Mineraldünger- und/oder Klärschlammeinsatz war die atmosphärische Deposition die wichtigste Cd-Quelle. Mediane jährlicher Cd-Nettoflüsse bewegten sich auf allen Parzellen zwischen -0.6 und 3.2 g Cd ($\text{g Cd ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Während bei den Cu- und Zn-

Nettoflüssen insgesamt über die Zeit keine Abnahme feststellbar war, so nahmen die Cd-Nettoflüsse von Ende der 1980er- bis Mitte der 1990er-Jahre stark ab und veränderten sich seither wenig. Diese Abnahme war auf rückläufige Mineraldüngereinsätze sowie eine Reduktion der atmosphärischen Deposition im gleichen Zeitraum zurückzuführen. Auf Parzellen mit intensiver mineralischer P-Düngung und mit hohem natürlichen Cd-Gehalt im Boden ist trotzdem eine Akkumulation über die Zeit nicht auszuschliessen. Für U bewegten sich Mediane jährlicher Einträge über P-haltige Mineraldünger zwischen 0 und 25 g U ha⁻¹ a⁻¹ und Einträge bis ca. 50 g U ha⁻¹ a⁻¹ kamen insbesondere im Ackerbau und auf Spezialkulturen regelmässig vor. Für Hofdünger liegen derzeit nur wenige U-Konzentrationsdaten vor und dieser Eintragspfad ist im Vergleich zu Mineraldüngern eher gering.

Die parzellenbezogenen Schwermetall-Nettoflüsse wurden mithilfe des an diesen Standorten gemessenen Raumgewichts des Oberbodens (0-0.2 m) in theoretische Akkumulationsraten pro Jahrzehnt umgerechnet. Die Akkumulationsraten lagen für 11 (Cu), 13 (Zn) bzw. zwei (Cd) der 46 Parzellen im Bereich von $\geq 1\%$ des jeweiligen Richtwerts; die Resultate deuten in diesen Fällen auf eine relevante jedoch relativ langsame Akkumulation über die Zeit hin. Für U wurde bisher kein Richtwert definiert. Wie schnell die Richtwerte in Böden effektiv erreicht werden, hängt auch von deren Nutzungsgeschichte und natürlichen Bodengehalten ab. Die Resultate dieses Berichts bilden eine Ausgangsbasis zum Vergleich mit Bodenmesswerten.

Die Unsicherheiten der Oberflächenbilanzen bewegten sich von 15% bis zu einem mehrfachen des Bilanzierungswertes und waren im Median zwischen 45% und 105% des Bilanzierungswertes je nach Nährstoff bzw. Schwermetall. Die Unsicherheiten waren wesentlich geprägt durch Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen in den biogenen Stoffen Hofdünger und Erntegut. Unsicherheiten bestehen auch bei den Cd- und U-Gehalten in Mineraldüngern. Eine Marktkampagne des Bundesamts für Landwirtschaft zeigte, dass mehr als ein Drittel der beprobten Dünger den geltenden Cd-Grenzwert überschritt.

Abschliessend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse auf eine weitere Cu- und Zn-Anreicherung in Böden von Betrieben mit grosser Tierdichte bzw. intensiver Hofdüngerausbringung hindeuten. Zudem ist auf Rebbauparzellen durch die regelmässige Anwendung kupferhaltiger PSM von einer weiteren Cu-Anreicherung auszugehen. Ergebnisse aus Stoffbilanzierungen und Bodenmesswerten über mehr als 30 Jahre bieten eine schweizweit einzigartige Grundlage, um die Konzentrationen im Boden in den Kontext der Bewirtschaftung zu stellen, und damit einen wichtigen Beitrag zur Früherkennung, Prognose und Risikoabschätzung von Stoffanreicherungen.

Summary

Healthy soils are essential for sustainable food production and functioning ecosystems. Because physical, chemical and biological processes are closely linked in the soil, soils assume important functions in water, nutrient and carbon cycles. Calculating soil substance balances enables us to identify threats to soil health from these substances at an early stage and to determine the causes of these threats, thereby creating a basis for selecting suitable measures to protect soil health. Substance balances serve as a tool for indirect soil monitoring and are an important part of the Swiss Soil Monitoring Network (NABO).

Against this background, surface balances of nutrients and heavy metals were calculated on 46 agriculturally used plots monitored by the NABO. These plots are located in different regions of Switzerland and cover different agricultural land-use (arable farming, grassland and special crops) and management types. The soils of these plots have been regularly sampled and examined since 1985. In addition, data on the management of these plots have been collected annually. Based on these management data, surface balances were calculated annually from 1985-2017 for the nutrients nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), as well as the heavy metals copper (Cu), zinc (Zn) and cadmium (Cd). Fertilisers and plant-protection products (PPPs) were taken into account as inputs, and atmospheric deposition was also taken into account for Cu, Zn and Cd. The harvest was included as an output. Uranium (U) inputs from mineral P-fertilisers were also calculated. In this report, nutrients were calculated as fertiliser balances for comparison with heavy metal inputs, which is why inputs from atmospheric deposition and N-fixing organisms were not taken into account. The substance balances were classified according to farm type, land-use type and main crop, and uncertainties were quantified using a stochastic method.

The quantities of fertilisers and PPPs used and the harvested yields were requested annually from the farmers of the NABO plots. Substance concentrations were derived from numerous (mainly Swiss) studies and sampled for liquid and solid farmyard manure on some of the farms (2006, 14 farms; 2018, 30 farms). Atmospheric deposition was estimated based on published results of the Swiss National Air Pollution Monitoring Network (NABEL). A majority of the NABO plots was cultivated by combined processing farms (13 plots) and farms focusing on a combination of commercial milk production and arable farming (11 plots). Further plots were on farms focusing on cattle (dairy and/or beef cattle, 8 plots), arable farming (5 plots), special crops (7 plots) and on farms with various areas of operation (2 plots). A total of 27 plots were used for arable farming, 11 plots as permanent grassland, seven plots for special crops and one plot initially as grassland and later for arable farming.

With the exception of viticulture, Cu and Zn inputs were primarily due to the use of farmyard manure. Both heavy metals are essential micronutrients and pass from feed and feed additives into manure via the digestive systems of livestock. Cu and Zn inputs on the plots were significantly correlated with the number of livestock per agricultural area on the respective farm, which can be explained by the higher manure inputs with higher livestock numbers. On plots managed by combined processing farms, the medians of annual net flows from 1985-2017 were around 90 g Cu per hectare and year ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) and 405 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. On farms with high livestock numbers, the medians reached up to 400 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ and 950 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. However, the highest Cu net flows were found on vineyards, with medians between 1,400-2,400 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ due to the application of PPPs. On intensively managed grassland plots, the Cu and Zn net flows were positive, with a median of approx. 80 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ and 370 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ due to manure application. On extensive grassland plots, the balances were approximately balanced.

In contrast to Cu and Zn, Cd inputs were appreciable with more intensive use of mineral fertilisers and medians of annual Cd net flows on all plots ranged between -0.6 and 3.2 g Cd $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Cd input into soils was for the most part from mineral P-fertilisers and until 2006 also from the application of sewage sludge. On plots with little mineral fertiliser and/or sewage sludge use, atmospheric deposition was the most important source of Cd. While Cu and Zn net flows did not decrease over time, Cd net flows decreased sharply from the late 1980s to the mid-1990s and have changed little since then. This decrease was due to a reduction in mineral fertiliser inputs and atmospheric deposition during the same time period. Nevertheless, on plots with intensive mineral P-fertilization and with high natural Cd content in the soil, accumulation over time cannot be ruled out. For U, the median of annual inputs from mineral P-fertilisers ranged from 0-25 g U $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ and inputs up to 50 g U $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ occurred regularly in arable farming and on

special crops. Currently, there is little U-concentration data available for farmyard manure, and input is often relatively low compared to that of mineral fertilisers.

The heavy metal net flows of individual plots were converted into theoretical accumulation rates per decade using the density of the topsoil (0-0.2 m) measured at these locations. The theoretical accumulation rates for 11 (Cu), 13 (Zn) and two (Cd) of the 46 plots were $\geq 1\%$ of the respective legal reference value; the results in these cases indicate an appreciable but relatively slow accumulation over time. No legal reference value has yet been defined for U. Just how quickly the legal reference values are effectively reached in soils also depends on the history of use and natural soil content. The results of this report form a starting point for comparison with soil data.

The uncertainties of the substance balances ranged from 15% to a multiple of the net flow and the medians per substance were between 45% and 105% of the net flow. The uncertainties were largely explained by heavy metal and nutrient concentrations in the biogenic substances farmyard manure and harvested crops. There are also appreciable uncertainties with regard to Cd and U concentrations in mineral fertilisers. A market campaign conducted by the Federal Office for Agriculture revealed that more than one third of the fertilisers sampled exceeded the legal limit for Cd.

In conclusion, the results can be seen to indicate a further accumulation of Cu and Zn in the soils of farms with high livestock densities and intensive manure application. In addition, regular use of PPPs can be expected to result in further Cu enrichment on vineyard plots. Results from substance balances and soil measurements over a period of more than 30 years offer a unique data source for contextualizing measured concentrations in the soil within agricultural management, and thus contribute significantly to the early detection, prognosis and risk assessment of substance accumulation in soils.

Résumé

Des sols sains sont essentiels à une production alimentaire durable et au bon fonctionnement des écosystèmes. Les processus physiques, chimiques et biologiques à l'œuvre dans le sol sont étroitement liés. Les sols remplissent ainsi des fonctions importantes dans les cycles de l'eau, des éléments nutritifs et du carbone. Le bilan de substances permet d'identifier de manière précoce les dangers qui menacent les sols, d'en déterminer les causes, et d'établir ainsi les bases sur lesquelles fonder le choix de mesures de protection appropriées. Le bilan de substances est un instrument du monitoring indirect et une composante importante du monitoring de l'observatoire national des sols suisses (NABO).

Dans ce cadre, nous établissons des bilans de surface des éléments nutritifs et des métaux lourds sur 46 parcelles agricoles observées par le NABO. Celles-ci sont situées dans diverses régions de la Suisse et couvrent différents types d'utilisation du sol (grandes cultures, herbages, cultures spéciales) et modes d'agriculture. Les sols de ces parcelles sont régulièrement échantillonnés et étudiés depuis 1985. De plus, des données sur l'exploitation des parcelles sont collectées annuellement. Sur la base de ces données, des bilans de surface annuels ont été établis de 1985 à 2017 pour les éléments nutritifs – azote (N), phosphore (P) et potassium (K) – et les métaux lourds – cuivre (Cu), zinc (Zn) et cadmium (Cd). Les apports par les engrais, les produits phytosanitaires (PPh) et les retombées atmosphériques pour le Cu, le Zn et le Cd, et les exportations via les récoltes ont été pris en compte. Les apports en uranium (U) par les engrais minéraux phosphorés ont également été calculés. Quant aux éléments nutritifs, ils ont été calculés sous forme de bilans d'engrais à des fins de comparaison avec les apports en métaux lourds, raison pour laquelle les apports provenant de retombées atmosphériques et d'organismes fixateurs d'azote n'ont pas été pris en compte. Les bilans de substances ont été classés selon le type d'exploitation, l'utilisation du sol et la culture principale et les incertitudes quantifiées au moyen d'une méthode stochastique.

Les quantités d'engrais et de PPh appliqués, de même que les rendements de récolte, ont été relevés annuellement auprès des exploitants des parcelles agricoles. Les concentrations en substances sont estimées sur la base de nombreuses études menées principalement en Suisse, et échantillonnées – en ce qui concerne les engrais de ferme (lisier et fumier) – sur certaines des exploitations (2006: 14 exploitations; 2018: 30 exploitations). Les retombées atmosphériques ont été estimées sur la base des résultats publiés par le réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Les parcelles NABO étaient situées en grande partie sur des exploitations de transformation combinées (13 parcelles) ou des exploitations combinées lait commercialisé / grandes cultures (11 parcelles). D'autres parcelles se situaient sur des exploitations spécialisées (vaches laitières et/ou à viande, 8 parcelles), grandes cultures (5 parcelles), cultures spéciales (7 parcelles) ou des exploitations actives dans diverses branches (2 parcelles). Au total, 27 parcelles étaient dévolues aux grandes cultures, 11 aux herbages permanents, 7 aux cultures spéciales et une parcelle, d'abord aux herbages puis aux grandes cultures.

En dehors des vignes, les apports en Cu et Zn étaient le plus souvent imputables à l'application d'engrais de ferme. Ces deux métaux lourds sont des micronutriments essentiels et parviennent dans le fumier et le lisier par l'intermédiaire du fourrage et des compléments fourragers. Les apports en Cu et Zn étaient significativement corrélés au nombre d'animaux de rente par surface agricole utile des exploitations concernées, une charge en bétail supérieure se traduisant par des apports d'engrais de ferme plus élevés. Sur les parcelles appartenant à des exploitations de transformation combinées, les médianes des flux nets annuels entre 1985 et 2017 étaient d'environ 90 g Cu par hectare et par année ($\text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) et de 405 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Pour les exploitations où la charge en bétail était élevée, les médianes atteignaient 400 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ et 950 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Cependant, en raison des applications de PPh, les flux nets de Cu les plus élevés ont été relevés sur des parcelles de vigne, avec des médianes entre 1'400 et 2'400 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Sur les parcelles d'herbages intensifs, les flux nets de Cu et de Zn étaient positifs, avec une médiane d'environ 80 g Cu $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ et 370 g Zn $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, en raison de l'épandage des engrais de ferme. Sur les parcelles d'herbages extensifs, les bilans étaient à peu près équilibrés.

Contrairement à Cu et Zn, les apports en Cd étaient corrélés à une utilisation plus intensive d'engrais minéraux et les médianes des flux nets annuels se situaient autour de -0.6 à 3.2 g Cd $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ pour toutes les parcelles. Le Cd provenait principalement des engrais minéraux et, jusqu'en 2006, des boues d'épuration. Sur les parcelles faiblement

amendées en engrais minéraux et/ou en boues d'épuration, les retombées atmosphériques étaient la principale source de Cd. Alors qu'aucune diminution globale des flux nets de Cu et Zn n'a été constatée dans le temps, les flux nets de Cd ont fortement diminué de la fin des années 1980 au milieu des années 1990 et ont peu changé depuis lors. Cette diminution est attribuable à une utilisation réduite d'engrais minéraux et à une réduction des retombées atmosphériques. Sur les parcelles où la fertilisation minérale en P est intensive et où les teneurs en Cd du sol sont naturellement élevées, une accumulation ne peut cependant être exclue à long terme. Concernant l'U, des médianes des apports annuels par le biais d'engrais minéraux contenant du P se situaient entre 0-25 g U ha⁻¹ a⁻¹. Des apports allant jusqu'à environ 50 g U ha⁻¹ a⁻¹ ont été régulièrement enregistrés, en particulier dans les grandes cultures et les cultures spéciales. On ne dispose à ce jour que de rares données sur la concentration en U des engrais de ferme mais, par rapport à celui des engrais minéraux, leur apport est plutôt faible.

Les flux nets de métaux lourds par parcelle ont été convertis en taux d'accumulation théoriques par décennie, au moyen du poids volumique de la couche arable (0-0.2 m) mesuré sur les différents plots. Les taux d'accumulation étaient de l'ordre de $\geq 1\%$ de la valeur indicative pour 11 (Cu), 13 (Zn) resp. deux (Cd) des 46 parcelles; les résultats témoignent dans ces cas d'une accumulation significative, mais relativement lente dans le temps. Aucune valeur indicative n'a encore été définie pour l'U. La rapidité avec laquelle les valeurs indicatives dans les sols sont effectivement atteintes dépend également de l'historique de l'utilisation et des teneurs naturelles des sols. Les résultats du présent rapport constituent une base de comparaison avec les valeurs pédologiques mesurées.

Les incertitudes en termes de bilan de substances variaient entre 15% et jusqu'à plusieurs fois la valeur au bilan et les médianes par substance étaient comprises entre 45% et 105% de celle-ci. Ces incertitudes étaient essentiellement liées aux concentrations en métaux lourds et en éléments nutritifs dans les substances biogènes que sont les engrais de ferme et le produit de récolte. Mais des incertitudes demeurent également quant aux teneurs en Cd et U des engrais minéraux. Une campagne de marché menée par l'Office fédéral de l'agriculture a montré que plus d'un tiers des engrais échantillonnés dépassaient la limite fixée de Cd.

Les résultats de l'étude montrent que dans les exploitations où la charge en bétail est élevée et celles où l'épandage d'engrais de ferme est intensif, les concentrations en Cu et Zn se sont encore accentuées. Pour le Cu, cela s'est également vérifié dans les parcelles de vigne en raison de l'utilisation régulière des PPh. Les résultats des bilans de substances et les données du monitoring des sols sur plus de 30 ans constituent une base unique en Suisse pour replacer dans le contexte de l'exploitation les concentrations dans le sol et apporter ainsi une contribution importante à la détection précoce, à la prévision et à l'évaluation des risques des accumulations de substances.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	5
Résumé	7
Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungen und Einheiten	13
1 Einleitung und Ziele	14
1.1 Dauerbeobachtung im NABO-Messnetz	14
1.2 Nähr- und Schadstoffe in der Landwirtschaft	15
1.3 Agrarpolitische und gesetzliche Rahmenbedingungen	17
1.4 Ziele dieses Berichts	18
2 Methodische Grundlagen der Oberflächenbilanzierung für NABO-Parzellen	20
2.1 Überblick	20
2.2 Modellierungsansatz	20
2.3 Geografische und zeitliche Systemgrenzen	21
2.4 Bilanzierung	25
2.5 Erhebung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsdaten	26
2.6 Erhebung der Stoffkonzentrationen	27
2.7 Atmosphärische Deposition von Schwermetallen	30
2.8 Unsicherheitsanalyse	30
3 Ergebnisse	34
3.1 Stoffbilanzen nach Betriebstyp und Parzellennutzung	34
3.2 Stoffbilanzen pro Kultur	52
3.3 Schwermetallbilanzen und Nährstoffeinträge	59
3.4 Zeitliche Entwicklung	61
3.5 Abschätzung der Schwermetall-Akkumulation im Oberboden	63
4 Diskussion	65
4.1 Relevanz für die Bodengesundheit	65
4.2 Schwermetalle im Kontext der Nährstoffversorgung und Pflanzengesundheit	66
4.3 Vergleich zum Agrarumweltmonitoring der Schweiz	68
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	69
5.1 Langzeit-Monitoring als Instrument der Vorsorge	69
5.2 Empfehlungen	69
5.3 Ausblick	70
Literaturverzeichnis	71
6 Anhänge	76
A1 – NABO-Betriebstypen	76
A2 – Erhebung der Bewirtschaftungsdaten	78
A3 – Konzentrationsdaten	79
A4 – Zufallsvariablen (unsichere Bilanzgrößen)	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Monitoring-Standorte und deren Landnutzung	15
Abbildung 2	Geografische Systemgrenze NABO-Parzelle und Stoffflüsse	21
Abbildung 3	Veränderungen des Anteils konventioneller, IP bzw. ÖLN und biologisch bewirtschafteter NABO-Betriebe in den 1990er-Jahren	23
Abbildung 4	Boxplots jährlicher N-Düngerbilanzen, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	35
Abbildung 5	N-Bilanzen auf NABO-Parzellen B119 und B116 von 1985-2017	36
Abbildung 6	Boxplots jährlicher P-Düngerbilanzen, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	38
Abbildung 7	P-Bilanzen auf NABO-Parzellen B150 und B014 von 1985-2017	39
Abbildung 8	Boxplots jährlicher K-Düngerbilanzen, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	41
Abbildung 9	Boxplots jährlicher Cu-Nettoflüsse, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	43
Abbildung 10	Boxplots jährlicher Cu-Nettoflüsse auf drei Rebbau-Parzellen, Ein- und Austräge von Cu auf Ackerbauparzelle B100 und Ein- und Austräge von Cu auf Rebbauarzelle B031	44
Abbildung 11	Boxplots jährlicher Zn-Nettoflüsse, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	46
Abbildung 12	Ein- und Austräge von Zn auf Rebbauarzelle B031 und Gemüseparzelle B043 von 1985-2017	47
Abbildung 13	Boxplots jährlicher Cd-Nettoflüsse, Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge und Variationskoeffizient pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	49
Abbildung 14	Ein- und Austräge von P, Cu und Cd auf NABO-Parzelle B122 von 1985-2017	50
Abbildung 15	Boxplots jährlicher U-Einträge über Mineraldünger pro Parzelle eingeteilt nach Landnutzung und Betriebstyp von 1985-2017	51
Abbildung 16	Boxplots der N-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	52
Abbildung 17	Boxplots der P-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	53
Abbildung 18	Boxplots der K-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	54
Abbildung 19	Boxplots der Cu-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	55
Abbildung 20	Boxplot der Cu-Nettoflüsse im Rebbau	55
Abbildung 21	Boxplots der Zn-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	56
Abbildung 22	Boxplots der Cd-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge	57
Abbildung 23	Boxplots der U-Einträge über Mineraldünger pro Kultur und Kulturjahr	58

Abbildung 24	N-, P- und K-Düngerbilanzen und Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse gegenüber Dünger-Grossvieheinheiten pro Betrieb von 1985-2017	59
Abbildung 25	N-, P- und K-Einträge aus Hof- bzw. Mineraldüngern gegenüber Dünger-Grossvieheinheiten	60
Abbildung 26	Cu-, Zn- und Cd-Einträge via Hof- und Mineraldünger und Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse gegenüber P-Düngerbilanzen pro Jahr und Parzelle	60
Abbildung 27	Anteil der Parzellen pro Kategorie für Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse bzw. U-Einträge über Mineraldünger auf Grasland-, Ackerbau- und Spezialkulturparzellen von 1987-2017	62
Abbildung 28	P-Einträge über Hof- und Mineraldünger auf Grasland-, Ackerbau- und Spezialkulturparzellen von 1987-2017	63
Abbildung 29	Stoffbilanzen transformiert in theoretische Akkumulationsraten im Oberboden der NABO-Parzellen pro Jahrzehnt für Cu, Zn, Cd und U	64
Abbildung 30	Anteil der Parzellen pro Kategorie für Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse bzw. U-Einträge über Mineraldünger auf allen NABO-Parzellen von 1987-2017	65

Tabellenverzeichnis

Haupttext

Tabelle 1	Überblick über Veränderungen im Agrarsektor mit Relevanz für die Stoffbilanzierung	18
Tabelle 2	Betriebstypen zwischen 1985-2000, 2001-2017 und 1985-2017: Anzahl Betriebe, durchschnittliche LN und durchschnittlicher Tierbesatz in GVE pro LN	22
Tabelle 3	Hauptsächliche Nutzung landwirtschaftlicher NABO-Parzellen von 1985-2017.....	23
Tabelle 4	Angebaute Kulturen auf NABO-Parzellen nach Erfassungsperiode.....	24
Tabelle 5	TS-, P-, Cu- und Zn-Konzentrationen in Gülleproben der Jahre 2006 und 2018	29
Tabelle 6	Anzahl Zufallsvariablen für Konzentrationswerte.....	32
Tabelle 7	Unsicherheitskategorien und angenommene Intervalle der Mengendaten	32
Tabelle 8	Schwermetall-Grenzwerte in organischen Düngern, Recyclingdüngern und Hofdüngern gemäss ChemRRV	67
Tabelle 9	Vergleich zwischen Monitoring des AUM und der NABO	68

Anhänge

Tabelle A1	Angaben zu Betrieben mit Einteilung des Betriebstyps, landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) und durchschnittlichen Grossvieheinheiten pro LN zwischen 1985-2000	76
Tabelle A2	Angaben zu Betrieben mit Einteilung des Betriebstyps, landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) und durchschnittlichen Grossvieheinheiten pro LN zwischen 2001-2017	77
Tabelle A3	Übersicht über Erhebung der Bewirtschaftungsdaten auf NABO-Betrieben über die verschiedenen Erfassungsperioden.....	78
Tabelle A4	Cu- und Zn-Konzentrationen in PSM	79
Tabelle A5	Mittlere Trockensubstanz und Konzentrationen von Nährstoffen und Schwermetallen in Hofdüngern.....	81
Tabelle A6	Mittlere Konzentrationen von Nährstoffen und Schwermetallen in Mineraldüngern.....	82
Tabelle A7	Mittlere Konzentrationen von Nährstoffen und Schwermetallen in Recyclingdüngern.....	84
Tabelle A8	Mittlere Konzentrationen von Nährstoffen und Schwermetallen im Erntegut	85
Tabelle A9	N-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert.....	87
Tabelle A10	P-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert.....	89
Tabelle A11	K-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert.....	92
Tabelle A12	Cu-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert.....	94
Tabelle A13	Zn-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert	96
Tabelle A14	Cd-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert.....	98

Abkürzungen und Einheiten

AUM	Agrarumweltmonitoring
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
CCM	<i>Corn-Cob-Mix</i> (Maiskolbenschrot)
Cd	Cadmium
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (SR 814.81)
Cu	Kupfer
DGVE	Dünger-Grossvieheinheit
FG	Frischgewicht
FMBV	Futtermittelbuch-Verordnung (SR 916.307.1)
GATT	Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen (" <i>General Agreement on Tariffs and Trade</i> ")
GRUD	Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz
GRUDAF	Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau
GSchG	Gewässergesetz (SR 814.20)
GSchV	Gewässerschutzverordnung (SR 814.201)
GVE	Grossvieheinheit
IP	Integrierte Produktion
K	Kalium
KABO	Kantonale Bodenbeobachtung
LBV	Landwirtschaftliche Begriffsverordnung (SR 910.91)
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LwG	Landwirtschaftsgesetz (SR 910.1)
N	Stickstoff
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NABO	Nationale Bodenbeobachtung der Schweiz
NABO-Betriebe	Betriebe, welche der NABO Bewirtschaftungsdaten zur Verfügung stellen
NABO-Parzellen	Landwirtschaftliche Parzellen, auf welchen sich NABO-Standorte befinden
NABO-Standorte	Flächen, welche im direkten Bodenmonitoring der NABO beprobt werden
NFP	Nationales Forschungsprogramm
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
P	Phosphor
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PSM	Pflanzenschutzmittel
TS	Trockensubstanz
TSG	Tierseuchengesetz (SR 916.40)
U	Uran
UN	United Nations
USG	Umweltschutzgesetz (SR 814.01)
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens (SR 814.12)
VSBo	Verordnung über Schadstoffe im Boden (SR 814.12)
WTO	Welthandelsorganisation (" <i>World Trade Organization</i> ")
Zn	Zink
a	Jahr
ha	Hektar
kg	Kilogramm
m	Meter
t	Tonne
t _N , t _{TS}	Tonne Stickstoff, Tonne Trockensubstanz (analog für andere Substanzen)

1 Einleitung und Ziele

1.1 Dauerbeobachtung im NABO-Messnetz

Die Nationale Bodenbeobachtung der Schweiz (NABO) wurde 1984 mit dem Ziel eingerichtet, die langfristige Entwicklung der Schadstoffbelastung im Boden zu verfolgen. Die NABO wurde später in der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo 1986) verankert. Mit deren Ablösung durch die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) wurde die Definition der Bodenfruchtbarkeit breiter ausgelegt und neben chemischen Belastungen neu auch biologische und physikalische Belastungen explizit eingeschlossen. Infolgedessen wurden bodenbiologische und physikalische Untersuchungen in die Aktivitäten der NABO integriert. Das langfristige Monitoring der NABO ist ein zentrales Instrument des vorsorgenden Bodenschutzes. Mögliche Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit sollen frühzeitig erkannt und prognostiziert werden, um rechtzeitig entsprechende Gegenmassnahmen zu ergreifen (Desaules und Studer 1993). Gleichzeitig dient das Monitoring als Erfolgskontrolle für ergriffene Massnahmen, indem deren Wirkungen auf den Boden dokumentiert werden.

Die NABO betreibt ein Messnetz von aktuell 112 Monitoring-Standorten (Abbildung 1, Stand: Mai 2021). Diese NABO-Standorte repräsentieren für die Schweiz typische Kombinationen aus Landnutzung, Bodentyp, Geologie, Höhenstufe und anderen Standorteigenschaften. Rund zwei Drittel der Standorte sind landwirtschaftlich genutzt (Acker, Dauerwiese, Spezialkulturen) und ein Drittel der Standorte liegt im Wald. Die Beobachtungsflächen sind weder markiert, abgesperrt noch anderweitig geschützt, so dass die Verhältnisse der Nutzung möglichst praxisnah erhoben werden. Die NABO-Standorte werden in der Regel alle fünf Jahre beprobt und analysiert. Für verschiedene Bodenkennwerte und Schadstoffgehalte sind inzwischen Zeitreihen über mehr als 30 Jahre verfügbar (Gubler et al. 2015a, 2015b, 2019).

Als Ergänzung zum direkten Monitoring betreibt die NABO ein sogenanntes indirektes Monitoring: Hierbei werden von aktuell 46 landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorten jährlich Bewirtschaftungsdaten erhoben, welche zur Modellierung von Stoffbilanzen und in Bodenprozess-Modellen genutzt werden. Die Quantifizierung wichtiger Ein- und Austräge von Nähr- und Schadstoffen ist essentiell, um Trends zu erkennen, noch bevor diese im Boden messbar sind. So können geeignete Massnahmen zur Reduktion möglicher Nährstoffüberschüsse und übermässiger Schadstoffeinträge abgeleitet werden. Die erhobenen Daten bilden zudem eine wertvolle Basis für Bodenprozess-Modelle wie auch für Stoffflussbetrachtungen auf regionaler Ebene (z.B. Della Peruta et al. 2014). Die generellen Ziele des indirekten Monitorings sind:

- Erfassung relevanter Nähr- und Schadstoffflüsse auf Parzellenebene;
- Frühzeitige Prognose möglicher unerwünschter Entwicklungen (Vorsorge zum Schutz der Bodenfruchtbarkeit);
- Ableitung geeigneter Handlungsmassnahmen für ausgeglichene Stoffkreisläufe;
- Plausibilisierung und Ursachenanalyse für die im direkten Boden-Monitoring beobachteten zeitlichen Verläufe.

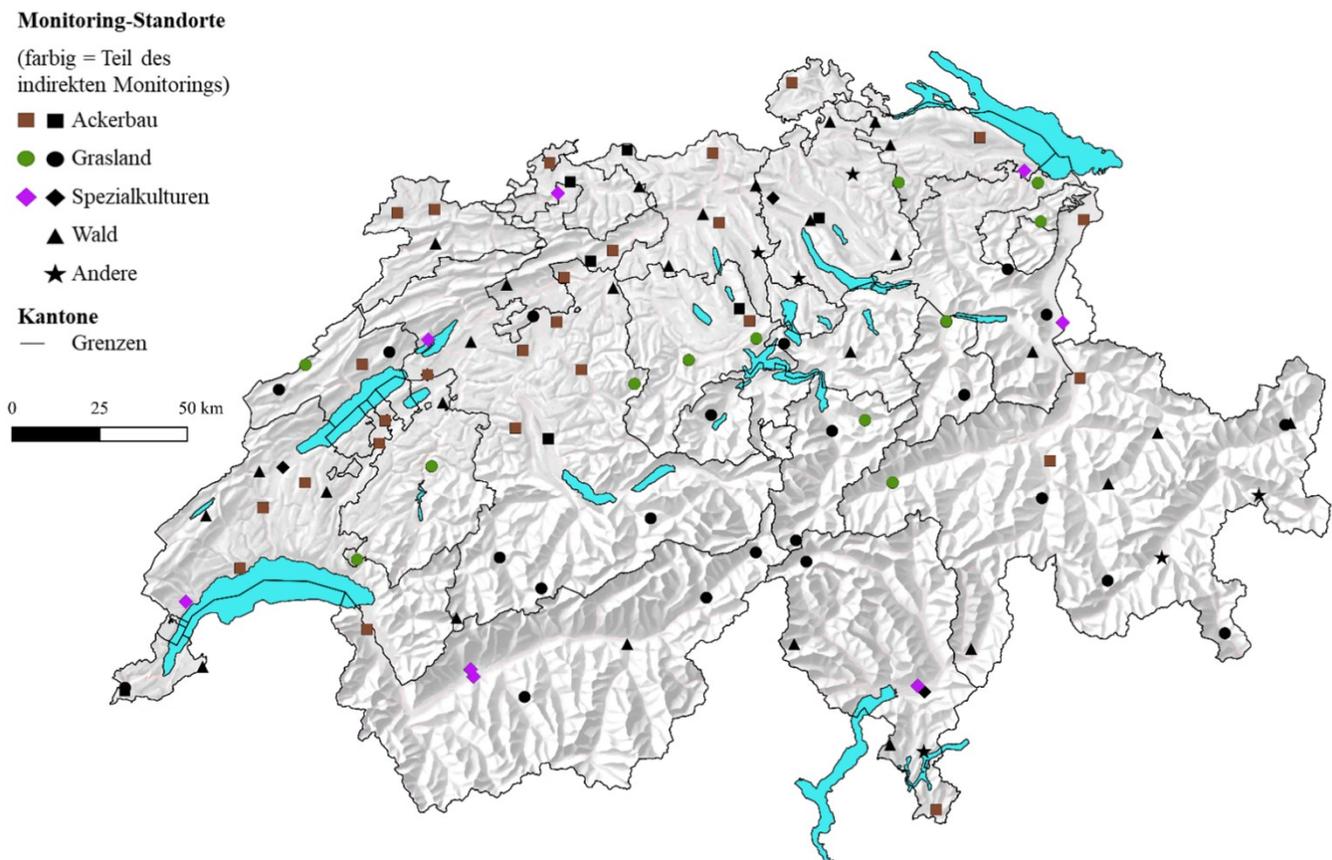


Abbildung 1 Monitoring-Standorte ("NABO-Standorte") und deren Landnutzung

1.2 Nähr- und Schadstoffe in der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist in den meisten europäischen Ländern der mit Abstand grösste Nutzer von Flächen. Ihr Anteil an der Gesamtfläche beträgt z.B. rund 36% in der Schweiz, 52% in Deutschland und 44% in Österreich (BFS 2013, Destatis 2018). Landwirtschaftliche Aktivitäten haben weitreichende Einflüsse auf den Zustand von Böden, welche u.a. mit der physischen Veränderung der Landschaft, dem Einsatz schwerer Maschinen und der Anwendung landwirtschaftlicher Hilfsstoffe zusammenhängen. Dieser Bericht beschäftigt sich mit dem letzteren Aspekt und quantifiziert Nährstoffe sowie Schwermetalle, welche u.a. durch Dünger und Pflanzenschutzmittel (PSM) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ein- und über das Erntegut ausgetragen werden. Die Differenz zwischen Ein- und Austrägen einzelner Substanzen auf einer bestimmten Fläche über einen bestimmten Zeitraum wird als Nettofluss definiert, der entweder negativ (Nettoaustrag, vom Boden weg), ausgeglichen oder positiv (Nettoeintrag) sein kann.

Zur Deckung des pflanzlichen Nährstoffbedarfs sind die Kreisläufe von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) miteinander verknüpft, und stehen in einem teils engen Verhältnis zu Schwermetalleinträgen in Böden. Insbesondere durch Hofdünger aus der Tierproduktion bestehen seit Jahrzehnten hohe N-Überschüsse in der Landwirtschaft (BLW 2019). N ist im Boden und in Hofdüngern sehr mobil und entweicht leicht als Nitrat (NO_3) ins Grundwasser oder als Ammoniak (NH_3) in die Luft, wo es sich negativ auf Mensch und Umwelt auswirken kann (z.B. Last et al. 2015, Rihm und Achermann 2016). In der Praxis müssen Düngergaben basierend auf Vorgaben von Düngungsempfehlungen (Flisch et al. 2009, Richner und Sinaj 2017) und bestimmten Standort- und Bodeneigenschaften abgeschätzt werden. Dies ist aufgrund der hohen Mobilität von N im Boden sowie des zeitlich und räumlich verteilten pflanzlichen N-Bedarfs kaum mit hoher Genauigkeit möglich. Nur ein Teil des eingesetzten N wird daher letztlich von der Nutzpflanze aufgenommen; ein grösserer Teil verbleibt im Boden, gelangt in Gewässer oder entweicht in die Atmosphäre. Obwohl sich das N-Management auf landwirtschaftlichen Betrieben aufgrund verschiedener Gesetze und Richtlinien in der Schweiz verbessert hat, war der N-Überschuss im Jahr 2018 immer noch rund 97'000 Tonnen (t) N bzw. 93 kg N pro Hektar (ha) landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) pro Jahr ($\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, Spiess und Liebisch 2020).

P ist ebenfalls eine landwirtschaftliche und ökologische Schlüsselsubstanz. P ist im Boden weniger mobil als N und liegt mehrheitlich in stark gebundenen Fraktionen vor (Frossard et al. 2000). Eine zu grosse P-Zufuhr sollte vermieden werden, da P durch Erosion, Oberflächenabfluss und Drainagen in Gewässer gelangen und dort zur Eutrophierung beitragen kann. Da P-Vorräte weltweit limitiert sind, werden geschlossene P-Kreisläufe angestrebt, z.B. durch die Anwendung von Kompost oder anaeroben Digestaten aus biogenen Abfällen und künftig mithilfe neuartiger mineralischer P-Recyclingdünger aus Klärschlamm (Mihelcic et al. 2011, Nanzer et al. 2014). In der Schweiz konnten mittlere P-Überschüsse bezogen auf die LN von $27 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 1980 seit Beginn der 1990er-Jahre auf rund $5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (bzw. insgesamt 5'300 t P in der Schweizer Landwirtschaft) im Jahr 2018 reduziert werden (BLW 2019, Spiess und Liebisch 2020). Dies konnte vor allem durch reduzierten Einsatz von P-Mineraldüngern aufgrund von veränderten Düngungsempfehlungen, verbessertem Einsatz von Wirtschaftsdüngern und vermutlich aus Kostengründen erreicht werden. Trotz dieser Verbesserungen haben hohe P-Einträge in Böden über Jahrzehnte zu teils relativ hohen P-Gehalten geführt, welche in der Regel nur langsam über Jahrzehnte durch angepasste Düngungspläne abgebaut werden können (Gubler et al. 2015a).

K wird von Pflanzen als K^+ aus der Bodenlösung aufgenommen und ist unerlässlich u.a. zur Regulierung des Wasserhaushalts, zur Einstellung des osmotischen Drucks, zur Photosynthese sowie zur Stärkebildung (Amelung et al. 2018). Im Jahr 2008 betrug der K-Eintrag auf landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz knapp $38 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, was den K-Bedarf der Nutzpflanzen um ca. $28 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ überstieg (Spiess 2011). Im Gegensatz zu N und P sind keine negativen Auswirkungen durch Verlagerung in andere Ökosysteme bekannt (Amelung et al. 2018).

Düngemittel und andere landwirtschaftliche Hilfsstoffe enthalten in der Regel neben erwünschten Stoffen auch Spuren oder je nach Qualität erhöhte Konzentrationen an Schwermetallen wie Kupfer (Cu), Zink (Zn), Cd (Cadmium) und Uran (U), und/oder persistente organische Schadstoffe wie polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Verschiedene Schadstoffe können sich im Boden anreichern, über die Pflanzen in die Nahrungskette gelangen, ins Grundwasser und Oberflächengewässer ausgewaschen werden und langfristig die Bodenfruchtbarkeit gefährden (McLaughlin et al. 1996). Dieser Bericht geht auf die Schwermetalle Cu, Zn, Cd und U ein, da diese durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung in grösseren Mengen eingetragen werden, sich im Boden anreichern können und ausser für U Messwerte in Böden aus dem direkten Bodenmonitoring der NABO vorliegen. Grundsätzlich sind in hoher Konzentration alle Schwermetalle schädlich für Menschen, Tiere und Pflanzen, gleichzeitig sind manche von ihnen, wie z.B. Cu und Zn, aber auch essenzielle Mikronährstoffe (Schultheiss et al. 2004, Schlegel 2011, Schlegel und Kessler 2016).

Cu und Zn können sich v.a. durch die Ausbringung von Hofdüngern in Böden anreichern und stammen u.a. aus Zusätzen in Futtermitteln (Schultheiss et al. 2004, Schlegel 2011, Schlegel und Kessler 2016). Obwohl Futtermittel in der Regel nur geringe Schwermetallkonzentrationen aufweisen, stellen diese aufgrund ihrer grossen Einsatzmasse den Haupteintragspfad für Schwermetalle in Hofdünger dar (Schultheiss et al. 2004). Auf intensiv bewirtschafteten Grasland- und Ackerbauparzellen des NABO-Messnetzes wurde über die vergangenen zwei Jahrzehnte ein zunehmender Trend für Cu- und Zn-Gehalte im Boden festgestellt, während Quecksilber- und Blei-Gehalte abnahmen und Gehalte anderer Schwermetalle sich kaum verändert haben (Gubler et al. 2015a). Auf Spezialkulturen wie Rebbau-parzellen sind insbesondere PSM gegen Pilzbefall ein wichtiger Cu-Eintragspfad (Keller et al. 2005, Gubler et al. 2015a).

Mineralische P-Dünger können je nach Herkunft des für die Düngerherstellung verwendeten Rohertes stark erhöhte Cd- und U-Gehalte aufweisen (Nziguheba und Smolders 2008, Ulrich et al. 2014, BLW 2012, Bigalke et al. 2020). Cd aus P-Mineraldüngern reichert sich im Oberboden an, wobei es überwiegend in einer leicht gebundenen Form bleibt und somit im Vergleich zu geogenem Cd wesentlich mobiler und pflanzenverfügbarer ist (Mann et al. 2002, Bigalke et al. 2017). Daher kann P-Mineraldüngung zu erhöhten Cd-Gehalten in Pflanzen führen, was jedoch stark von Pflanzenart, Sorte, Klima und Bodeneigenschaften abhängig ist (Wilcke und Döhler 1995, McLaughlin et al. 1996). U kommt mehrheitlich über mineralische P-Dünger auf landwirtschaftliche Böden, da U natürlicherweise in zur Düngerherstellung verwendeten Roherten vorkommt und während der Aufbereitung zu Düngemitteln konzentriert wird (Nziguheba und Smolders 2008). U ist schwach radioaktiv und ab gewissen Konzentrationen für Men-

schen und Tiere toxisch (SCHER 2010, WHO 2012, Roth und Fitzgerald 2015). Eine aktuelle Studie auf ausgewählten NABO-Standorten zeigte U-Einträge zwischen 2.7-8.1 g U ha⁻¹ a⁻¹ durch mineralische P-Dünger und 0.0-2.2 g U ha⁻¹ a⁻¹ durch Hofdünger; Einträge durch Verwitterung von Grundgestein war nur auf Böden mit Kalk-Gestein relevant mit 1.1-1.2 g U ha⁻¹ a⁻¹ (Bigalke et al. 2020). In Hofdünger kann U über Phosphat in Futtermittelzusätzen (wie bei Mineraldüngern stammt das U aus dem verwendeten Rohrz) sowie über die Aufnahme von Bodenmaterial während Nahrungsaufnahme gelangen (Arruda-Neto et al. 1997, Bigalke et al. 2020). Eine weitere Studie zeigte auf sechs NABO-Parzellen, auf welchen regelmässig P-Mineraldünger in grösseren Mengen eingesetzt werden, U-Einträge von 10-50 g U ha⁻¹ a⁻¹ über Mineraldünger zwischen 1985-2013, auf einer Parzelle mit regelmässigen Anwendungen von Triple-P Mineraldünger sogar bis zu 120 g U ha⁻¹ a⁻¹ (Bigalke et al. 2016). U akkumuliert in oberirdischer Biomasse in eher geringem Ausmass, es kann aber an Wurzeln adsorbieren und via Wurzelgemüse in die menschliche Nahrungskette gelangen (SCHER 2010). Bedeutender für eine mögliche Aufnahme durch den Menschen ist jedoch die Auswaschung von U ins Grundwasser, von wo es ins Trinkwasser gelangen kann (Schnug und Lottermoser 2013, Bigalke et al. 2020).

1.3 Agrarpolitische und gesetzliche Rahmenbedingungen

Gesetzliche Vorgaben zu erlaubten Gehalten und Frachten von Schadstoffen in landwirtschaftlichen Hilfsstoffen und deren Einträge in Böden, Erntegut, Gewässer und die Luft sind auf verschiedene thematische Gesetze und Verordnungen verteilt. Zu den wichtigsten Gesetztestexten können in diesem Zusammenhang die Umweltschutz-, Gewässerschutz-, Landwirtschafts- und Tierseuchengesetze gezählt werden (USG 1983, GschG 1991, LwG 1998, TSG 1966). Tabelle 1 zeigt einen Überblick über für die Stoffbilanzierung wesentliche Veränderungen im gesetzlichen und politischen Kontext seit den 1980er-Jahren.

Grundlegend war das Inkrafttreten des neuen Umweltschutzgesetzes von 1983 (USG 1983), in welchem u.a. eine langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Artikel 33) und die Möglichkeit des Erlasses von Vorschriften zu Stoffen, welche die Umwelt oder den Menschen gefährden, verankert sind (Artikel 29). Das USG wurde für Belange des Bodens weiter konkretisiert durch die Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo 1986), später abgelöst durch die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö 1998), sowie die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV 2005). Die ChemRRV macht Vorgaben zu Schadstoffgehalten in Hof- und Mineraldüngern und verbietet seit 2005 auch die direkte Ausbringung von Klärschlamm, welche zuvor unter gewissen Richtlinien der Klärschlammverordnung aus 1981 erlaubt war (Tabelle 1). Ein wichtiger Grund für das Verbot waren erhebliche Schwermetallfrachten, welche mit dem Einsatz von unbehandeltem Klärschlamm einherging (Keller und Desaulles 1997, Herter et al. 2003). Zusätzlich machen das Gewässerschutzgesetz und die Gewässerschutzverordnung (GschG 1991, GSchV 1998) Vorgaben zum Einsatz von Hofdüngern. Eingehendere Informationen zu Gesetzen und praktischen Aspekten in Bezug auf Düngung bieten die Publikationen *"Düngung und Umwelt"* des BLW und BAFU (Dettwiler et al. 2006) sowie die *"Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz"* (GRUD, Richner und Sinaj 2017). Die vom BAFU herausgegebenen Publikationen *"Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft"* gehen in verschiedenen praxisorientierten Modulen u.a. auf Bodenschutz, PSM und Nährstoffe ein (BAFU und BLW 2012, 2013a, 2013b); bisher existiert in der Publikationsreihe kein spezifisches Modul zu stofflichen Belastungen.

Auf betrieblicher Ebene waren während der 1990er-Jahre die Einführung der Integrierten Produktion (IP), des Ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) als Bedingung zum Erhalt von Direktzahlungen sowie die Förderung der biologischen Landwirtschaft wichtige Meilensteine, welche sich u.a. über Richtlinien zum Einsatz von Düngern sowie zur Tierhaltung auf Stoffflüsse auswirkten (Tabelle 1). Zu den Anforderungen des ÖLN zählen eine ausgeglichene Düngerbilanz, eine geregelte Fruchtfolge, eine gezielte Anwendung von PSM sowie eine tiergerechtere Nutztierhaltung (LwG 1998). Mit der Umstellung zum ÖLN gab es, u.a. geprägt durch die Uruguay-Runde, einen Systemwechsel bei den Direktzahlungen, welche seither hauptsächlich flächengebunden ausbezahlt werden und Preis- und Abnahmegarantien ablösen (BLW 2005). Die Abkehr von Preis- und Abnahmegarantien sollte einer auf maximalen Ertrag ausgerichteten Landwirtschaft, welche auf einen erheblichen Einsatz landwirtschaftlicher Hilfsstoffe angewiesen ist, Einhalt gebieten und zudem handelsverzerrende Anreize eingrenzen.

Tabelle 1 Überblick über Veränderungen im Agrarsektor mit Relevanz für die Stoffbilanzierung

Jahr	Veränderung	Relevanz
1981	Klärschlammverordnung (1981)	Mindestqualität und definierte Zeiträume zur Ausbringung von Klärschlamm
1983	Neues Umweltschutzgesetz (USG 1983)	Langfristiger Schutz der Bodenfruchtbarkeit Grundlage für Vorschriften zum Schutz von Böden vor stofflichen Belastungen (z.B. VSBo 1986, ChemRRV 2005)
1986	Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo 1986)	Konkretisierte Vorschriften über Bodenschadstoffe gemäss USG (1983), später durch VBBo (1998) ersetzt
1989	Gründung IP-Suisse	Ausgeglichene Nährstoffbilanz auf IP-Betrieben Definition erlaubter und verbotener Hilfsstoffe
1991	Neues Gewässerschutzgesetz (GSchG 1991)	Sektorenübergreifende Gesetze zum Gewässerschutz, für die Landwirtschaft insbesondere in Bezug auf Hofdünger relevant Obergrenze Tierhaltung auf Betrieben anhand von Dünger-Grossvieheinheiten (DGVE) pro LN Hofdünger-Abnahmeverträge falls LN für Hofdüngerausbringung nicht ausreichend
1994	Abschluss der Uruguay-Runde im Rahmen des Allgemeinen Zoll- und Handelsabkommens (" <i>General Agreement on Tariffs and Trade</i> ", GATT)	Verbindliche Regeln zum Agrarhandel, u.a. in Bezug auf die Gestaltung von weniger marktverzerrenden Subventionen insbesondere durch Direktzahlungen
1996	Verfassungsartikel zur Reform der Agrarpolitik von Volk und Ständen gutgeheissen	Agrarpolitik wird strategisch ausgerichtet auf naturnahe Landwirtschaft Basis für neues Landwirtschaftsgesetz von 1998
1998	Landwirtschaftsgesetz (LwG 1998)	Ökologischer Leistungsnachweis (ÖLN) als Bedingung für Direktzahlungen Verbindliche ökologische Standards
	Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998)	Zweck: Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit Definition, unter welchen Bedingungen Boden als "fruchtbar" gilt
2005	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV 2005)	Einsatz von Klärschlamm ab Herbst 2006 verboten (Artikel 3, Anhang 2.6)
2015	UN-Agenda 2030 für eine nachhaltige Entwicklung (UN 2015)	Die Agrarpolitik des Bundes ist Bestandteil der nationalen Anstrengungen zum Erreichen der Ziele für nachhaltige Entwicklung (Schweizerischer Bundesrat 2020) Ziel 2 umfasst explizit eine nachhaltige Landwirtschaft und Ernährungssicherheit, Ziel 12 strebt nachhaltiges Konsum- und Produktionsverhalten an
2016	Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016-2019 (Schweizerischer Bundesrat 2016)	Bezugnahme auf Agenda 2030
2017	Aktionsplan Pflanzenschutzmittel (AP PSM, Schweizerischer Bundesrat 2017)	Risiken des Einsatzes von PSM sollen halbiert werden Alternativen zu chemischen PSM sollen gefördert werden

Der Wandel hin zu einer ökologischeren Landwirtschaft geschah bzw. geschieht auch im Kontext sektorenübergreifender und internationaler Abkommen hin zu einer nachhaltigeren Entwicklung. Internationale Meilensteine waren hier die im Jahr 2000 formulierten Millenniums-Entwicklungsziele sowie später die Agenda 2030, welche die Schweizer Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016-2019 wesentlich mitprägen (UN 2015, Schweizerischer Bundesrat 2016). Zahlreiche Ziele stehen in einem engen Bezug zur Landwirtschaft und zum Schutz von Böden, insbesondere Ziele 2 (Ernährungssicherheit und Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft), 6 (Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser), 12 (nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster), 13 (Massnahmen gegen den Klimawandel) und 15 (u.a. Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Boden-degradation beenden und Biodiversität schützen).

1.4 Ziele dieses Berichts

Der vorliegende Bericht ist eine Aktualisierung und Fortschreibung des Berichtes "*Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftsparzellen der Nationalen Bodenbeobachtung*" (Keller et al. 2005) und verfolgt vier Hauptziele:

- Dokumentation der Ein- und Austräge von Nährstoffen und ausgewählten Schwermetallen an landwirtschaftlich genutzten NABO-Standorten und deren Aggregation zu Oberflächenbilanzen für die Erfassungsperiode 1985-2017;
- Einordnung der Bilanzen in den Kontext der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und wesentlicher Veränderungen in den gesetzlichen Rahmenbedingungen;
- Früherkennung möglicher Stoffanreicherungen aufgrund von Vergleichen mit Grenzfrachten und Berechnung von Akkumulationsraten im Boden;
- Empfehlungen und Schlussfolgerungen für die Ableitung von Instrumenten für den Bodenschutz und die Umweltberichterstattung (z.B. Indikatoren).

Oberflächenbilanzen von Nährstoffen und Schwermetallen wurden auf landwirtschaftlich genutzten Parzellen anhand von Bewirtschaftungsdaten jährlich von 1985-2017 berechnet. Die Oberflächenbilanzen wurden anschliessend nach Betriebstypen, Parzellennutzung und Intensität der Nutztierhaltung im Kontext der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung eingeordnet.

Als Beitrag zur Früherkennung und zur Prognose von Anreicherungen von Nähr- und Schadstoffen in Böden geht dieser Bericht weiter auf die Frage ein, welche theoretischen Schwermetall-Akkumulationsraten sich aus den berechneten Oberflächenbilanzen ableiten lassen. Diese theoretischen Schwermetall-Akkumulationsraten werden mit gesetzlichen Richtwerten verglichen, um mögliche Veränderungen der Bodenqualität im Sinne der Vorsorge zu beurteilen und einen möglichen Handlungsbedarf zu erkennen. Eine Schadstoffakkumulation kann auf diese Weise frühzeitig erkannt und vermieden werden, bevor gegebenenfalls Richtwerte im Boden überschritten sind. Gemäss der Erläuterung zur VBBo (1998) sind für den Vollzug im Bodenschutz auch bei einem Anstieg eines Schadstoffs im Boden unterhalb des Richtwerts Massnahmen angezeigt. Daneben werden die Stoffflüsse auch anhand vorsorgeorientierter Grenzfrachten beurteilt, welche in Deutschland gelten, in der Schweiz jedoch bisher nicht definiert wurden.

Auf Basis der Erkenntnisse werden Empfehlungen und Schlussfolgerungen für den Bodenschutz auf landwirtschaftlichen Böden abgeleitet. Insbesondere wird geprüft, ob sich Indikatoren ableiten lassen für die Umweltberichterstattung und für bestehende Monitoring-Systeme.

2 Methodische Grundlagen der Oberflächenbilanzierung für NABO-Parzellen

2.1 Überblick

Mithilfe von Stoffbilanzen werden Ein- und Austräge von Stoffmengen für räumlich und zeitlich definierte Systeme berechnet. Der Nettowert einer Bilanz ("Nettofluss") kann hierbei negativ (Einträge sind kleiner als Austräge), null bzw. ausgeglichen (Einträge sind gleich gross wie Austräge) oder positiv (Einträge sind grösser als Austräge) sein. Für landwirtschaftliche Systeme existieren insbesondere für Nährstoffe zahlreiche Bilanzierungsansätze und Softwarelösungen, welche sich je nach Fragestellung stark unterscheiden können (Goodlass et al. 2003). Stoffbilanzen und deren zugrundeliegende Analyse von Masseflüssen stellen wertvolle Grundlagen u.a. zur Einschätzung von Umweltauswirkungen mittels Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen), öko- und humantoxikologische Einschätzungen und Risikobewertungen dar (z.B. Oberholzer et al. 2012, Brunner und Rechberger 2017).

Die Aussagekraft und Zuverlässigkeit von Stoffbilanzen sind im Wesentlichen durch das Zusammenspiel von Zielsetzung, Methodenwahl, räumlichen und zeitlichen Bilanzierungseinheiten sowie Datenverfügbarkeit geprägt. Die Zielsetzung der Stoffbilanzierung in diesem Bericht wurde bereits oben beschrieben (Kapitel 1.4). Daran anknüpfend werden in diesem Kapitel zunächst der Modellierungsansatz (Kapitel 2.2), die Systemgrenzen (Kapitel 2.3) und Bilanzierungsformeln (Kapitel 2.4) vorgestellt. Danach werden die zur Bilanzierung erhobenen Mengendaten (Kapitel 2.5) und Konzentrationsdaten (Kapitel 2.6) sowie die Schätzung der atmosphärischen Deposition (Kapitel 2.7) erläutert. Die Berechnung von Stoffbilanzen über 46 Parzellen und einen Zeitraum von 33 Jahren geht mit verschiedenen Unsicherheiten einher, welche mittels eines stochastischen Ansatzes quantifiziert wurden (Kapitel 2.8).

2.2 Modellierungsansatz

Je nach Fragestellung und Verfügbarkeit benötigter Daten können Bilanzmodelle unterschiedlich komplex sein und können diesbezüglich in drei Grundtypen eingeteilt werden (Oenema et al. 2003):

- **Hoforbilanz:** Als Ein- und Austräge werden Stoffe erfasst, die über verschiedene Produkte (z.B. P in zugekauften Düngern) innerhalb eines definierten Zeitraums auf einen Hof zugeführt bzw. von diesem weggeführt (z.B. P in verkaufter Ernte) werden. Ein Hof kann ein einzelner landwirtschaftlicher Betrieb sein bzw. mehrere Betriebe eines Gebietes zusammenfassen, wie beispielsweise für die nationale P-Bilanz (BLW 2014) und kürzlich erschienene Nährstoffbilanzen der schweizerischen Landwirtschaft (Spiess und Liebisch 2020).
- **Oberflächenbilanz:** Als Ein- und Austräge werden Stoffe erfasst, die über verschiedene Produkte innerhalb eines definierten Zeitraums auf eine bestimmte Fläche zugeführt bzw. von dieser Fläche weggeführt werden. Eine Fläche kann z.B. eine landwirtschaftliche Parzelle oder die landwirtschaftliche Nutzfläche eines Betriebes darstellen, wie z.B. in P-Bilanzen des Schweizer Agrarumweltmonitorings (AUM, BLW 2014) sowie N- und P-Bilanzen landwirtschaftlicher Kulturen (Bosshard und Richner 2013).
- **Prozessbilanz:** Biogeophysikalische Bodenprozesse werden zur Berechnung von oberflächlichen, lateralen und vertikalen Ein- und Austrägen modelliert, wobei Oberflächenbilanzen häufig wichtige Eingabegrössen liefern und/oder zur Kalibrierung und Validierung von Modellresultaten herangezogen werden können. Prozessbilanzen wurden beispielsweise zur Quantifizierung von P-Flüssen in Schweizer Agrarökosystemen angewendet (Della Peruta et al. 2014).

Während Hofor- und Oberflächenbilanzen sich oft auf bereits verfügbare Daten auf Stufe landwirtschaftlicher Betriebe (z.B. Anzahl Tiere, Kulturen und Flächen) abstützen, benötigen Prozessbilanzen weitaus mehr Daten zu Standorteigenschaften, Klima und Nutzung. Die Anwendung von Prozessmodellen, wie sie beispielsweise auf der Plattform der *International Soil Modeling Consortium* (ISMC) zusammengefasst und dokumentiert sind, stellen einerseits

die mächtigsten und umfangreichsten Tools zur Bearbeitung vieler Fragestellungen dar, erfordern aber andererseits einen hohen Zeitbedarf zur Datenverarbeitung, Kalibrierung und Validierung.

Der in dieser Studie verfolgte Ansatz entspricht einer Oberflächenbilanz. Im Detail werden die geografische Systemgrenze sowie die berechneten Flüsse in Abbildung 2 dargestellt und im Folgenden erläutert.

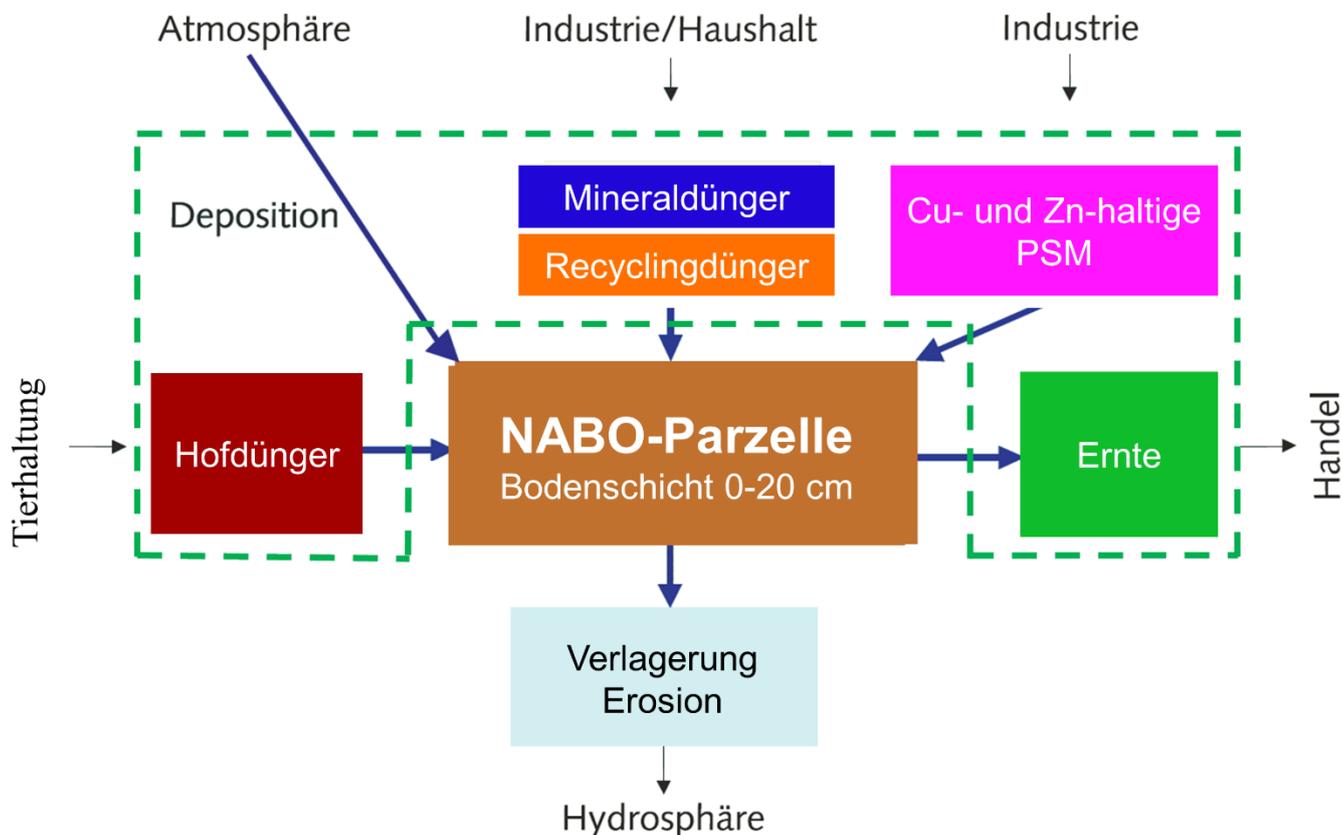


Abbildung 2 Geografische Systemgrenze NABO-Parzelle und Stoffflüsse. In diesem Bericht werden Flüsse innerhalb der grün gestrichelten Box quantifiziert. Angepasst aus Keller et al. (2005)

2.3 Geografische und zeitliche Systemgrenzen

2.3.1 Allgemeines

Das NABO-Messnetz umfasst derzeit (Mai 2021) 112 Standorte, welche im direkten Monitoring mindestens alle fünf Jahre beprobt und analysiert werden. An diesen Standorten werden Bodenproben auf einer jeweils nicht markierten Fläche von 10 m x 10 m genommen. Von den insgesamt 78 landwirtschaftlich bewirtschafteten NABO-Standorten werden 46 durch das indirekte Monitoring erfasst und bilden die Datengrundlage dieses Berichts (Gross et al. 2021). Bei den landwirtschaftlichen NABO-Standorten handelt es sich um ausgewählte Parzellen von unterschiedlichen Betrieben. Diese NABO-Parzellen stellen die geografische Systemgrenze dieses Berichts dar. Für die Bilanzierung pro Parzelle (Kapitel 2.4.1) stellen jährliche Daten von 1985-2017 (Kalenderjahre) die zeitliche Systemgrenze dar, für die Bilanzierung pro Kultur (Kapitel 2.4.2) sogenannte Kulturjahre, d.h. der Zeitraum zwischen Saat und Ernte einer bestimmten Kultur.

2.3.2 Betriebe

Die 46 landwirtschaftlich bewirtschafteten NABO-Parzellen befinden sich in unterschiedlichen Natur-, Kultur- und Sprachräumen und stellen verschiedene für die Schweiz typische Nutzungstypen und -intensitäten sowie unterschiedliche klimatische und bodencharakteristische Gegebenheiten dar (Desaules und Studer 1993, Gross et al. 2021). Von den Betrieben, welche die verschiedenen NABO-Parzellen bewirtschaften ("NABO-Betriebe"), werden

seit 1985 jährlich die wichtigsten Kennzahlen zu LN, Tierhaltung und Landnutzung (Ackerbau-, Grasland- und Spezialkulturen) erfasst. Basierend auf diesen Angaben wurden die NABO-Betriebe anhand der Betriebstypologie ZA2015 (Hoop und Schmid 2016) in Betriebstypen eingeteilt. Die Einteilung wurde für zwei Zeiträume (1985-2000 und 2001-2017) separat sowie über den gesamten Zeitraum von 1985-2017 vorgenommen (Tabelle 2). Die Einteilung über den gesamten Zeitraum entspricht somit einem "durchschnittlichen" Betriebstypen, auf welchen in den Stoffbilanzen (z.B. Abbildungen in Kapitel 3.2) Bezug genommen wird. Dies scheint gerechtfertigt, da sich die Zuordnung zu einem bestimmten Betriebstypen nur in wenigen Fällen verändert hat. Wo nötig, wird im Text auf Änderungen des jeweiligen Betriebstyps hingewiesen.

Tabelle 2 Betriebstypen zwischen 1985-2000, 2001-2017 und 1985-2017: Anzahl Betriebe, durchschnittliche LN und durchschnittlicher Tierbesatz in GVE pro LN über den jeweiligen Zeitraum (detaillierte Angaben in Tabelle A1 und Tabelle A2)

Zeitraum (Jahre)	Betriebstypen	Anzahl Betriebe	Durchschnittliche LN (ha)	Durchschnittlicher Tierbesatz (GVE ha ⁻¹)
1985-2000	Ackerbau	5	25.3	0.3
	Rindvieh ^A	10	27.3	1.3
	Kombiniert Milchkühe/Ackerbau	11	32.3	1.7
	Kombiniert Veredlung	12	42.9	1.7
	Kombiniert andere	2	13.0	1.0
	Spezialkultur	6	0.7	0.0
2001-2017	Ackerbau	5	39.7	0.3
	Rindvieh ^A	8	39.2	1.5
	Kombiniert Milchkühe/Ackerbau	12	34.8	1.8
	Kombiniert Veredlung	13	46.7	1.7
	Kombiniert andere	2	37.9	1.9
	Spezialkultur	7	9.4	0.1
1985-2017	Ackerbau	5	32.5	0.3
	Rindvieh ^A	8	32.6	1.4
	Kombiniert Milchkühe/Ackerbau	11	33.5	1.7
	Kombiniert Veredlung	13	44.9	1.7
	Kombiniert andere	2	25.5	1.4
	Spezialkultur	7	5.4	0.1

^A Vereinfachend wurden die Betriebstypen "Milchkühe", "Mutterkühe" oder "Rindvieh gemischt" gemäss ZA2015 (Hoop und Schmid 2019) zu "Rindvieh" zusammengefasst, da über die Jahre nicht immer zwischen den einzelnen Rindvieh-Kategorien unterschieden wurde

Zu Beginn der NABO, ab Mitte der 1980er-Jahre bis 1992, wirtschaftete der überwiegende Teil der teilnehmenden Betriebe nach konventionellen Richtlinien und nur zwei Betriebe (4% der Betriebe) nach Bio-Richtlinien (Abbildung 3). In den 1990er-Jahren erfolgte ein kontinuierlicher Anstieg der nach IP- bzw. ÖLN-Richtlinien wirtschaftenden Betriebe bis zu knapp 90% der Betriebe im Jahr 2000. Seit 1998 ist eine Bewirtschaftung nach ÖLN-Richtlinien für den Erhalt von Direktzahlungen verpflichtend. Zudem wechselten zwei Betriebe in dem Zeitraum zur biologischen Produktion zu total vier Biobetrieben im Jahr 2000 (Abbildung 3). Seit dem Jahr 2000 wechselte ein weiterer Betrieb zu biologischer Produktion.

Zusätzlich zur Zugehörigkeit zu bestimmten Betriebstypen (Tabelle 2) und Produktionsrichtlinien (Abbildung 3) erfolgten über den Beobachtungszeitraum naturgemäss diverse Veränderungen wie z.B. Besitzer- und Pächterwechsel, Neubau von Ställen und Pacht zusätzlicher Flächen. Im Text wird auf solche Veränderungen dort eingegangen, wo dies zum besseren Verständnis der Ergebnisse angebracht erscheint.

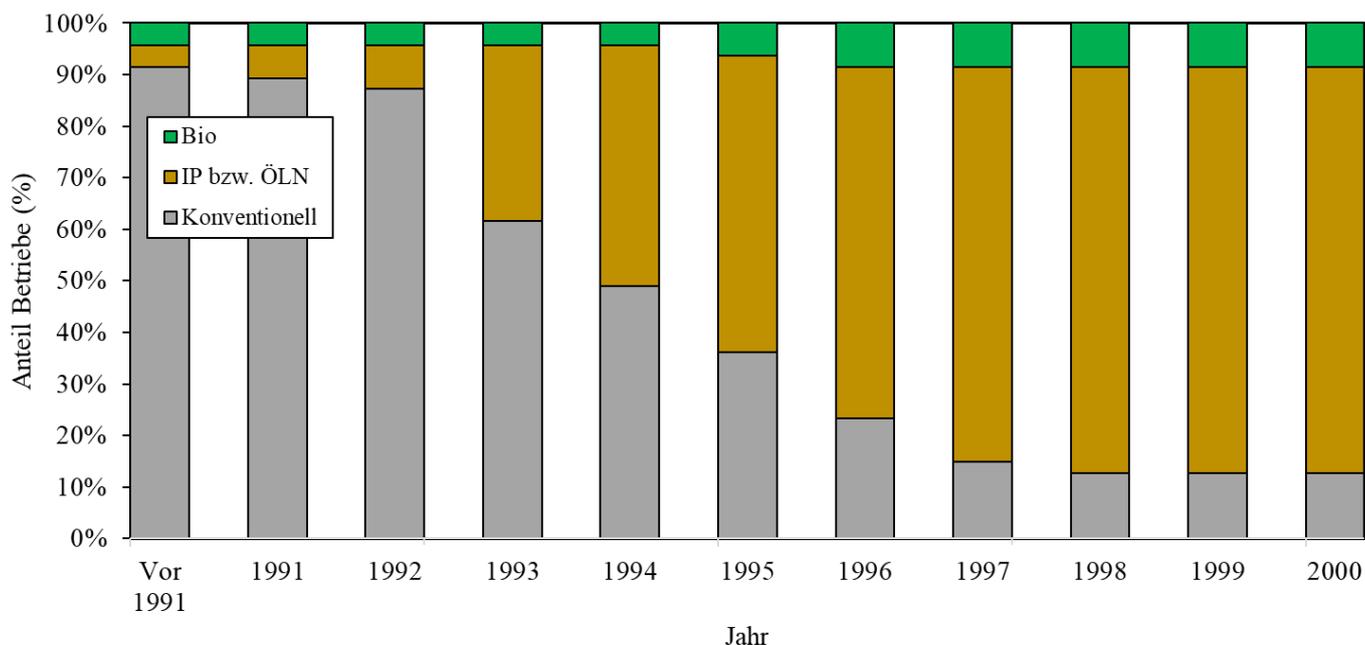


Abbildung 3 Veränderungen des Anteils (%) konventioneller, IP bzw. ÖLN und biologisch bewirtschafteter NABO-Betriebe in den 1990er-Jahren

2.3.3 Parzellen und Kulturen

Die Fruchtfolgen auf den NABO-Parzellen von 1985-2017 stellen typische Schweizer Anbaustrategien dar. 54-60% der Parzellen wurden mehrheitlich für Ackerbau genutzt (Tabelle 3). 24-30% der Parzellen wurden als (mehrheitlich intensiv bewirtschaftetes) Grasland und rund 15% der Parzellen als Spezialkulturen im Obst-, Gemüse- oder Rebbau verwendet (Tabelle 3).

Tabelle 3 Hauptsächliche Nutzung landwirtschaftlicher NABO-Parzellen von 1985-2017

Landnutzung	Anzahl Parzellen	Anteil Parzellen (%)
Ackerbau	24-27	54-60
Grasland		
Extensiv	0	0
Wenig bis mittel intensiv	1-2	4-5
Intensiv	9-11	20-25
Spezialkulturen		
Obstbau	3	7
Gemüsebau	1	2
Rebbau	3-4	7-9

Insgesamt wurden auf NABO-Parzellen zwischen 1985-2017 rund 1'500 Kulturjahre erfasst (Tabelle 4). Die Angaben zu Kulturjahren Tabelle 4 sind in drei Erfassungsperioden eingeteilt, welche in Kapitel 2.5 näher erläutert werden. Unter den Getreiden wurden Winterweizen (156 Kulturjahre), Wintergerste (77 Kulturjahre) und Wintertriticale (25 Kulturjahre) häufig angebaut. Bei den Hackfrüchten und Leguminosen waren Kartoffeln (52 Kulturjahre), Zuckerrüben (51 Kulturjahre) und Raps (40 Kulturjahre) oft vertreten. Unter den Spezialkulturen finden sich v.a. Rebbau, Kernobst und Kirschen sowie verschiedene Gemüsekulturen (u.a. Rosenkohl, Salat, Spinat und Zwiebeln). Beim Grasland war eine mittelintensive bis intensive Bewirtschaftung wesentlich häufiger vertreten als eine extensive bzw. wenig intensive Bewirtschaftung (Tabelle 4).

Tabelle 4 Angebaute Kulturen (Anzahl Kulturjahre) auf NABO-Parzellen nach Erfassungsperiode

Nutzpflanzen	Erfassungsperiode 1 (1985-1991)		Erfassungsperiode 2 (1992-2003)		Erfassungsperiode 3 (2004-2017)	
	Anzahl	Anteil (%)	Anzahl	Anteil (%)	Anzahl	Anteil (%)
Getreide						
Hafer	2	1	2	0	0	0
Roggen und Dinkel	2	1	6	1	2	0
Sommergerste	2	1	1	0	1	0
Sommerweizen	2	1	0	0	0	0
Wintergerste	14	7	34	6	29	5
Wintertriticale	6	3	9	2	10	2
Winterweizen	27	12	64	11	65	10
Hackfrüchte und Leguminosen						
Bohnen	1	0	1	0	3	0
Erbsen	0	0	5	1	2	0
Futterrüben	2	1	6	1	2	0
Hanf	0	0	0	0	2	0
Karotten	0	0	3	1	4	1
Kartoffeln	13	6	21	4	18	3
Raps	6	3	14	3	20	3
Soja	0	0	3	1	4	1
Sonnenblume	0	0	0	0	1	0
Zuckerrüben	10	4	21	4	20	3
Mais						
CCM ^A	2	1	0	0	0	0
Körnermais	5	2	32	6	14	2
Saatmais	0	0	0	0	5	1
Silomais	10	4	31	6	49	8
Spezialkulturen						
Erdbeeren	0	0	1	0	4	1
Gemüse	3	1	13	2	17	3
Kernobst	10	5	24	4	28	4
Kirschen	4	2	12	2	9	1
Reben	14	6	36	6	45	7
Grasland						
Extensiv	0	0	0	0	0	0
Wenig intensiv	10	4	12	2	20	3
Mittelintensiv	11	5	46	8	57	9
Intensiv	67	30	162	29	211	33
Total	223	100	559	100	642	100

^A Corn-Cob-Mix bzw. Maiskolbenschrot; mit Kolben und Spindel geerntet für Futterzwecke

2.4 Bilanzierung

2.4.1 Bilanzierung pro Parzelle

Pro Parzelle wurde der Nettofluss (Y) verschiedener Substanzen S pro Fläche und Jahr (Y_S , in g bzw. kg $S \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) mithilfe von Formel 1 bilanziert:

$$Y_S = \sum_1^i \frac{I_i (x^{TS_i}) \times K_{i,S}}{A} - \sum_1^n \frac{O_n (x^{TS_n}) \times K_{n,S}}{A} + D_S \quad (1)$$

Wobei Y_S die Summe pro Substanz S (N, P, K, Cu, Zn und Cd) ist, welche auf einer Parzelle mit der Fläche A (ha) während eines Kalenderjahres über landwirtschaftliche Hilfsstoffe eingetragen und über Erntegut ausgetragen wird. Landwirtschaftliche Hilfsstoffe werden als Inputs (I_i) bezeichnet, wobei i einzelne PSM, Hofdünger, Mineraldünger und Recyclingdünger sind (in kg Frischgewicht pro Jahr [$\text{kg}_{\text{FG}} \text{ a}^{-1}$]). Erntegut wird als Output bezeichnet (O_n), wobei n einzelne Nutzpflanzen bzw. deren Teile (z.B. Körner und Stroh) sind (in $\text{kg}_{\text{FG}} \text{ a}^{-1}$). Frischgewicht bezeichnet das Gewicht bei der Ausbringung auf die Parzelle bzw. während der Ernte. Bei Hofdüngern, Recyclingdüngern und Erntegut sind die Substanzkonzentrationen pro Trockensubstanz (TS) normiert, daher werden I_i und O_n dieser Güter mit der TS-Konzentration ($\text{kg}_{\text{TS}} \text{ kg}_{\text{FG}}^{-1}$) und der Substanzkonzentration ($K_{i,S}$ bzw. $K_{n,S}$, in mg oder g $\text{kg}_{\text{TS}}^{-1}$) multipliziert. Bei Mineraldüngern und PSM wird das Frischgewicht direkt mit der jeweiligen Substanzkonzentration (mg oder g $\text{kg}_{\text{FG}}^{-1}$) multipliziert.

D_S ist die atmosphärische Deposition pro Fläche und Jahr, welche nur für Cu, Zn und Cd berücksichtigt wurde. Da für Nährstoffe weder atmosphärische Deposition noch symbiotische N-Fixierung berücksichtigt wurden, stellen die Bilanzen in diesem Fall keine Nettoflüsse, sondern sogenannte Düngerbilanzen dar. N wurde als Gesamtstickstoff berechnet, d.h. der pflanzenverfügbare Anteil der N-Inputs wurde nicht separat abgeschätzt.

Für U wurden nur Einträge über P-haltige Mineraldünger berechnet und es wurden weder Austräge über das Erntegut noch Einträge über die atmosphärische Deposition berücksichtigt.

2.4.2 Bilanzierung pro Kultur

Zusätzlich zu den Bilanzen pro Parzelle wurden auch Bilanzen für verschiedene Kulturen (Nutzpflanzen) pro Kulturjahr, d.h. im Zeitraum zwischen Saat bis Ernte, berechnet. Hierbei wurden im NABO-Messnetz häufig angebaute Getreide (Winterweizen, Wintertriticale und Wintergerste), Hackfrüchte inklusive Mais (Kartoffeln, Körnermais, Raps, Silomais und Zuckerrüben), Graslandintensitäten (wenig intensiv, mittelintensiv und intensiv bewirtschaftet) sowie Spezialkulturen (Gemüse und Reben) berücksichtigt. Die Bilanzierung wurde gemäss Formel 1 pro Parzelle gesondert nach angebauten Kulturen pro Kulturjahr vorgenommen. Die atmosphärische Deposition (D_S) wurde von jährlichen Daten proportional auf den Zeitraum des jeweiligen Kulturjahres skaliert.

Da ausgebrachte Hilfsstoffe vor der Saat und nach der Ernte nicht immer eindeutig einer bestimmten Kultur zugeordnet werden können, gestatten Stoffbilanzen pro Kultur nur tendenzielle Aussagen bezüglich stofflicher Ein- und Austräge.

2.4.3 Vergleich mit Grenzfrachten und theoretische Schwermetall-Akkumulationsrate pro Jahrzehnt

Um die Relevanz der parzellenbezogenen Schwermetallbilanzen für die Bodengesundheit zu beurteilen, wurden diese mit Grenzfrachten verglichen und in theoretische Akkumulationsraten im Boden umgerechnet.

Die jährlichen parzellenbezogenen Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse wurden mit den Grenzfrachten gemäss der deutschen Bodenschutz- und Altlastenverordnung verglichen, welche dort als "zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade" bezeichnet werden (BBodSchV 1999: Anhang 2, Nr. 5). Der Vergleich mit den jährlichen Nettoflüssen ist naheliegend, denn diese zeigen an, welche Schadstoffmenge netto über ein Jahr in den Boden gelangt (positiver Nettofluss) bzw. aus diesem über die Ernte ausgetragen wird (negativer Nettofluss). Für die Schweiz existieren bisher keine vergleichbaren Normen. In diesem Bericht wurden Nettoflüsse, die grösser als die in Deutschland geltende Grenzfracht sind, als bedenkliche Einträge definiert. Werte unterhalb der Grenzfracht

wurden in vier weitere Klassen unterteilt von erhöht bis gering. Die Einteilung pro Schwermetall ist im Ergebnisteil ersichtlich (farbliche Abstufung in Abbildung 27). Für U wurde bisher auch in Deutschland keine Grenzfracht definiert. Im Falle von U dienen die Farben in Abbildung 27 daher lediglich einer Klassifikation grösserer und kleinerer U-Einträge über Mineraldünger (vgl. Kapitel 2.4.1).

Unter Berücksichtigung des Raumgewichts (kg m^{-3}) der Feinerde des Oberbodens von 0-0.2 m wurden die parzellenbezogenen Schwermetall-Nettoflüsse ($\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, Formel 1) zudem in theoretische Akkumulationsraten pro Jahrzehnt ($\text{mg kg}^{-1} \text{Jahrzehnt}^{-1}$) im Oberboden umgerechnet. Messwerte des Raumgewichts der einzelnen NABO-Parzellen wurden den Resultaten des direkten Monitorings entnommen (Schwab und Gubler 2016).

2.5 Erhebung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsdaten

Landwirtschaftliche Bewirtschaftungsdaten werden jährlich von Betrieben, welche die landwirtschaftlichen NABO-Parzellen bewirtschaften, schriftlich erfragt. Zudem werden die Betriebe in unregelmässigen Abständen persönlich besucht, um einen fachlichen Austausch zu ermöglichen, Details zu den Bewirtschaftungsdaten nachzufragen und/oder Veränderungen auf dem Betrieb zu erfassen. Die Mitarbeit der Betriebe im NABO-Messnetz ist freiwillig und wird mit einer geringen Aufwandsentschädigung entlohnt. Der Umfang der jährlichen Anfrage hängt vom Betriebstyp und der Nutzung ab und kann Betriebsinformationen wie Feldkalender, Parzellenblatt, Fruchtfolgeplan, Wiesenjournale, sowie die gesamtbetriebliche Nährstoffbilanz mit den Angaben über die Tierzahlen beinhalten. Bei der Anfrage werden zusätzlich auch Parzellenpläne und Angaben zu betrieblichen Veränderungen erfragt. Die genauen Abläufe sind im Bericht *"Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO"* (Gross et al. 2021) ausführlich beschrieben und im Folgenden zusammengefasst.

Generell sind die Bewirtschaftungsdaten flächen- und kulturbezogen mit Datum und Menge in Frischgewicht (I_i und O_n in Formel 1) erfasst. Erhoben werden insbesondere Angaben zu angebauten Kulturen, Mengen eingesetzter landwirtschaftlicher Hilfsstoffe (Hof-, Mineral- und Recyclingdünger und PSM), Mengen Saat- und Erntegut, und zur Bodenbearbeitung. Die Bewirtschaftungsdaten wurden in der Vergangenheit aufgrund wechselnder zur Verfügung stehender Ressourcen und Zielsetzungen innerhalb der NABO mit unterschiedlichen Eingabesystemen und durch verschiedene Mitarbeiter erhoben. Aufgrund grösserer Umstellungen können die erhobenen Daten in drei Erfassungsperioden eingeteilt werden:

- **Von 1985 bis 1991 (Erfassungsperiode 1)** wurden die von den Landwirten an die NABO gesendeten Dokumentationen zunächst nur physisch abgelegt, und erst nachträglich während der Erfassungsperiode 3 elektronisch in der landwirtschaftlichen Management-Software AGRO-TECH (Agridea, Lindau) erfasst. Ergebnisse wurden im ersten NABO-Bericht publiziert (Desaules und Studer 1993).
- **Von 1992 bis 2003 (Erfassungsperiode 2)** traten wesentliche Veränderungen auf. Nach der Publikation des ersten NABO-Berichts (Desaules und Studer 1993) ging man davon aus, dass das Thema der Stoffbilanzen für die Dauerbeobachtung ausreichend bearbeitet sei und eine Weiterführung nicht erforderlich sei. Deshalb wurde die Erhebung der Bewirtschaftungsdaten von 1992-1995 ausgesetzt. Von 1996-2003 wurde mit der Einführung des ÖLN und den damit verbundenen Anpassungen und Umstellungen in der Bewirtschaftung das Interesse an den landwirtschaftlichen Aktivitäten auf den NABO-Betrieben wieder reaktiviert und die Erhebung der Bewirtschaftungsdaten wiederaufgenommen. Zudem wurden ab 1996 für einige ausgewählte NABO-Betriebe neu zusätzlich die Bewirtschaftungsdaten aller Parzellen erfasst, um die Stoffbilanzen im Kontext der Fruchtfolge dieser Betriebe untersuchen zu können (d.h. die Kultur auf der NABO-Parzelle steht in einer wechselnden Fruchtfolge mit anderen Parzellen des Betriebs). Die vierjährige Datenlücke zwischen 1992-1995 wurde nachträglich mittels betriebsspezifischer Daten und der Auswertung langjähriger Fruchtfolgen gefüllt, um über die Jahre durchgängige Analysen zu ermöglichen (Details siehe Gross et al. 2021). Die Bewirtschaftungsdaten wurden während dieser Erfassungsperiode in einer Access-Datenbank abgelegt.
- **Seit 2004 (Erfassungsperiode 3)** werden die Bewirtschaftungsdaten in AGRO-TECH erfasst. Zusätzlich wurden die Daten der Erfassungsperiode 1 in AGRO-TECH eingepflegt.

Vor der Auswertung und Analyse wurden die unterschiedlichen Erfassungsperioden aufbereitet und harmonisiert, um eine einheitliche und validierte Bewirtschaftungsliste pro Jahr und Parzelle sicherzustellen (Gross et al. 2021). Die erhobenen Daten wurden in mehreren Schritten plausibilisiert und wenn nötig korrigiert. Klare Fehler und kleinere Unklarheiten in den erhaltenen Daten (z.B. Schreibfehler, Überlappungen verschiedener landwirtschaftlicher Massnahmen) wurden mittels agronomischer Hilfsmittel wie z.B. "Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau" (GRUDAF 2009, Flisch et al. 2009), "Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz" (GRUD 2017, Richner und Sinaj 2017) und Ratgebern für Spritzpläne sowie Expertenwissen bestmöglich korrigiert und/oder ergänzt (Gross et al. 2021).

Neben Bewirtschaftungsdaten wurde jährlich auch der Nutztierbestand erhoben und in GVE sowie Dünger-Grossvieheinheiten (DGVE) umgerechnet. Zur Berechnung der GVE wurde eine durchschnittliche Milchkuh als Referenz genommen (GVE = 1.0). Für andere Tierarten wurden Umrechnungsfaktoren gemäss der landwirtschaftlichen Begriffsverordnung (LBV 1998 [Stand 1.1.2019], Artikel 27 und deren Anhang) verwendet. DGVE wurden gemäss Angaben im Gewässerschutzgesetz berechnet (GschG 1991, Artikel 14, Absatz 8), wonach eine DGVE dem Nährstoffanfall einer mittleren Kuh von 600 kg entspricht. DGVE anderer Tiere wurden anhand durchschnittlicher Ausscheidungsraten gemäss GRUD (Richner und Sinaj 2017) berechnet.

Bei Unklarheiten wurde Rücksprache mit den Betrieben gehalten und bei Bedarf wurden Betriebsbesuche durchgeführt. Annahmen und deren Begründung wurden schriftlich dokumentiert und die Datenqualität der Eingangsdaten wurde für jeden Betrieb und jedes Jahr von 0 (sehr unsichere Daten) bis 5 (sehr gute Datenqualität) bewertet (siehe auch weiter unten, Tabelle 7). Bei Datenqualität 0-2 wurde immer das Gespräch mit den Bewirtschaftern gesucht.

2.6 Erhebung der Stoffkonzentrationen

Zur Berechnung von Oberflächenbilanzen müssen die Stoffkonzentrationen der Ein- und Austräge bekannt sein oder abgeschätzt werden können. Jedem Ein- und Austrag in den Bewirtschaftungsdaten ist eine Identifikationsnummer ("ProduktNr", Gross et al. 2021) zugewiesen, für welche Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen zusammengestellt wurden (I_i und O_n in Formel 1). Für jede ProduktNr sind im Idealfall Minimum, Mittelwert, Maximum und Standardabweichung definiert basierend auf publizierten Daten, welche nach folgender Priorisierung ausgewählt wurden:

- **Örtliche Relevanz:** Schweizer Studien oder Datensätze wurden internationalen vorgezogen, da Betriebsgrößen, Betriebsstrukturen und Bewirtschaftungsformen in der Schweiz nur bedingt mit anderen Agrarsystemen in Europa vergleichbar sind. Bei Daten aus internationalen Studien mussten die Rahmenbedingungen und Relevanz für Schweizer Betriebe gegeben sein (z.B. sind Messwerte zu Cu in Hofdüngern sehr grosser Betriebe in Europa nicht anwendbar auf Schweizer Betriebe).
- **Repräsentativität:** Studien und Datensätze mit höherer Anzahl Stichproben und repräsentativer Auswahl von Betrieben wurden Studien mit kleinerer Anzahl Stichproben vorgezogen.

Tabellen mit den in diesem Bericht verwendeten Konzentrationswerten sind in Anhang A3 aufgeführt. Die Konzentrationswerte stammen aus einem grösseren Datensatz, welcher durch die NABO über die Jahre aus einer Vielzahl von Quellen zusammengestellt wurde (u.a. Messdaten aus Projekten, Düngungsversuchen, Forschungsprojekten, nationaler und internationaler Literatur und Anfragen an Autoren). Die wichtigsten Datenquellen sind in diesem Kapitel sowie in Anhang A3 zusammengefasst.

2.6.1 PSM

PSM werden zum Schutz vor Ertragseinbussen u.a. durch Pilze, Insekten, Bakterien und Unkräuter eingesetzt. Für Schwermetalleinträge sind v.a. Cu- und Zn-haltige Fungizide relevant. Daneben enthalten auch gewisse Insektizide Cu. Die Cu- und Zn-Gehalte der verschiedenen PSM wurden aus dem Zielsortiment der landwirtschaftlichen Genossenschaften (z.B. LANDI 2020 und vorherige Versionen), aus dem PSM-Verzeichnis des BLW (BLW 2021) sowie AGRO-TECH entnommen und in der Bilanzierung verwendete Werte sind in Tabelle A4 (Anhang A3) aufgelistet.

Bei verschiedenen PSM-Produkten konnte mithilfe des im Produktnamens angegebenen Gehalts an Mancozeb (25 g Zn kg⁻¹), Propineb (226 g Zn kg⁻¹) und Zineb (238 g Zn kg⁻¹) auf den Zn-Gehalt geschlossen werden (z.B. "Megapur Duo (66.7% Mancozeb)").

2.6.2 Mineraldünger

Mineraldünger stellen neben Hofdüngern den zweiten wesentlichen Nährstoffeintrag aus der Bewirtschaftung dar. In der Schweiz wurde die Qualität von Mineraldüngern in den 1990er-Jahren breit angelegt untersucht (u.a. Gsponer 1990, Von Steiger und Baccini 1990, BUWAL 1991, AG 1997, IUL 1997) und im gleichen Zeitraum würden ähnliche Untersuchungen in Deutschland (Boysen 1992) und England (Mortvedt 1996) durchgeführt. Eine Zusammenstellung von Messwerten bis Anfang der 1990er-Jahre findet sich in Desaulles und Studer (1993) und Hackenberg und Wegener (1999) bieten einen Überblick über Messwerte aus Deutschland. Neuere Daten zu Schwermetallen in Mineraldüngern aus der Schweiz stammen aus BLW (2012). Zudem wurden die Schwermetallgehalte von Mineraldüngern auf einigen Betrieben im NABO-Messnetz im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms "Gesunde Ernährung und nachhaltige Lebensmittelproduktion" (NFP 69) beprobt (Imseng et al. 2018, 2019). Trotz der oben genannten Studien ist die Datenlage für Schwermetalle in Mineraldüngern nicht befriedigend. Vor allem variiert der Cd-Gehalt in Abhängigkeit der Herkunft der Rohherze (Bigalke et al. 2017, Ulrich 2019) und somit auch innerhalb ähnlicher P-, NP- und NPK-Dünger. Aus den Bewirtschaftungsdaten ist der Hersteller der eingesetzten Mineraldünger bekannt, aber anhand der wenigen Messdaten von Mineraldüngern ist nicht bekannt, welche Dünger von welchem Hersteller welche Cd-Konzentrationen aufweisen. Für die Schweiz fehlt eine umfangreiche Studie zu den auf dem Markt befindlichen P-Mineraldüngern; eine solche wurde u.a. auch von den Autoren einer Untersuchung zu Cd- und U-Einträgen in Schweizer Böden gefordert (Bigalke et al. 2017). Die für diesen Bericht angenommenen Schwermetallkonzentrationen auf Basis der hier genannten Quellen sind in Tabelle A6 (Anhang A3) aufgelistet.

N-, P- und K-Gehalte sind für die meisten Mineraldünger aus Literatur- und/oder Herstellerseiten ersichtlich (Tabelle A6, Anhang A3). Innerhalb der jeweiligen Düngertyp-Kategorien können aber die Gehalte stark variieren. Daher wurde möglichst immer die vollständige Bezeichnung des Mineraldüngertyps erfasst (z.B. NPK Dünger "Landor 20/20/6"). Für einige Mineraldünger konnten keine Konzentrationsangaben gefunden werden. In diesen Fällen wurden Mittelwerte der Konzentrationswerte anderer in der Liste vorkommender Dünger angenommen.

2.6.3 Hofdünger

Hofdünger spielen eine wichtige Rolle zur Deckung des Nährstoffbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen. So zeigte eine Studie in der Schweiz, dass auf mittelintensiven Natur- und Mähwiesen 50% der mittleren N-Einträge aus Hofdüngern stammen, im Silo- und Körnermaisbau 50-65% und im Winterweizenanbau gut 30% (Bosshard und Richner 2013). Nähr- und Schadstoffgehalte können in Hofdüngern in Abhängigkeit von Tierart, Betriebstyp, Stallungssystemen, Futtermitteln, Futtermittelzusatzstoffen und Jahreszeiten erheblich variieren (Schultheiss et al. 2004, Keller et al. 2005). Für die Schwermetallbilanzierung von Hofdüngern sind insbesondere Cu und Zn zentral, da diese als Futtermittelzusatzstoffe zur Leistungsförderung und Erhaltung der Tiergesundheit weitverbreitet eingesetzt werden (Schultheiss et al. 2004, Agroscope 2016a, Agroscope 2016b).

Die Hofdüngerqualität hängt von vielen Faktoren ab und kann von Betrieb zu Betrieb sehr variabel sein. Mittlere Gehalte von Hofdüngern für verschiedene Tierarten sind für standortspezifische Parzellenbilanzen zu ungenau. Aus diesem Grunde wird die betriebsspezifische Hofdüngerqualität von Betrieben im NABO-Messnetz seit den 1990er-Jahren mit periodischen zusätzlichen Untersuchungen erhoben. Während der 1990er-Jahre wurden verschiedene Untersuchungen zu Nähr- und Schadstoffgehalten in Schweizer Hofdüngern durchgeführt (Menzi und Kessler 1998, Menzi et al. 1999). Schon damals waren auch Betriebe des NABO-Messnetzes in den Untersuchungen enthalten. In Abständen von jeweils rund einem Jahrzehnt hat die NABO in den Jahren 2006 und 2018 auf 14 bzw. 30 Betrieben Hofdünger erneut beprobt und u.a. TS-, Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen gemessen (Tabelle 5). Hierbei wurde die gleiche Beprobungsmethodik wie bei Menzi und Kessler (1998) angewendet. Für die Stoffbilanzierung wurden ab der dritten Erfassungsperiode (d.h. ab 2004) für jeden Betrieb mit Hofdünger-Messdaten hofspezifische Werte gemessener TS-, Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen verwendet.

Tabelle 5 TS-, P-, Cu- und Zn-Konzentrationen in Gülleproben der Jahre 2006 (von 14 Betrieben des NABO-Messnetzes) und 2018 (von 30 Betrieben); eine Stichprobe (n) entspricht dem Mittelwert von jeweils drei bis vier Unterstichproben pro Güllegrube; Std. = Standardabweichung

Typ	Wert	2006				2018			
		TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)
Rindervollgülle	n	7	7	7	7	22	22	22	22
	Minimum	3.8	4.8	21.7	89	0.8	3.8	20.8	84
	Maximum	7.7	9.9	40.3	513	9.5	12.7	100.9	426
	Median	5.0	7.6	27.7	108	4.3	7.8	37.1	178
	Mittelwert	5.2	7.3	28.5	176	4.3	7.9	41.1	188
	Std.	1.3	1.8	6.9	152	2.4	2.4	17.5	83
Schweinegülle	n	6	6	6	6	11	11	11	11
	Minimum	1.0	13.0	72.8	512	0.8	9.9	71.6	309
	Maximum	8.0	22.7	193.8	3'463	12.3	24.3	225.3	979
	Median	3.3	18.5	114.2	868	3.2	14.2	122.0	557
	Mittelwert	3.6	18.7	119.9	1'286	4.1	15.4	119.6	615
	Std.	2.5	3.7	40.0	1'093	3.6	4.2	43.2	205
Mischgülle	n	7	7	7	7	5	5	5	5
	Minimum	2.0	4.6	15.6	120	2.2	7.7	27.1	149
	Maximum	5.2	13.2	147.0	686	5.1	22.8	80.7	516
	Median	2.5	9.8	56.0	321	3.4	10.3	56.8	354
	Mittelwert	3.1	9.1	63.4	326	3.8	12.1	54.9	329
	Std.	1.4	3.2	43.0	217	1.2	6.1	23.2	174

Für frühere Erfassungsperioden (d.h. vor 2004), Betriebe ohne Hofdünger-Messdaten und nicht beprobte Hofdünger wurden Literaturwerte verwendet (Tabelle A5, Anhang A3). Es wurden primär Literaturwerte aus der Schweiz verwendet (u.a. Menzi und Kessler 1998, Menzi et al. 1999, Richner und Sinaj 2017) und nur vereinzelt wurden die Daten mit Messwerten aus internationalen Studien ergänzt (u.a. Nicholson et al. 1999, Schultheiss et al. 2004). Hierbei stellt sich das Problem der Vergleichbarkeit von Hofdüngertypen einerseits und Betriebstypen andererseits. Beispielsweise sind Cu- und Zn-Gehalte in Hofdüngern von grossen Mastbetrieben (> 1000 ha) in Nachbarländern wegen unterschiedlicher Anwendung von Futterzusatzmitteln oft wesentlich höher als Messdaten von Schweizer Betrieben und daher nur bedingt übertragbar für die durchschnittlich relativ kleinen Betriebe (< 30 ha) im NABO-Messnetz. Aus diesem Grunde wurden nur Literaturwerte aus Studien mit vergleichbaren Agrarsystemen übernommen.

Für die Stoffbilanzen ist neben der Qualität des Hofdüngers dessen Verdünnung (bzw. TS-Gehalt) zum Ausbringungszeitpunkt entscheidend. Daher wurden – sofern keine eigenen betriebspezifisch gemessenen Werte aus den Beprobungen in 2006 und 2018 vorlagen bzw. vor 2004 – durchschnittliche TS-Gehalte (Tabelle A5, Anhang A3) mit betriebspezifisch geschätzten TS-Gehalten verglichen. Die betriebspezifische Schätzung erfolgte aufgrund verschiedener relevanter Grössen wie z.B. Tierbestand und Stallungseinrichtungen mithilfe der Software AGROTECH und ist in Gross et al. (2021) beschrieben.

2.6.4 Recyclingdünger

Recyclingdünger werden aus biogenen Abfällen erzeugt und beinhalten u.a. Dünger aus Klärschlamm, Kompost und Digestat aus anaerober Vergärung. Die Direktausbringung von Klärschlamm ist seit 2006 untersagt (mit Übergangsfrist bis 2008). TS- und Schwermetallkonzentrationen wurden Lieferscheinen der Abwasserreinigungsanlagen entnommen (Tabelle A7, Anhang A3). Derzeit wird Klärschlamm hauptsächlich verbrannt, es bestehen aber Bestrebungen, insbesondere P daraus rückzugewinnen und als Ersatz für Mineraldünger aus Erzen einzusetzen. Bisher wurden keine solchen neuartigen P-Recyclingdünger auf NABO-Parzellen eingesetzt. Kompost wurde nur selten auf NABO-Parzellen eingesetzt und Konzentrationswerte wurden aus Kupper et al. (2014) übernommen.

2.6.5 Erntegut

Erntegut enthält natürlicherweise essenzielle Elemente wie Cu- und Zn. Die Aufnahme essenzieller und nicht-essenzieller Substanzen hängt von pflanzen- und elementspezifischen Eigenschaften sowie bodenökologischen Faktoren ab. Die Pflanzenverfügbarkeit wird wesentlich durch pH, Humus- und Tongehalt bestimmt (Keller et al. 2005, Amelung et al. 2018). Bei Schwermetallkonzentrationen im Erntegut wurde bei Getreide zwischen Korn und Stroh und bei Futterrüben, Zuckerrüben und Mais zwischen Blatt und Frucht unterschieden. Direkte Konzentrationsmessungen wurden auf NABO-Parzellen bisher nicht durchgeführt. Trotzdem kann die Datenlage für Cu-, Zn- und Cd-Konzentrationen in den wichtigsten Kulturpflanzen als befriedigend bezeichnet werden, da zahlreiche Studien im In- und Ausland Nähr- und Schwermetallkonzentrationen in Kulturpflanzen gemessen haben (Vogler und Schmitt 1990, Von Steiger und Baccini 1990, Keller 2000). Eine Besonderheit stellt die Arbeit von Knoche et al. (1999) dar, in der auf Basis von über 300'000 Datenpaaren von Boden- und Pflanzenmessungen das Transferverhalten von Schwermetallen zwischen Böden und Pflanzen untersucht wurde. Im Datensatz der NABO wurden in der Literaturlauswertung Pflanzengehalte ausgeschlossen, welche auf stark belasteten Böden gemessen wurden. Weitere Quellenangaben finden sich in Anhang A3 (Tabelle A8).

2.7 Atmosphärische Deposition von Schwermetallen

Schwermetalle sind im Transport über die Luft vorwiegend an Schwebestaubpartikel gebunden und können weite Strecken von der Emissionsquelle entfernt eingetragen werden. Die atmosphärische Deposition von Metallen hat in der Schweiz seit Mitte der 1990er-Jahre aufgrund von Reduktionsmassnahmen von Luftschadstoffemissionen stark abgenommen (Thöni et al. 2018).

Schwermetalldepositionswerte werden in der Schweiz im Rahmen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) sowie im Moosmonitoring (Thöni et al. 2018) erhoben. Im NABEL werden Trocken- und Nassdeposition mit der Bergerhoff-Methode bestimmt und gesondert für ländliche, vorstädtische und städtische Standorttypen erhoben (BAFU und Empa 2020). Im Moosmonitoring wird die atmosphärische Deposition aufgrund von Konzentrationen in Moosen berechnet. Für die Berechnung der Oberflächenbilanzen dieses Berichts wurden jährlich berechnete Mediane der vom NABEL publizierten Schwermetall-Depositionswerte für ländliche und vorstädtische Gebiete (BAFU und Empa 2016) verwendet. Für Jahre, in denen keine Schwermetall-Depositionswerte verfügbar waren, wurden Depositionswerte linear zwischen Jahren mit Daten interpoliert.

Wie in Kapitel 2.4.1 ausgeführt, wird die atmosphärische Deposition von N, P, K und U in den Oberflächenbilanzen dieses Berichts nicht berücksichtigt.

2.8 Unsicherheitsanalyse

2.8.1 Unsicherheiten in Stoffbilanzen

Eine Unsicherheitsanalyse ist notwendig, um eine Kausalanalyse gemessener Stoffkonzentrationen im Boden des NABO-Messnetzes zu ermöglichen, Prognosebereiche künftiger Veränderungen zu berechnen sowie Daten mit besonders grossem Einfluss auf Unsicherheiten zu identifizieren. In Stoffbilanzen kann man zwischen drei Typen von Unsicherheiten unterscheiden (Keller et al. 2005):

- **I. Modellunsicherheiten** können sich durch unvollständige oder vereinfachte Erfassung relevanter Prozesse im Bilanzmodell ergeben. Für den vorliegenden Bericht betrifft dies unter anderem den Einfluss der Erosion und der Verlagerung von Stoffen im Boden. Ausserdem können – um nur ein Beispiel zu nennen – für die Zn-Bilanz Einträge durch die Korrosion von Stalleinrichtungen relevant sein (Schultheiss et al. 2004).
- **II. Unsicherheiten in den Bilanzdaten** resultieren aus Messunsicherheiten von Mengen und Konzentrationen eingesetzter Hilfsstoffe und geernteter Erntegüter. Abhängig von der Messmethode, der Probenahme sowie vom Stichprobenumfang können Bilanzierungsdaten zudem qualitativ sehr unterschiedlich sein. Unsicherheiten resultieren auch aus der Übertragung von Bilanzdaten aus Untersuchungen und Literaturdaten mit einem ande-

ren räumlichen und zeitlichen Bezug. Als Beispiel seien hier Schwermetallgehalte in Hofdüngern erwähnt, welche je nach Betrieb und Betriebstyp stark variieren können, weshalb ein mittlerer Schwermetallgehalt nicht aussagekräftig ist. Die Streuung der Messdaten muss folglich in der Berechnung der Bilanzen berücksichtigt werden.

- **III. Räumliche und zeitliche Variation von Bilanzgrössen** sind Unsicherheiten, welche auf der natürlichen Variation von Stoffgehalten und -mengen in der Umwelt auftreten. Beispielsweise können TS-, Schwermetall- und Nährstoffkonzentration in Hofdüngern sowohl räumlich (z.B. verschiedene Zonen in der Güllegrube und betriebliche Unterschiede) als auch zeitlich erheblich variieren.

Modellunsicherheiten können nur durch einen Vergleich verschiedener Bilanzmethoden oder mit gemessenen Veränderungen von Schadstoffgehalten in Böden quantifiziert werden. Unsicherheiten in den Bilanzdaten können durch zusätzliche Messungen reduziert werden, wie beispielsweise durch die periodische Beprobung von Hofdüngern (Kapitel 2.6.3). Die räumliche und zeitliche Variation kann nicht durch zusätzliche Messungen reduziert, sondern lediglich beschrieben bzw. quantifiziert werden (z.B. Unterschiede zwischen Betriebstypen oder jahreszeitliche Schwankungen). Mit der hier angewendeten stochastischen Bilanzierungsmethode werden Unsicherheiten in den Bilanzdaten sowie räumliche und zeitliche Variation in den Stoffbilanzen berücksichtigt.

2.8.2 Bestimmung von Zufallsvariablen (unsichere Bilanzgrössen)

Bilanzgrössen mit einer für das Bilanzmodell wesentlichen Unsicherheit werden als unsichere Bilanzgrössen bzw. Zufallsvariablen betrachtet. Diese Zufallsvariablen werden durch Lage- und Streuparameter (z.B. Mittelwert und Standardabweichung) sowie Annahmen über deren Verteilung (z.B. Normalverteilung) charakterisiert. Aufgrund dieser Angaben können nun beliebig viele Werte zur Berechnung der Bilanz simuliert werden (siehe Kapitel 2.8.3).

Die in dieser Arbeit verwendeten Zufallsvariablen für Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen wurden aufgrund ihrer mengenmässigen Relevanz auf NABO-Parzellen sowie aufgrund einer ausreichenden Datenlage für die Bestimmung der Lage- und Streuparameter und der theoretischen Verteilung ausgewählt (Keller et al. 2005). Konzentrationen weniger bedeutender Hilfsstoffe und Erntegüter flossen als konstante Werte in die Bilanzierung ein. Für PSM wurden die Wirkstoffkonzentrationen als genau bekannt angenommen, daher flossen Cu- und Zn-Konzentrationen in PSM als konstante Werte (d.h. nicht als Zufallsvariablen) in die Berechnungen ein. Die verwendeten Konzentrationswerte sind in Kapitel 2.6 beschrieben. Für Nährstoffkonzentrationen in Mineraldüngern, Hofdüngern und im Erntegut wurden folgende Variationskoeffizienten (Standardabweichung als Prozent des Mittelwertes) angenommen, da die verwendeten Literaturwerte nur bedingt eine Schätzung dieser Variation erlauben: 2% für Mineraldünger, 15% für Hofdünger und 15% für Erntegut (angepasst nach Spiess 2011b). Falls für bestimmte Zufallsvariablen nur Minimum, Mittelwert und Maximum bekannt waren, wurde eine Normalverteilung angenommen.

Tabelle 6 fasst die Anzahl Zufallsvariablen für Konzentrationswerte pro Bilanzgrösse und Substanz zusammen. In Anhang A4 sind Lage- und Streuparameter aller Zufallsvariablen aufgelistet.

Tabelle 6 Anzahl Zufallsvariablen für Konzentrationswerte, die zur Berechnung der Stoffbilanzen der NABO-Parzellen berücksichtigt wurden

Bilanzgrössen	Anzahl Zufallsvariablen					
	N	P	K	Cu	Zn	Cd
Atmosphärische Deposition	0	0	0	1	1	1
Hofdünger	13	13	13	11	12	12
Mineraldünger	34	43	40	9	12	5
Recyclingdünger	6	6	5	4	3	4
PSM	0	0	0	0	0	0
Erntegut	41	41	41	30	30	31
Total Zufallsvariablen pro Bilanz	94	103	99	55	58	53

Neben den Konzentrationsdaten sind auch die Mengendaten mit Unschärfe behaftet. Mengenangaben aus den Bewirtschaftungsdaten wurden daher aufgrund der Datenvollständigkeit und Plausibilität wie in Kapitel 2.5 beschriebenen für jeden Betrieb und jedes Jahr in sechs Unsicherheitskategorien eingeteilt (Tabelle 7). Um die Unsicherheiten in der Bilanzierung quantifizieren zu können, wurden Intervalle bestimmt, innerhalb derer die Mengendaten mit grosser Sicherheit liegen. Die oberen und unteren Grenzen der Intervalle wurden basierend auf einem Ansatz von Hedbrant und Sörme (2001) als Faktoren definiert, wobei für die Berechnung der oberen Grenze der Mengenwert (x) mit dem Faktor multipliziert wurde (z.B. $x * 1.1$ für Unsicherheitskategorie 5), für die Berechnung der unteren Grenze mit dessen Kehrwert (z.B. $x * 1 / 1.1$ für Unsicherheitskategorie 5, Tabelle 7). Ein solch asymmetrisches Unsicherheitsintervall vermeidet bei grossen Unsicherheiten unmögliche (negative) Mengenwerte und ermöglicht gleichzeitig eine intuitive Interpretation der Unsicherheiten von Mengendaten (Hedbrant und Sörme 2001). Bei einer sehr guten Datenqualität (Unsicherheitskategorie 5) wurde eine Unsicherheit von $\pm 10\%$ (Intervall $*/ 1.1$) angenommen, was der Toleranz für N- und P-Bilanzen im Rahmen des ÖLN (Agridea und BLW 2019) entspricht. Innerhalb der Intervalle wurde von einer uniformen Verteilung der Mengendaten ausgegangen, d.h. bei einer angegebenen Güllegabe von beispielsweise 20 m^3 auf einer bestimmten Fläche wurde bei Unsicherheitskategorie 5 ein Wert von $18\text{-}22 \text{ m}^3$ als gleich wahrscheinlich angenommen. Diese Wertebereiche wurden für alle in die Bilanzierung eingeflossenen Mengenangaben simuliert (Kapitel 3.8.3).

Tabelle 7 Unsicherheitskategorien und angenommene Intervalle der Mengendaten; */ = Multiplikation für obere Intervallgrenze und Division für untere Intervallgrenze

Kategorie	Beschreibung	Faktor
5	Angaben vorhanden, sehr gute Datenqualität	*/ 1.1
4	Angaben vorhanden, gute Datenqualität, wenige Annahmen nötig	*/1.3
3	Angaben vorhanden, knapp genügend, z.T. widersprüchliche Daten	*/ 2
2	Angaben vorhanden, Qualität ungenügend	*/ 4
1	Nur Fruchtfolge bekannt; weitere Bewirtschaftung aus Vor- oder Folgejahren abgeleitet	*/ 8
0	Keine Daten vorhanden; Bewirtschaftung auf Vor- und Folgejahren abgeleitet	*/ 10

2.8.3 Simulation der Zufallsvariablen

Die Bestimmung der Lage- und Streuparameter und die Annahmen über die Verteilung der Zufallsvariablen erlauben nun die Simulation beliebig vieler Werte, mit welchen die Stoffbilanzen jeweils neu berechnet werden können. In dieser Arbeit wurden die Zufallsvariablen mithilfe der 'Latin Hypercube'-Methode (McKay et al. 1979) mit der Software R (Version 3.6.3, Paket LHS) simuliert. In der 'Latin Hypercube'-Methode werden Wertebereiche eines Parameters zunächst in gleich wahrscheinliche Intervalle stratifiziert, aus welchen dann entsprechend der angenommenen theoretischen Verteilung systematisch Werte gezogen werden. Im Vergleich zu anderen Verfahren, wie etwa der Monte-Carlo-Simulation, werden hierbei bereits mit erheblich weniger simulierten Werten erwartungstreue Stichproben erreicht (Keller et al. 2005). In dieser Studie wurden für alle Stoffbilanzen jeweils 1'000 Werte pro Zufallsvariable simuliert.

2.8.4 Unsicherheitsanteile

Der Beitrag einer bestimmten Zufallsvariable zur Streuung der simulierten Nettoflüsse wird als Unsicherheitsanteil ausgedrückt, wofür konkret verschiedene Masszahlen infrage kommen (Saltelli et al. 2004). In dieser Arbeit wurde der Beitrag jeder Zufallsvariable (X_i) zur Streuung der simulierten Nettoflüsse ($Y_{S,j}$) mithilfe eines multiplen linearen Regressionsmodells bestimmt (Formel 2), welches bereits in Keller et al. (2005) angewendet wurde:

$$Y_{S,j} = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i X_i + \varepsilon_j \quad j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$Y_{S,j}$ ist der simulierte Nettofluss der Substanz S (siehe Formel 1) der Simulation j, N ist die Anzahl der Simulationen (1'000), b_0 und b_i sind die Regressionskoeffizienten für jede Zufallsvariable X_i , p ist die Anzahl der Zufallsvariablen und ε steht für die Residuen. Für die Residuen wurde eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0 und der Varianz σ^2_ε angenommen.

Für jede Zufallsvariable wurde deren Beitrag zur Unsicherheit (d.h. deren Unsicherheitsanteil) als standardisierter Regressionskoeffizient (SRC, Janssen 1994) wie folgt berechnet:

$$SRC_i = b_i \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Y} \quad i = 1, \dots, p \quad (3)$$

σ_Y ist die Standardabweichung der simulierten Nettoflüsse, und σ_{X_i} die Standardabweichung der Zufallsvariable X_i . Der SRC gibt somit die relative Änderung des Nettoflusses (ΔY) zur relativen Änderung der Zufallsvariable (ΔX_i) an, wobei beide relativen Änderungen mit der jeweiligen Standardabweichung normiert wurden.

Unsicherheitsanteile der Zufallsvariablen werden in dieser Arbeit in Bezug zum Variationskoeffizienten (bzw. relative Standardabweichung) der simulierten Nettoflüsse dargestellt. Hierzu wurden die SRC-Anteile der Zufallsvariablen zunächst in Prozent der Summe aller SRC-Werte umgerechnet und dann proportional auf den Variationskoeffizienten bezogen.

Um den Einfluss extremer Werte 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*, Huber 1981) verwendet:

$$std_{MAV} = \text{median}(|w_i - \text{median}(w)|) / 0.6745 \quad (4)$$

w sind die Werte für welche std_{MAV} berechnet werden soll mit einzelnen Werten w_i ($i = 1, \dots, p$), wobei p der Anzahl Werte entspricht.

3 Ergebnisse

3.1 Stoffbilanzen nach Betriebstyp und Parzellennutzung

In diesem Kapitel werden Stoffbilanzen pro Betriebstyp und Parzellennutzung (Ackerbau, Grasland und Spezialkulturen) für NABO-Parzellen präsentiert. Einleitend werden Düngerbilanzen der Nährstoffe N, P und K vorgestellt, da die Nährstoffversorgung mit Hof-, Mineral- und Recyclingdüngern die Schwermetalleinträge stark beeinflusst. Die Düngerbilanzen beinhalten wie bereits erwähnt weder atmosphärische Deposition noch symbiotische N-Einträge.

Die Stoffbilanzen in diesem Kapitel beziehen sich auf den gesamten Beobachtungszeitraum von 1985-2017. Veränderungen der Stoffbilanzen über die Zeit werden in Kapitel 3.4 thematisiert.

3.1.1 Stickstoff (N)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer N-Düngerbilanzen pro Betriebstyp waren von 1985-2017 zwischen $-17 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (grüne Linien in Abbildung 4, oben). N bezieht sich in diesem Bericht auf den Gesamtstickstoff, d.h. der pflanzenverfügbare Anteil wird nicht separat ausgewiesen (vgl. Kapitel 2.4.1).

Auf Betrieben mit Fokus auf Tierhaltung (kombinierte Veredlungsbetriebe, Rindviehbetriebe) waren die Mediane der N-Düngerbilanzen pro Parzelle meist höher auf Betrieben mit höherem Tierbesatz pro LN (Abbildung 4, oben). Hofdünger waren auf diesen Parzellen meist der wichtigste N-Eintragspfad (Abbildung 4, Mitte). Auf Ackerbau- und Spezialkulturbetrieben waren hingegen Mineraldünger der wichtigste N-Eintragspfad (Abbildung 4, Mitte).

Mittlere N-Einträge aus Mineral-, Hof- und Recyclingdüngern waren zwischen $100\text{-}167 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von Ackerbaubetrieben, $85\text{-}219 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von Betrieben mit kombiniertem Fokus auf Milchkühe und Ackerbau und $0\text{-}257 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von Betrieben mit Fokus auf Spezialkulturen, bei Letzteren war der höchste Wert auf einer Gemüsebauparzelle (Abbildung 4: Parzelle B043). Auf Parzellen von kombinierten Veredlungsbetrieben wurden die höchsten N-Einträge festgestellt mit Werten zwischen 134 und $362 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Über alle Parzellen gemittelt wurden rund 103% der N-Einträge aus Mineral-, Hof- und Recyclingdüngern über die Ernte abgeführt.

Die Unsicherheiten der N-Düngerbilanzen, ausgedrückt als Variationskoeffizienten, bewegten sich auf den meisten Parzellen zwischen 30-150% der Düngerbilanz und waren im Median 65% (Abbildung 4, unten). Auf sieben Parzellen war der Variationskoeffizient $\geq 200\%$, was v.a. Parzellen mit etwa ausgeglichenen N-Düngerbilanzen betraf. Unsicherheiten waren in erster Linie auf die Streuung der N-Konzentrationen im Erntegut und in Hofdüngern zurückzuführen und in zweiter Linie auf Unschärfen bei Mengenangaben von Erntegut und Hofdüngern.

Box 1 Überblick über N-Flüsse (Abbildung 4)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** $0 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Ackerbau ($2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) \approx Rindvieh > Spezialkulturen > Kombiniert Andere > Kombiniert Veredlung > Kombiniert Milchkühe/Ackerbau ($-17 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Hof- und Mineraldünger
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 103% der N-Einträge (atmosphärische Deposition und symbiotische Einträge sind nicht berücksichtigt)

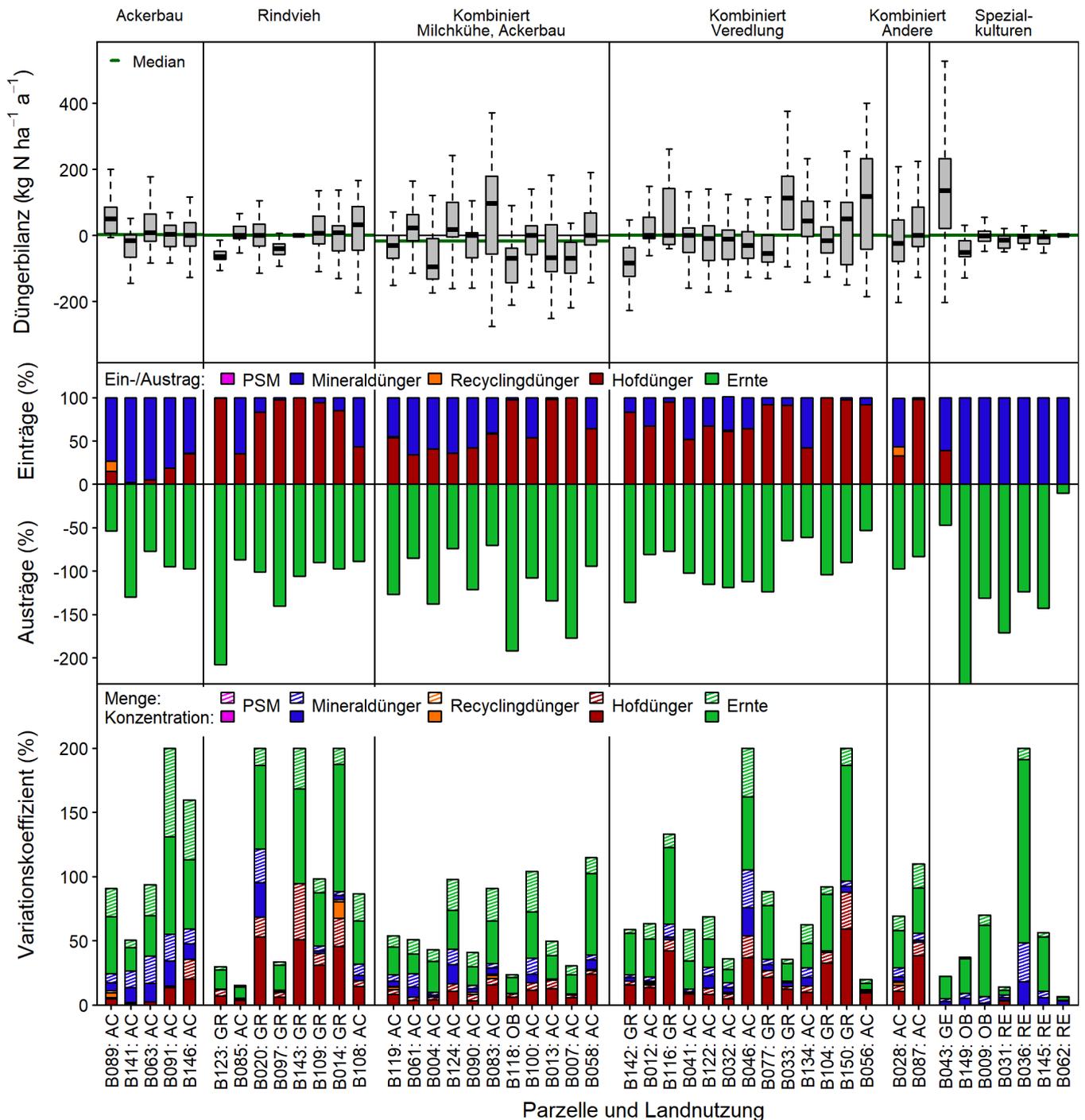


Abbildung 4 Boxplots jährlicher N-Düngerbilanzen (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp

Verschiedene NABO-Betriebe und NABO-Parzellen veränderten sich aufgrund neuer gesetzlicher Rahmenbedingungen und betrieblicher Umgestaltungen (z.B. Bewirtschafterwechsel) über die Zeit. Der Einfluss solcher Veränderungen auf parzellenbezogene Stoffflüsse ist exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.

Die NABO-Parzelle B119 gehörte bis 2009 zu einem Betrieb mit Rindviehhaltung (Milchkühe und Rinder) und Ackerbau (Abbildung 5, oben). Der Betrieb gab die Milchviehhaltung 1998 auf und hielt nur noch einige Aufzuchttrinder, was in der Folge ab dem Jahr 2000 zu einem deutlichen Rückgang des Hofdüngereinsatzes auf der NABO-Parzelle geführt hat. Zwischen 2000-2009 erfolgte die N-Versorgung primär durch Mineraldünger. 2010 wurde der Betrieb von einem Rindermast-Betrieb übernommen, was sich wiederum deutlich in einer Zunahme des Hofdüngereinsatzes ab dem Jahr 2010 zeigt.

Die NABO-Parzelle B116 gehört zu einem kombinierten Veredlungsbetrieb, welcher 1993 auf IP umstellte und 1995 den Besitzer wechselte. Der Betrieb stellte 2000 eine existierende Milchviehhaltung auf Grossviehmast um und vergrößerte 2001 eine bereits existierende Schweineproduktion. Auch hier zeigen sich Einflüsse auf die N-Versorgung der NABO-Parzelle, welche primär durch Hofdüngergaben sichergestellt wurde und ab 2001 deutlich anstieg (Abbildung 5, unten).

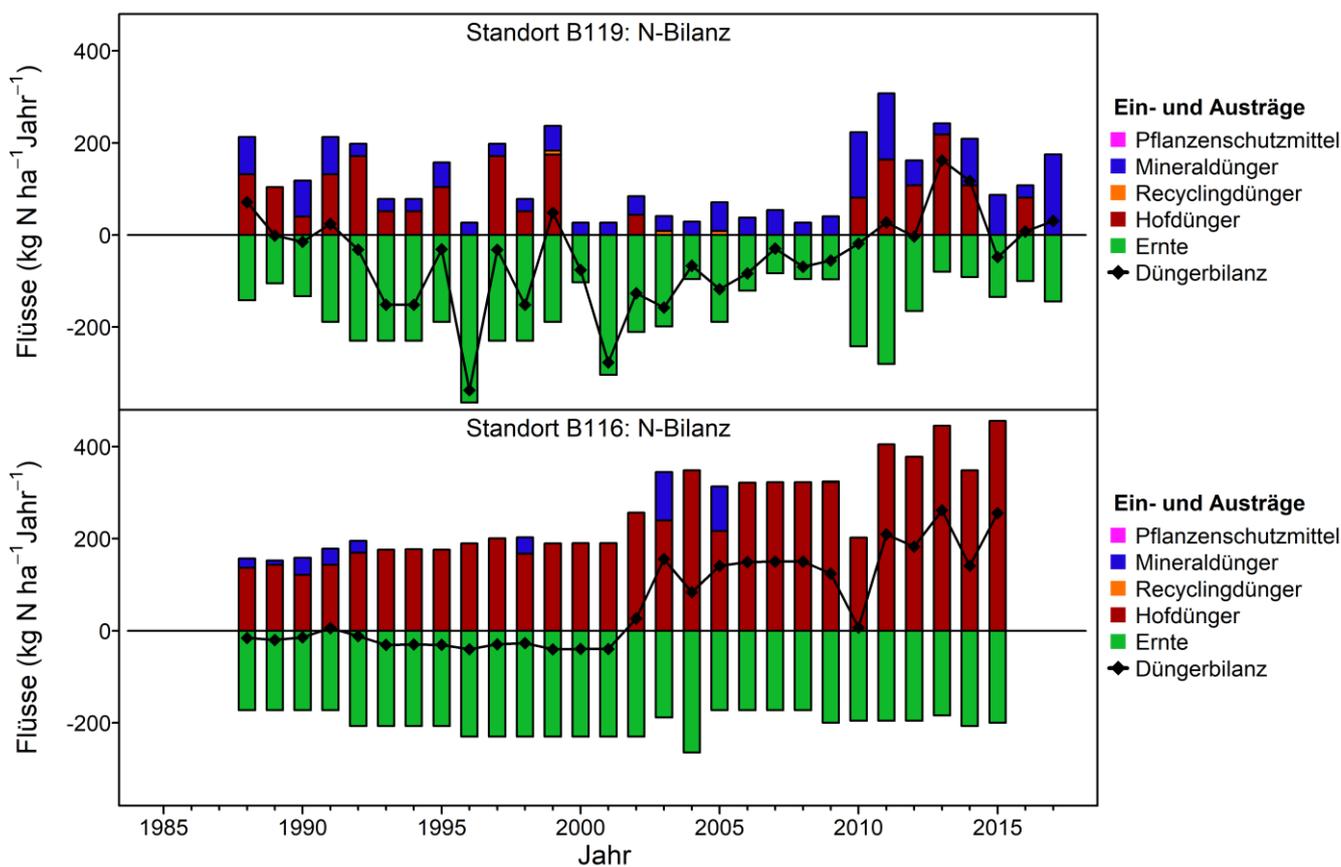


Abbildung 5 N-Bilanzen auf NABO-Parzellen B119 (oben) und B116 (unten) von 1985-2017 (für Parzelle B116 liegen Daten bis und mit 2015 vor)

3.1.2 Phosphor (P)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer P-Düngerbilanzen pro Betriebstyp waren von 1985-2017 auf allen Betriebstypen etwa ausgeglichen (-5 bis 0 kg P ha⁻¹ a⁻¹, grüne Linien in Abbildung 6, oben). Bei kombinierten Veredelungsbetrieben unterschieden sich einzelne Parzellen stark voneinander mit Medianen zwischen -16 kg P ha⁻¹ a⁻¹ und 28 kg P ha⁻¹ a⁻¹ je nach Parzelle bzw. Betrieb. Bei kombinierten Veredelungsbetrieben und Betrieben mit Milchkühen und Ackerbau stieg die P-Düngerbilanzen pro Parzelle in der Regel mit dem Tierbesatz pro LN (Abbildung 6, oben).

Die wichtigsten P-Eintragspfade waren Hof- und Mineraldünger, Recyclingdünger waren nur auf einzelnen Parzellen relevant (Abbildung 6, Mitte). Auf Betriebstypen mit vielen Nutztieren (Kombiniert Veredelung, Kombiniert Andere und Rindvieh) dominierten Hofdünger für die P-Versorgung der Parzellen, während Kombinierte Milchkühe- und Ackerbaubetriebe und Ackerbaubetriebe zumeist sowohl Hofdünger als auch Mineraldünger einsetzten (Abbildung 6, Mitte). Spezialbetriebe setzten mehrheitlich auf Mineraldünger (insbesondere Rebbau-Betriebe), auf einer Gemüsebau-Parzelle (B043) wurde jedoch rund ein Drittel des P-Inputs über Hofdünger gedeckt (Abbildung 6, Mitte).

P-Einträge aus Mineral-, Hof- und Recyclingdüngern waren zwischen 15-42 kg P ha⁻¹ a⁻¹ auf Parzellen von Ackerbaubetrieben, kombinierten Milchkühe- und Ackerbaubetrieben und Spezialbetrieben; auf Parzellen von kombinierten Veredelungsbetrieben waren die Einträge 18-80 kg P ha⁻¹ a⁻¹. P-Entzüge über die Ernte waren durchschnittlich rund 110% der P-Einträge.

Die Variationskoeffizienten der P-Düngerbilanzen bewegten sich auf den meisten Parzellen zwischen 30-100% der Düngerbilanz und waren im Median 53% (Abbildung 6, unten). Auf vier Parzellen war der Variationskoeffizienten \geq 200%. Unsicherheiten in der Bilanzierung gingen zu grossen Teilen auf die Streuung von P-Konzentrationen im Erntegut sowie in Hofdüngern zurück. Zudem waren auf einigen Betrieben auch Mengenangaben in den Bewirtschaftungsdaten mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

Box 2 Überblick über P-Flüsse

(Abbildung 6)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** 0 kg P ha⁻¹ a⁻¹
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Kombiniert Veredelung (0 kg P ha⁻¹ a⁻¹) \approx Spezialkulturen \approx Rindvieh > Kombiniert Andere > Ackerbau \approx Kombiniert Milchkühe, Ackerbau (-5 kg P ha⁻¹ a⁻¹)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Hof- und Mineraldünger
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 108% der P-Einträge

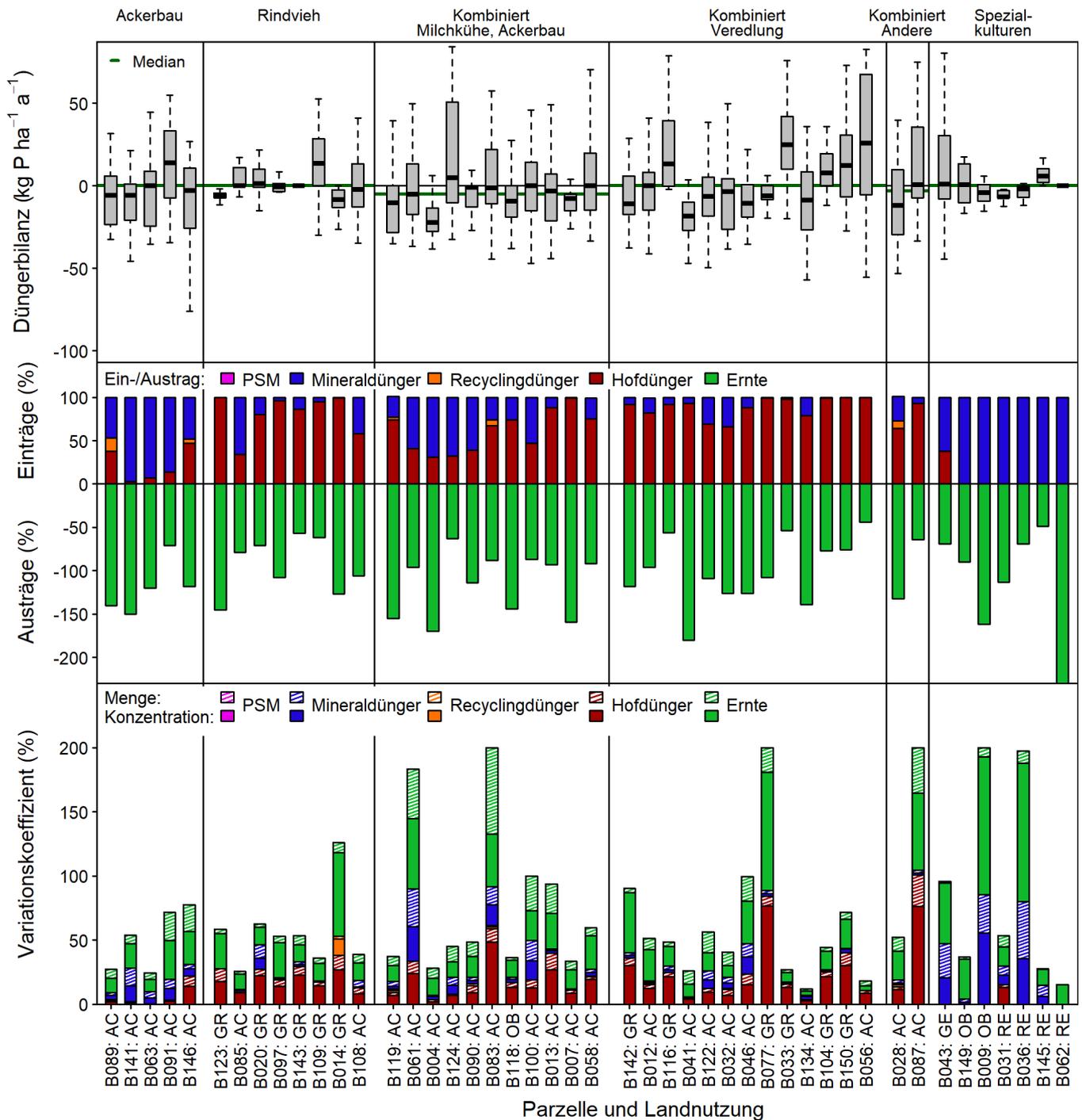


Abbildung 6 Boxplots jährlicher P-Düngerbilanzen (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert des Gesamteintrages (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp

Beispielhaft sei hier die P-Versorgung auf den NABO-Parzellen B150 (Betriebstyp kombiniert Veredlung, Abbildung 7, oben) und B014 (Betriebstyp Rindvieh, Abbildung 7, unten) dargestellt.

Parzelle B150 wurde über den Beobachtungszeitraum als intensive Naturwiese genutzt und der Betrieb betreibt sowohl Milchviehhaltung als auch Schweinemast. Die Naturwiese wurde fast ausschliesslich durch auf dem Betrieb anfallende Hofdünger gedüngt. Auf dem Betrieb wurden bis 1996 rund 61 GVE gehalten und der Nutztierbestand wurde danach, u.a. durch zusätzliche Pachtung eines Milchviehstalls, auf 65 GVE (Jahr 2003), 76 GVE (Jahr 2011) und rund 80 GVE (Jahr 2014) aufgestockt. Diese Veränderungen der Nutztierhaltung gingen mit einem Anstieg von P-Düngergaben via Hofdünger einher (Abbildung 7, oben).

Auch der P-Bedarf der Parzelle B014, welche als Grasland genutzt wurde, wurde im Wesentlichen über Hofdünger aus Rinderhaltung gedeckt (Abbildung 7, unten). In den frühen Jahren der Beobachtung, um das Jahr 1990, wurden geringe Mengen P durch Klärschlamm zugeführt.

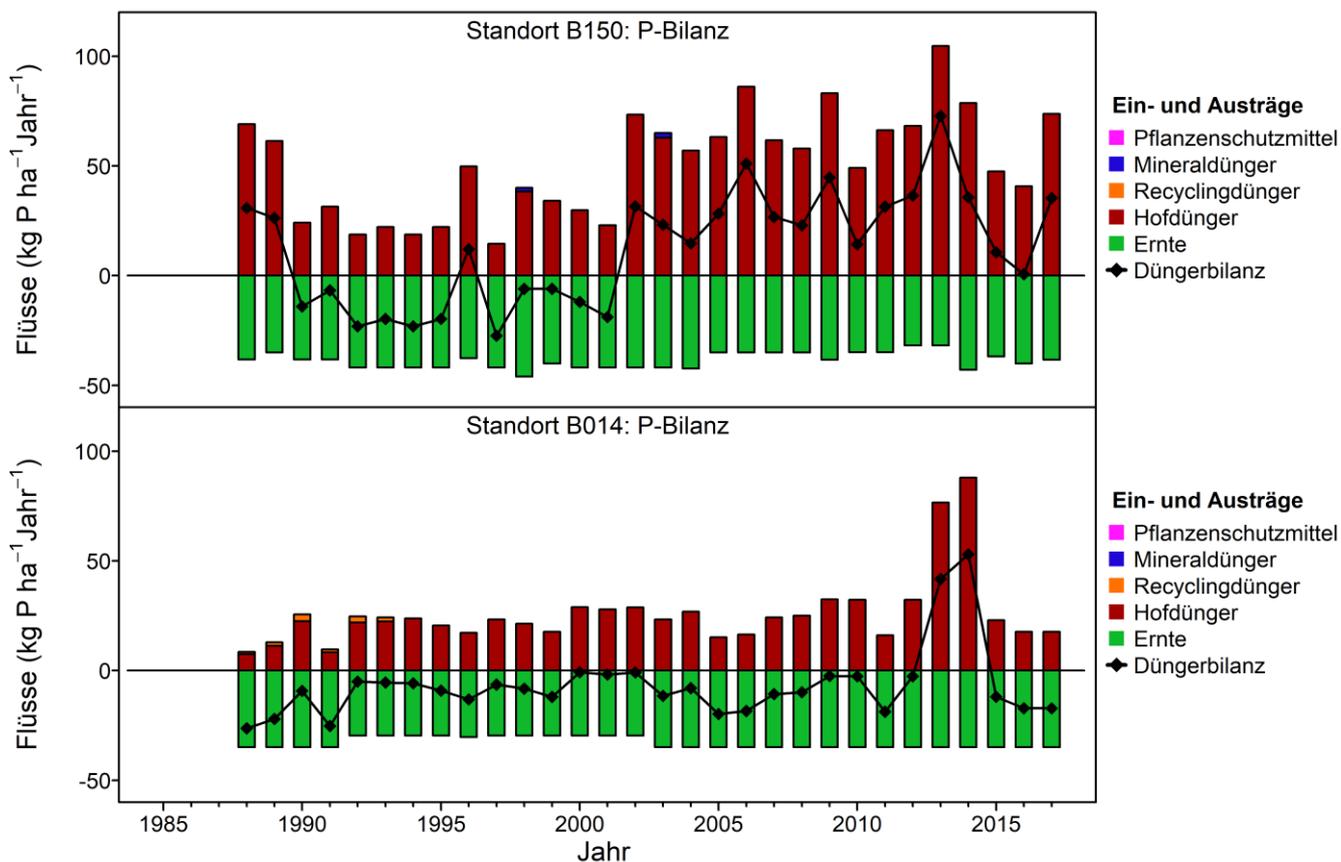


Abbildung 7 P-Bilanzen auf NABO-Parzellen B150 (oben) und B014 (unten) von 1985-2017

3.1.3 Kalium (K)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer K-Düngerbilanzen pro Betriebstyp waren von 1985-2017 auf den Betriebstypen Ackerbau, Kombiniert Milchkühe und Ackerbau, Kombiniert Andere sowie Spezialkulturen etwa ausgeglichen. Auf Rindviehbetrieben waren K-Düngerbilanzen ca. $38 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und auf kombinierten Veredlungsbetrieben ca. $23 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Abbildung 8, oben). Wie bei N und P traten erhöhte K-Düngerbilanzen besonders bei Betrieben mit einem hohen Tierbesatz pro LN auf.

Hofdünger war der wichtigste K-Eintragspfad ausser auf Ackerbau- und Spezialkulturbetrieben, welche die K-Versorgung primär über Mineraldünger abdeckten (Abbildung 8, Mitte). Auf zwei Parzellen (B089 und B043) stammten kleinere K-Einträge aus Klärschlamm (vor 2006).

Die K-Einträge aus Mineral-, Hof- und Recyclingdüngern lagen zwischen $41\text{-}214 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von Ackerbaubetrieben und kombinierten Milchkühe- und Ackerbaubetrieben, $118\text{-}432 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von kombinierten Veredlungsbetrieben und $0\text{-}182 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf Parzellen von Spezialbetrieben.

Über das Erntegut wurden durchschnittlich knapp 80% der K-Einträge ausgetragen.

Der Variationskoeffizient der K-Düngerbilanzen bewegte sich auf den meisten Parzellen zwischen 25-150% der Düngerbilanz, und war im Median ca. 45%. Auf neun Parzellen betrug der Variationskoeffizient $\geq 200\%$ (Abbildung 8, unten), insbesondere bei ausgeglichenen K-Düngerbilanzen. Unsicherheiten waren primär auf die Streuung der K-Konzentrationen im Erntegut und in Hofdüngern zurückzuführen.

Box 3 Überblick über K-Flüsse

(Abbildung 8)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** $6 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Rindvieh ($38 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > Kombiniert Veredlung > Ackerbau > Kombiniert Milchkühe, Ackerbau > Kombiniert Andere > Spezialkulturen ($-4 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Hof- und Mineraldünger
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 76% der K-Einträge

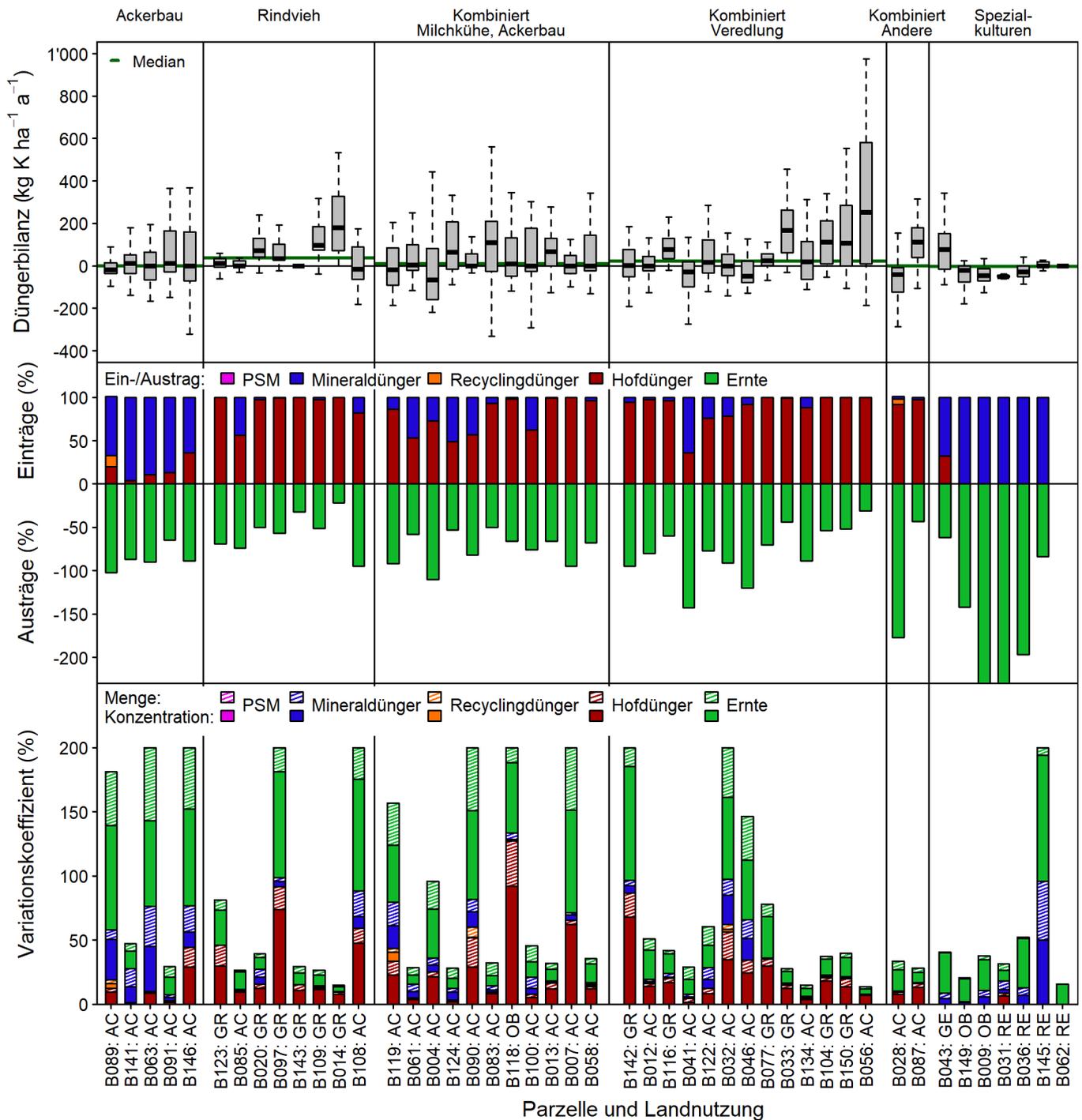


Abbildung 8 Boxplots jährlicher K-Düngerbilanzen (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert des Gesamteintrages (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp

3.1.4 Kupfer (Cu)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer Cu-Nettoflüsse pro Betriebstyp waren von 1985-2017 auf allen Betriebstypen positiv (Abbildung 9, oben). Parzellen auf Spezialkultur-Betrieben hatten mit $104 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ die grössten Cu-Nettoflüsse, gefolgt von kombinierten Veredlungsbetrieben mit $92 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Abbildung 9, oben). Rebbau-Parzellen gesondert betrachtet hatten sehr hohe Nettoflüsse mit einem Median von $2'025 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Abbildung 10).

Parzellen auf verschiedenen kombinierten Betriebstypen hatten Mediane jährlicher Cu-Nettoflüsse zwischen $0\text{-}390 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf einzelnen Parzellen, wobei die konkrete Parzellennutzung Ackerbau, Grasland sowie Spezialkulturen abdeckte (Abbildung 9, oben). Parzellen auf Ackerbaubetrieben bzw. ackerbaulich genutzte Parzellen auf anderen Betriebstypen hatten die tiefsten Mediane. Generell schienen die Cu-Nettoflüsse positiv mit dem Tierbesatz pro LN zu korrelieren (Abbildung 9, oben).

Auf Parzellen, welche zu Betrieben mit Fokus auf Rindviehhaltung sowie kombinierten Veredlungsbetrieben gehörten, war Hofdünger der wichtigste Cu-Eintragspfad. Auf Parzellen von Ackerbau- und Spezialbetrieben waren hingegen meist PSM am bedeutendsten (Abbildung 9, Mitte). Bei Betrieben mit Milchkuhhaltung und Ackerbau stammten die grössten Cu-Einträge je nach konkreter Nutzung der Parzelle aus Hofdüngern, PSM oder Klärschlammeinträgen bis 2006. Veränderungen der Parzellennutzung bzw. -bewirtschaftung über die Zeit zeigen sich auf einigen Parzellen an den grossen Bandbreiten der Boxplots, beispielsweise auf Parzelle B118, einer Kirschanlage, die zu einem kombinierten Betrieb mit Verkehrsmilch mit Ackerbau gehört. Auf der Parzelle wurden in den 1990er-Jahren bis zu $7'500 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ über PSM eingetragen; nach 1993 wurde in einigen Jahren komplett auf Cu-haltige PSM verzichtet und ab 2004 zwischen $800 \text{ und } 1'500 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eingesetzt. Auf ackerbaulich genutzten Parzellen kamen Cu-haltige PSM v.a. im Anbau von Speisekartoffeln, Futter- und Zuckerrüben und Silomais zum Einsatz.

Atmosphärische Deposition trug im Vergleich zur Bewirtschaftung geringere Cu-Mengen ein und machte nur auf Parzellen mit kleinen Cu-Einträgen aus der Bewirtschaftung einen grösseren Anteil an den Einträgen aus (z.B. Ackerbau-Parzellen B141 und B063). Die atmosphärische Deposition war rund $40 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis Anfang der 1990er-Jahre, nahm bis ca. zum Jahr 2000 auf ca. $20 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ab und blieb seither etwa konstant.

Der Variationskoeffizient der Cu-Nettoflüsse lag bei den meisten Parzellen zwischen 15-170% des Nettoflusses und betrug im Median 46% (Abbildung 9, unten). Die grosse Bandbreite von Cu-Konzentrationswerten in Hofdüngern sowie im Erntegut war die wichtigste Ursache von Unsicherheiten; Unschärfen bei den Mengenangaben trugen in geringerem Masse zu Unsicherheiten bei. Auf Spezialbetrieben waren Unsicherheiten gering, da Cu-Konzentrationen in PSM als genau bekannt angenommen wurden und Unsicherheiten ausschliesslich bei den Mengenangaben zur PSM-Ausbringung berücksichtigt wurden.

Box 4 Überblick über Cu-Flüsse

(Abbildung 9)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** $45 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Spezialkulturen ($104 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > Kombiniert Veredlung > Kombiniert Andere > Rindvieh > Kombiniert Milchkühe, Ackerbau > Ackerbau ($9 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Hofdünger im Ackerbau und auf kombinierten Betrieben, und PSM auf Spezialkulturen
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 35% der Cu-Einträge

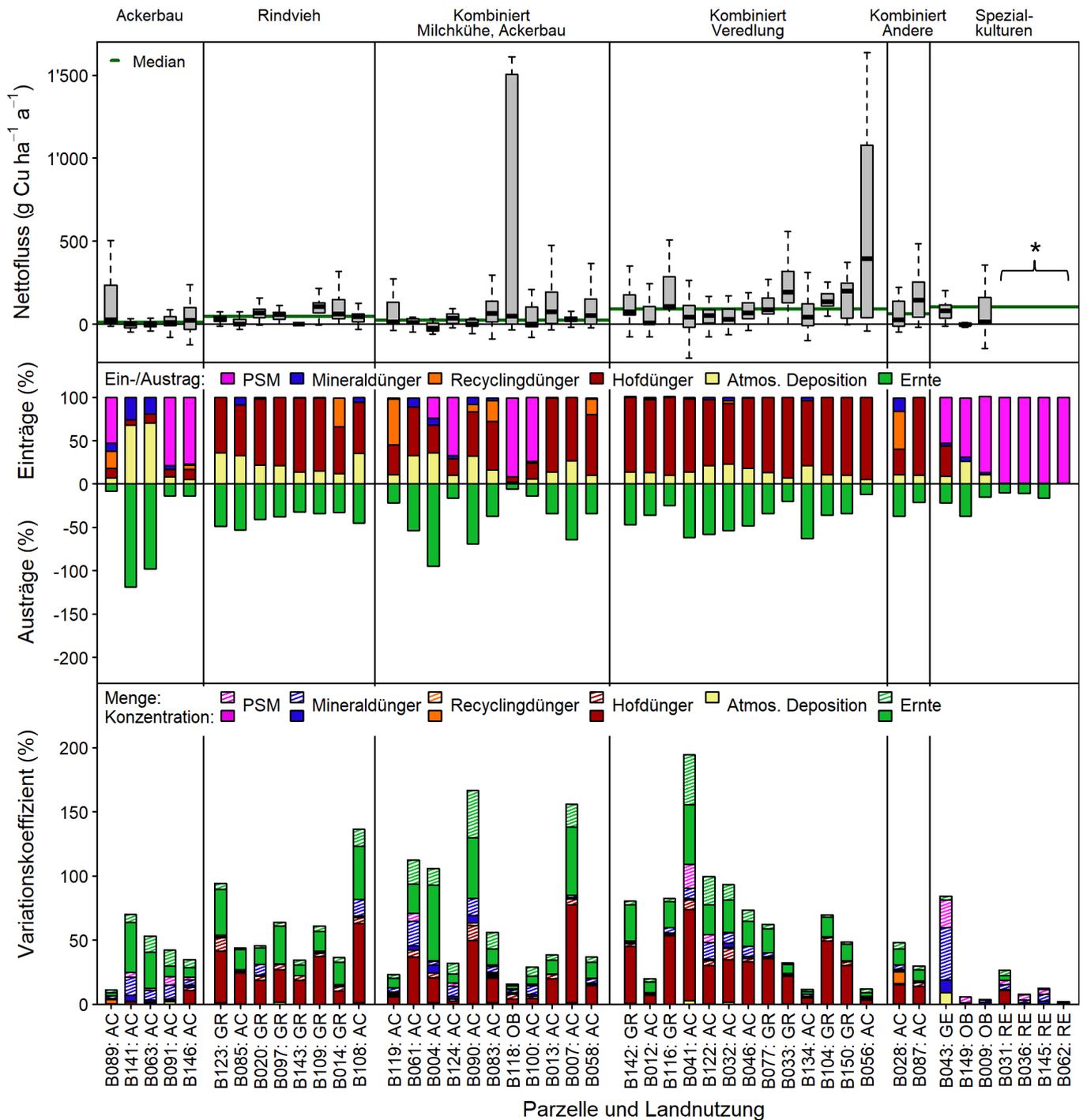


Abbildung 9 Boxplots jährlicher Cu-Nettoflüsse (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert des Gesamteintrages (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp; * Rebbau siehe Abbildung 10

Ein- und Austräge von Cu sind in Abbildung 10 beispielhaft für eine Ackerbauparzelle eines Betriebs mit kombinierter Milchkuhhaltung und Ackerbau (B100) und eine Rebbauparzelle eines Spezialbetriebs (B145) dargestellt. Auf der Ackerbauparzelle sind Cu-Einträge v.a. auf Hof- und Mineraldünger und nur in den Jahren 1989 und 1992 wesentlich auf PSM zurückzuführen (Abbildung 10, Mitte). Im Gegensatz dazu sind regelmäßige PSM-Anwendungen der Haupteintragspfad von Cu auf der Rebbauparzelle B031 (Abbildung 10, unten).

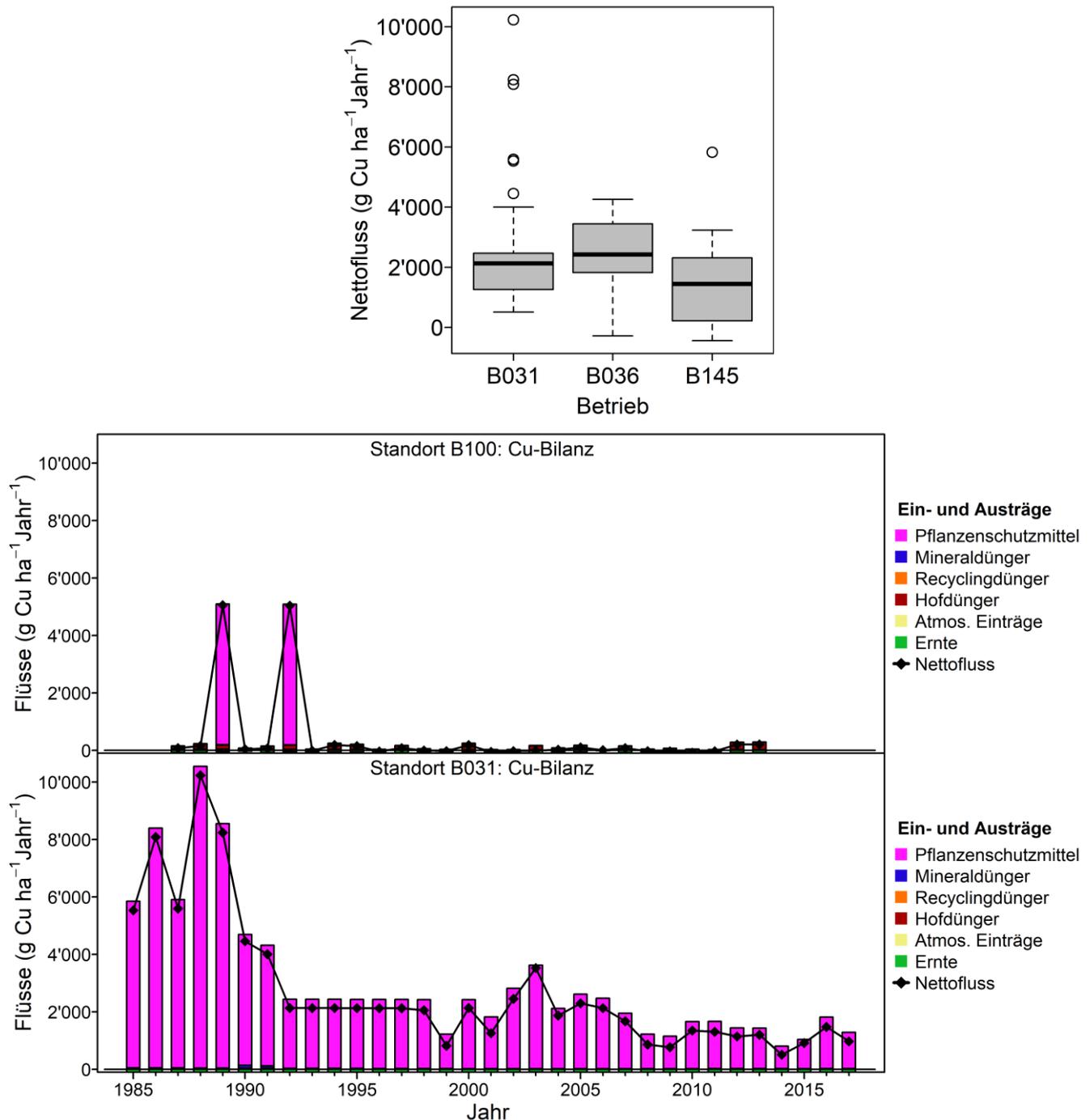


Abbildung 10 Boxplots jährlicher Cu-Nettoflüsse auf drei Rebbauparzellen (oben, die Rebbauparzelle B062 ist nicht berücksichtigt, da nur über acht Jahre Daten vorliegen), Ein- und Austräge von Cu auf Ackerbauparzelle B100 (Mitte) und Ein- und Austräge von Cu auf Rebbauparzelle B031 (unten)

3.1.5 Zink (Zn)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer Zn-Nettoflüsse pro Betriebstyp waren von 1985-2017, ähnlich wie Cu-Nettoflüsse, auf allen Betriebstypen positiv (Abbildung 11, oben). Parzellen auf kombinierten Veredlungsbetrieben wiesen mit einem Median von $405 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ die höchsten Zn-Nettoflüsse auf, gefolgt von Parzellen auf den Betriebstypen Kombiniert Andere ($225 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Rindvieh ($170 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Abbildung 11, oben). Die übrigen Betriebstypen hatten Mediane zwischen $5\text{-}50 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Wie Cu- waren auch Zn-Nettoflüsse meist grösser auf Parzellen von Betrieben mit grösserem Tierbesatz pro LN (Abbildung 11, oben). Drei Graslandparzellen des Betriebstyps Kombiniert Veredlung hatten Mediane zwischen 900 und $1'000 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (B033, B104 und B150).

Parzellen auf dem Betriebstyp Spezialkulturen hatten insgesamt einen Median von $38 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, jedoch mit starken Unterschieden je nach Parzellennutzung. So hatte die Gemüseparzelle B043 einen Median von $389 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, primär aus Hofdüngern, wohingegen die Obstbauparzelle B149 einen Median um $0 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ hatte (Abbildung 11, oben).

Auf den meisten Parzellen waren Hofdünger und atmosphärische Deposition die wichtigsten Zn-Einträge, in einigen Fällen auch Klärschlamm bis 2006 (Abbildung 11, Mitte). Die atmosphärische Deposition ging von rund $160 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gegen Ende der 1980er-Jahre auf knapp $100 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ um das Jahr 2000 und in den folgenden Jahren auf rund $50\text{-}70 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zurück. Die atmosphärische Deposition war nur auf Parzellen mit geringen Einträgen aus der Bewirtschaftung der dominante Zn-Eintrag. Auf vielen Parzellen wurde Zn auch durch Mineraldünger eingetragen, jedoch im Vergleich zu anderen Hilfsstoffen nur in untergeordneten Mengen. PSM spielten nur auf einer Obstbau- (Parzelle B009, Abbildung 11, Mitte) und einer Rebbau-Parzelle (B031, Abbildung 12, oben) eine wesentliche Rolle. Auf einer Gemüseparzelle kamen die grössten Zn-Einträge hingegen von Hofdüngern (Parzelle B043, Abbildung 12, unten). Die Verläufe der Zn-Einträge in Abbildung 12 zeigen auch beispielhaft die Abnahme der atmosphärischen Zn-Deposition über die Zeit.

Der Variationskoeffizient bewegte sich auf den meisten NABO-Parzellen zwischen $30\text{-}100\%$ des Nettoflusses und war im Median bei 53% . Auf sechs Parzellen war der Variationskoeffizient $\geq 200\%$ des Nettoflusses (Abbildung 11, unten). Die Unsicherheiten waren wie bei Cu bedingt durch die Streuung der Zn-Konzentrationen in Hofdüngern und im Erntegut; Unsicherheiten zu Mengenangaben spielten auch bei Zn eine kleinere Rolle.

Box 5 Überblick über Zn-Flüsse

(Abbildung 11)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** $94 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Kombiniert Veredlung ($405 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > Kombiniert Andere > Rindvieh > Kombiniert Milchkühe, Ackerbau > Spezialkulturen > Ackerbau ($5 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Hofdünger, PSM und auf einigen Parzellen Klärschlamm bis 2006
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 49% der Zn-Einträge

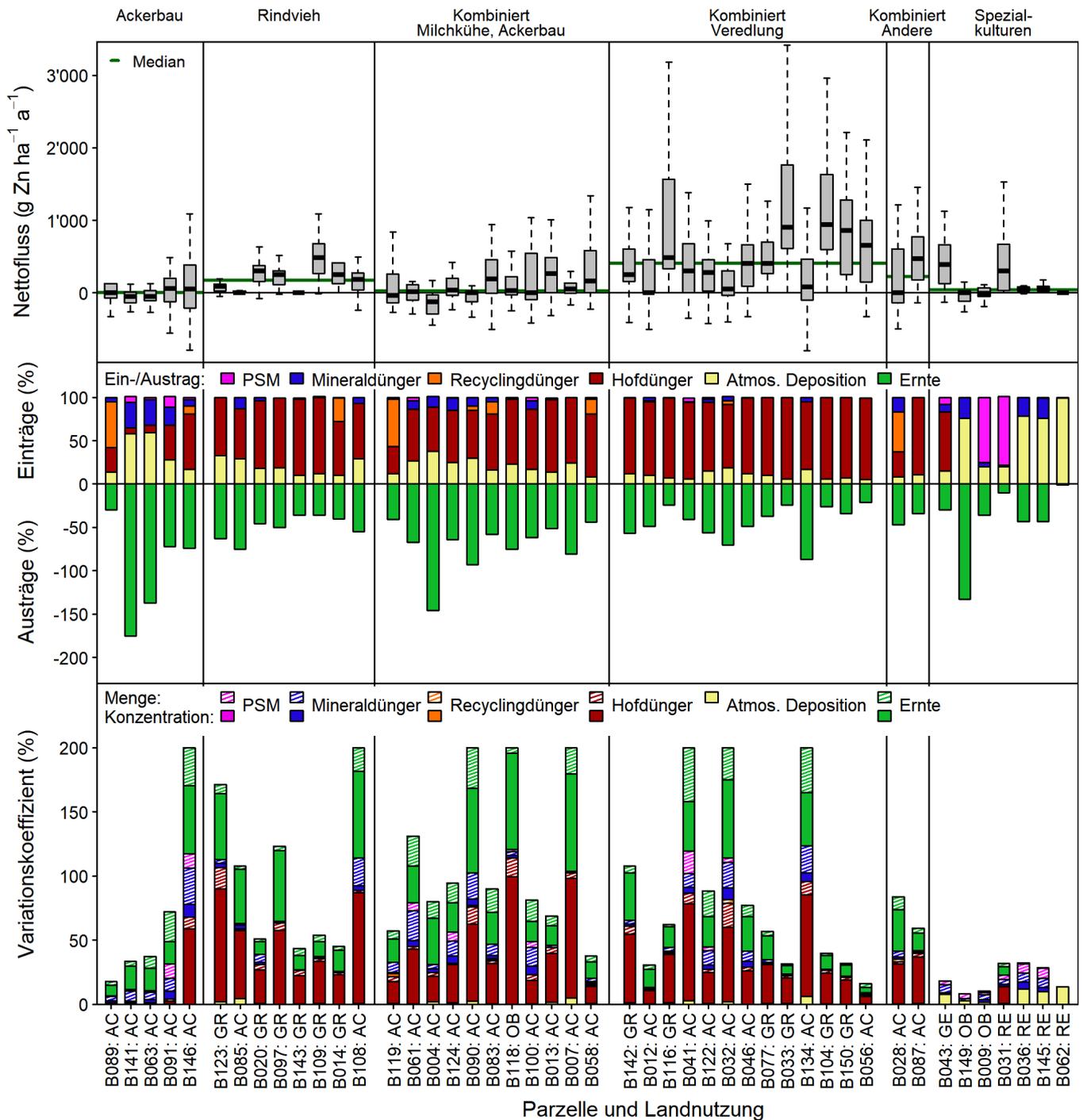


Abbildung 11 Boxplots jährlicher Zn-Nettoflüsse (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert des Gesamteintrages (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp

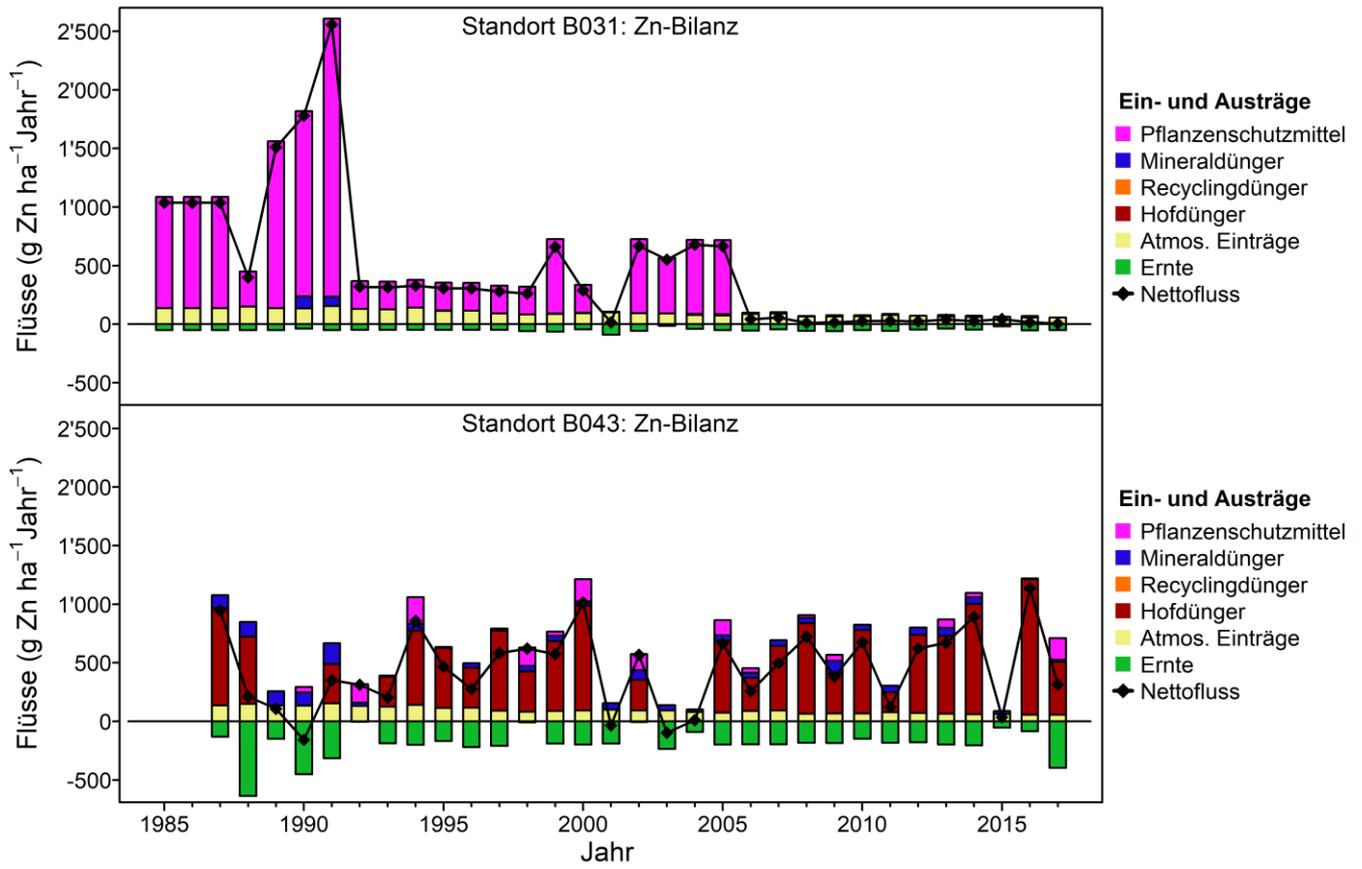


Abbildung 12 Ein- und Austräge von Zn auf Rebbauparzelle B031 (oben) und Gemüseparzelle B043 (unten) von 1985-2017

3.1.6 Cadmium (Cd)

Die Mediane jährlicher parzellenscharfer Cd-Nettoflüsse pro Betriebstyp von 1985-2017 bewegten sich zwischen 0.2 und 0.8 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ (Abbildung 13, oben). Unterschiede zwischen den Betriebstypen waren im Vergleich zu Cu und Zn gering. Mediane jährlicher Nettoflüsse einzelner Parzellen lagen zwischen -0.6 und 3.2 g Cd ha⁻¹ a⁻¹.

Mineral- und Hofdünger waren die wichtigsten Cd-Eintragspfade auf den meisten Parzellen; wenn Klärschlamm ausgebracht wurde, war auch dies ein wichtiger Eintrag bis zu dessen Verbot 2006 (Abbildung 13, Mitte). Die atmosphärische Deposition spielte bei Cd eine grössere Rolle als bei Cu und Zn. Der Cd-Eintrag aus der atmosphärischen Deposition ging von rund 2.2 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ gegen Ende der 1980er-Jahre auf 0.5 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ im Jahr 2000 zurück. Seither bewegte die atmosphärische Deposition in den meisten Jahren zwischen 0.2 und 0.9 g Cd ha⁻¹ a⁻¹. Im Durchschnitt betrug die atmosphärische Deposition 41% der gesamten Cd-Einträge auf den Parzellen.

Das Verhältnis zwischen Cu-, Zn- und Cd-Flüssen auf bestimmten Parzellen ist stark durch die Düngung geprägt, was sich beispielhaft für Cu und Cd auf NABO-Parzelle B122 zeigen lässt (Abbildung 14). Die Parzelle gehört zu einem kombinierten Veredlungsbetrieb, der neben Ackerbau Milchviehhaltung sowie Truten- und Rinderzucht betreibt. Auf dessen NABO-Parzelle wurde bis 1992 häufig P-Mineraldünger ausgebracht, danach wurde die P-Versorgung primär durch Hofdünger abgedeckt und nur in einzelnen Jahren kulturabhängig zusätzlich P-Mineraldünger ausgebracht (Abbildung 14, oben). Während in den Jahren mit grösserem Anteil P-Mineraldünger die Cd-Flüsse vergleichsweise gross waren (Abbildung 14, unten), so waren die Cu-Flüsse in den Jahren mit Hofdünger-Ausbringung wichtiger (Abbildung 14, Mitte).

Über das Erntegut wurden durchschnittlich 62% der Cd-Einträge wieder ausgetragen. Nur auf einzelnen Parzellen ist aufgrund negativer Nettoflüsse eher von einer Abreicherung als von einer Anreicherung im Boden auszugehen (Abbildung 13, oben).

Der Variationskoeffizient der Cd-Nettoflüsse betrug auf 18 Parzellen $\geq 200\%$ (Abbildung 13, unten). Dies war v.a. bei Cd-Nettoflüssen um 0 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ der Fall. Die Variationskoeffizienten der übrigen Parzellen lagen auf den meisten Parzellen zwischen 20-190% des Nettoflusses und betrug im Median 105%. Die Variationskoeffizienten waren überwiegend durch die Streuung der Cd-Konzentrationen im Erntegut und zu einem geringeren Teil in Hofdüngern bedingt.

Box 6 Überblick über Cd-Flüsse

(Abbildung 13)

- **Median auf NABO-Parzellen aller Betriebstypen von 1985-2017:** 0.3 g Cd ha⁻¹ a⁻¹
- **Reihenfolge der Mediane pro Betriebstyp:** Ackerbau (0.8 g Cd ha⁻¹ a⁻¹) \approx Spezialkulturen > Rindvieh > Kombiniert Andere > Kombiniert Veredlung > Kombiniert Milchkühe, Ackerbau (0.2 g Cd ha⁻¹ a⁻¹)
- **Wichtigste Eintragspfade:** Mineral- und Hofdünger
- **Austräge über Erntegut:** Durchschnittlich 62% der Cd-Einträge

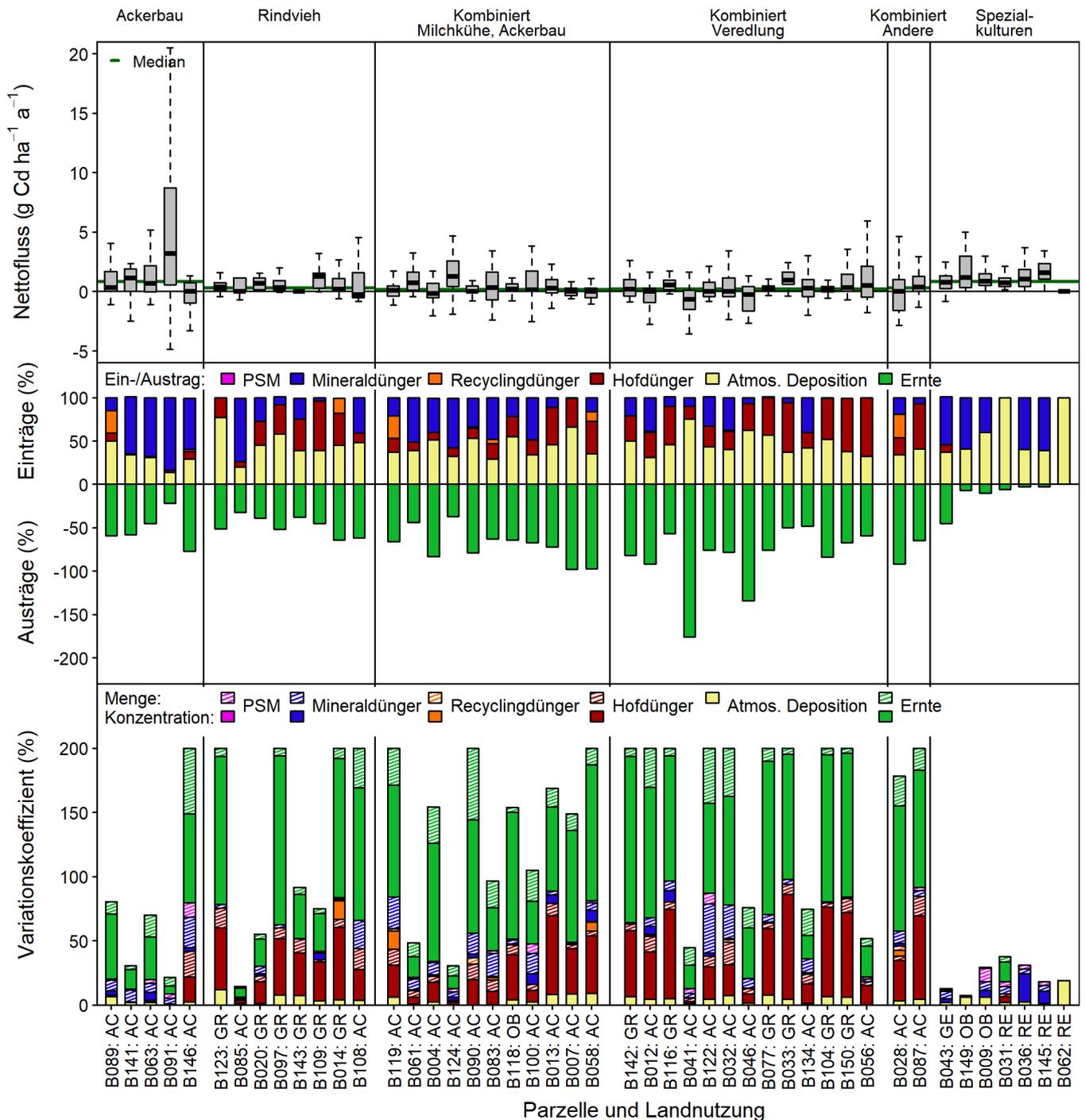


Abbildung 13 Boxplots jährlicher Cd-Nettoflüsse (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt), Ein- und Austräge als Prozentwert des Gesamteintrages (Mitte) und Variationskoeffizient (unten) pro Parzelle (B001-B150) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); Variationskoeffizienten > 200% wurden auf 200% skaliert; grüne Linie in oberen Abbildungen = Median pro Betriebstyp

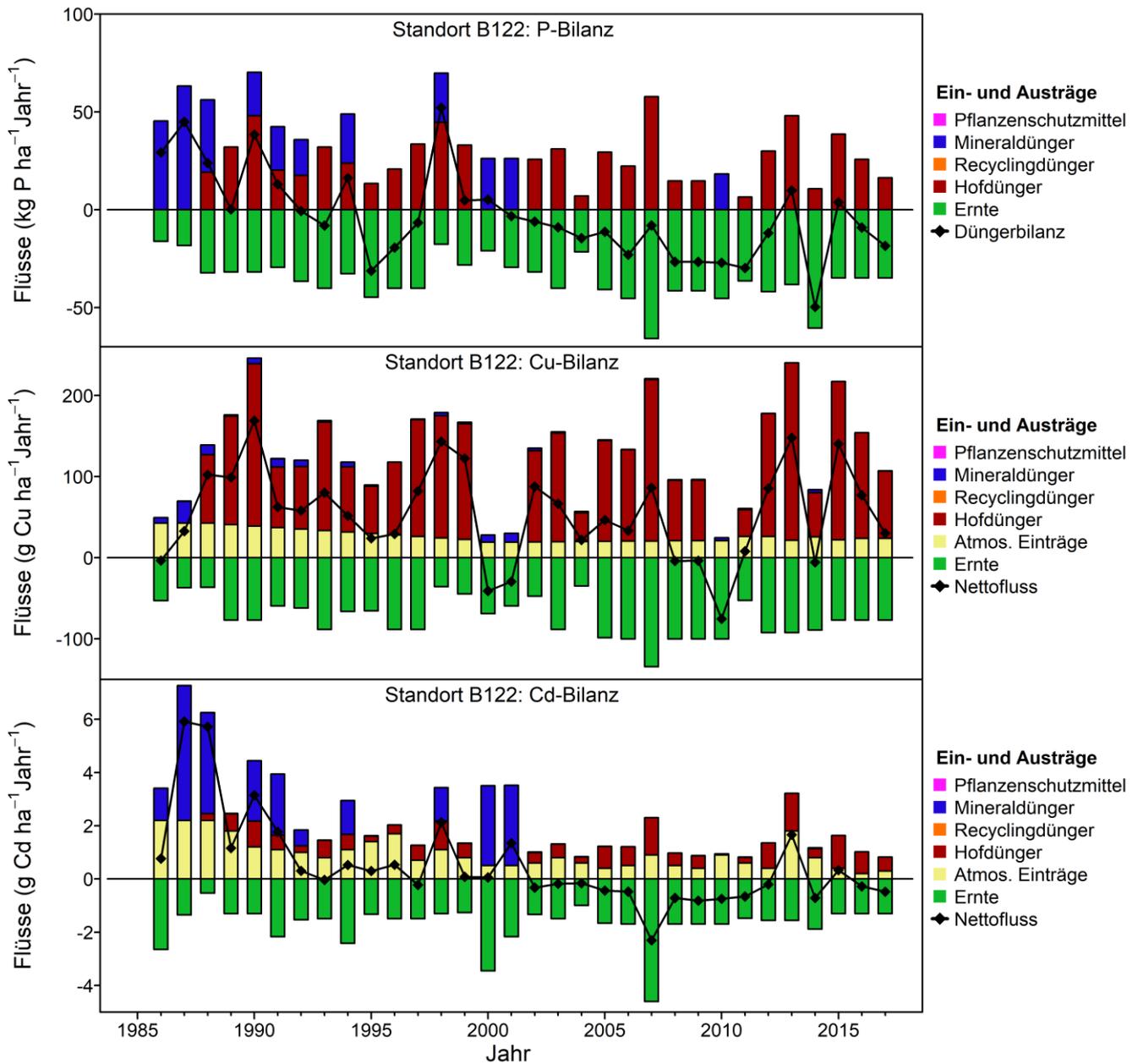


Abbildung 14 Ein- und Austräge von P (oben), Cu (Mitte) und Cd (unten) auf NABO-Parzelle B122 von 1985-2017

3.1.7 Uran (U)

Für U wurden nur Einträge via Mineraldünger berechnet, da für Einträge über Hofdünger bzw. Austräge über Erntegut derzeit noch wenige Konzentrationsdaten vorliegen. Austräge über das Erntegut sind im Vergleich zu Einträgen sehr gering (Bigalke et al. 2016).

Die Mediane jährlicher U-Einträge via Mineraldünger pro Parzelle bewegten sich zwischen 0 und 25 g U ha⁻¹ a⁻¹ von 1985-2017 (Abbildung 15). Einerseits zeigten sich grosse Unterschiede zwischen den Parzellen: Auf mehr als der Hälfte der Parzellen (25 Parzellen) wurden über den betrachteten Zeitraum nur in einzelnen Jahren bzw. in geringen Mengen U über mineralische P-Dünger ausgebracht, folglich ist in Abbildung 15 auf diesen Parzellen kein U-Eintrag ersichtlich (Extremwerte sind in den Boxplots nicht dargestellt). Andererseits variierten die U-Einträge auf den Parzellen mit regelmässigem Mineraldüngereinsatz stark. Parzellen mit vergleichsweise hohen U-Einträgen (B091, B043 und B124) hatten positive P-Düngerbilanzen und P-Einträge erfolgten hauptsächlich durch Mineraldünger (vgl. Abbildung 6, Kapitel 3.1.2). Die U-Einträge waren insbesondere beim Einsatz grösserer Mengen an Triplesuperphosphat hoch (z.B. Parzelle B091), da aufgrund des hohen mineralischen P-Gehalts in diesen Düngern auch von entsprechenden Verunreinigungen mit U ausgegangen werden muss (U-Gehalte in Mineraldüngern in Tabelle A6).

Da tierhaltende Betriebe den Nährstoffbedarf grösstenteils über Hofdünger abdeckten (vgl. Kapitel 3.2.1-3.2.3), waren durch Mineraldünger bedingte U-Einträge auf Rindvieh- und kombinierten Veredlungsbetrieben meist gering. Auf den Betriebstypen Ackerbau, kombiniert Milchkühe/Ackerbau und Spezialkulturen wurden die höchsten U-Einträge festgestellt (Abbildung 15).

Box 7
Überblick über U-Flüsse
(Abbildung 15)

- **Median der U-Einträge via Mineraldünger auf NABO-Parzellen von 1985-2017:** 0.1 g U ha⁻¹ a⁻¹
- **Reihenfolge der Mediane der U-Einträge via Mineraldünger:** Spezialkulturen (1.3 g U ha⁻¹ a⁻¹) > Ackerbau > Kombiniert Milchkühe, Ackerbau > Kombiniert Veredlung ≈ Rindvieh ≈ Kombiniert Andere (0 g U ha⁻¹ a⁻¹)
- Als Eintragspfad wurde nur Mineraldünger quantifiziert
- Austräge über Erntegut wurden nicht quantifiziert

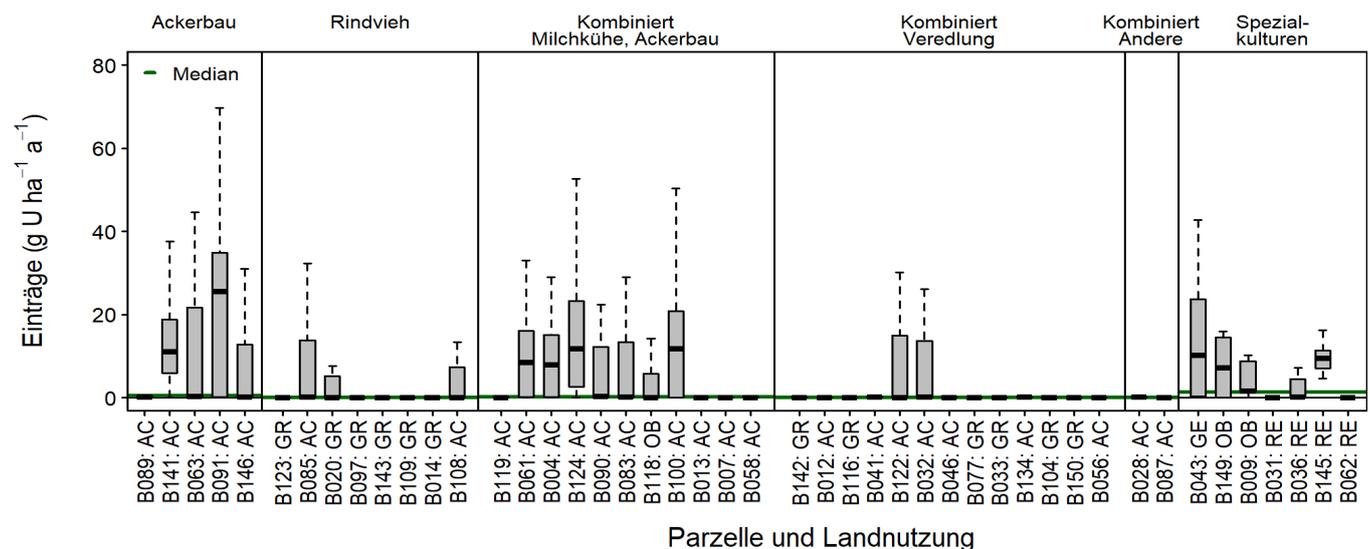


Abbildung 15 Boxplots jährlicher U-Einträge über Mineraldünger pro Parzelle (B001-B150, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) eingeteilt nach Landnutzung (AC = Ackerbau, GR = Grasland, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau) und Betriebstyp (Bildüberschriften von Ackerbau bis Spezialkulturen) von 1985-2017; pro Betriebstyp geordnet nach Anzahl GVE pro LN ansteigend von links nach rechts (Ausnahme: Spezialkulturen); grüne Linie = Median pro Betriebstyp

3.2 Stoffbilanzen pro Kultur

In diesem Kapitel werden Stoffbilanzen pro Kultur und Kulturtyp (Getreide, Hackfrüchte inklusive Mais, Grasland und Spezialkulturen) über den Beobachtungszeitraum von 1985-2017 präsentiert. Es ist zu beachten, dass sich Anwendungen von Hilfsstoffen zwischen verschiedenen Kulturen nicht immer eindeutig der vorherigen oder nachfolgenden Kultur zuordnen lassen, weshalb Resultate pro Kultur mit einer gewissen Unschärfe behaftet sind.

3.2.1 Stickstoff (N)

Die N-Düngerbilanzen geben einen Überblick über Düngereinträge und Ernteausträge (ohne atmosphärische Deposition und N-Fixierung, Abbildung 16). N bezieht sich in diesem Bericht auf den Gesamtstickstoff, d.h. der pflanzenverfügbare Anteil wird nicht separat ausgewiesen (vgl. Kapitel 2.4.1). Der Median der N-Düngerbilanzen war negativ für Grasland ($-37 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$), ungefähr ausgeglichen für die berücksichtigten Getreidesorten und Spezialkulturen und positiv für Hackfrüchte und Mais ($21 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$). Grasland wurde hauptsächlich durch Hofdünger mit N versorgt, während für Getreide, Hackfrüchte und Mais und Gemüse sowohl Mineral- als auch Hofdünger in unterschiedlichen Anteilen eingesetzt wurden (Abbildung 16, unten). Im Rebbau wurde fast nur Mineraldünger zur N-Versorgung eingesetzt. Durchschnittlich wurden via Hof-, Mineral- und Recyclingdünger rund $136 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Getreide, $172 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Hackfrüchte und Mais und $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Spezialkulturen eingesetzt. Auf Grasland wurden $221 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ auf intensiv, $148 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ auf mittelintensiv und $36 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ auf wenig intensiv bewirtschafteten Flächen ausgebracht.

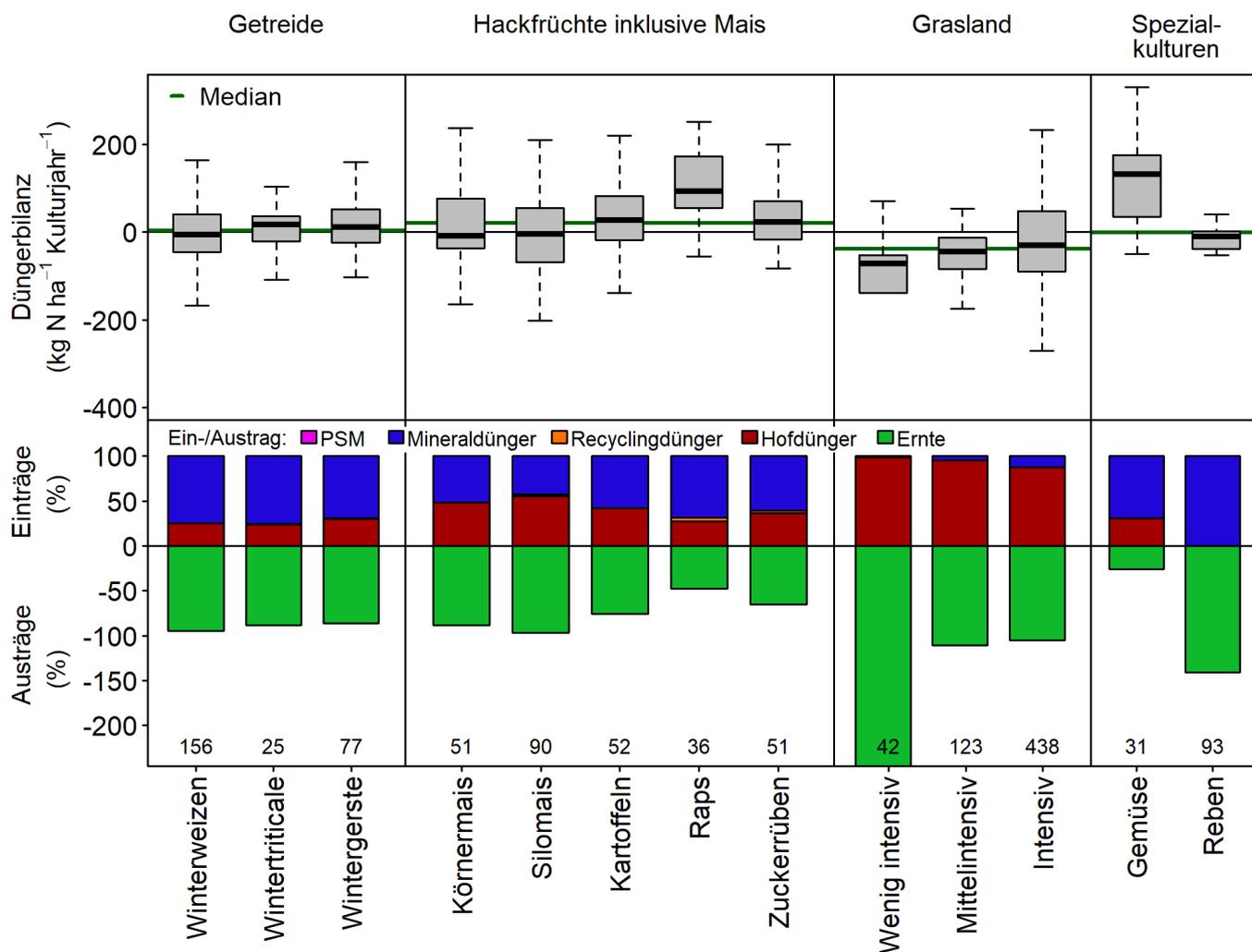


Abbildung 16 Boxplots der N-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.2.2 Phosphor (P)

Der Median der P-Düngerbilanzen war bei allen Kulturtypen ausser Getreide ungefähr ausgeglichen; bei den hier berücksichtigten Getreidesorten lag ein Nettoaustrag von $-11 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ vor (Abbildung 17).

Ähnlich wie für N wurde Grasland primär über Hofdünger mit P versorgt, bei anderen Kulturen spielten sowohl Mineral- als auch Hofdünger eine Rolle. Im Rebbau kamen fast ausschliesslich Mineraldünger zum Einsatz. Durchschnittlich wurden via Hof-, Mineral- und Recyclingdünger rund $21 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Getreide, $34 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Hackfrüchte und Mais und $10 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ für Spezialkulturen eingesetzt. Auf Grasland war die mittlere P-Ausbringung rund $39 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ bei intensiver, $30 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ bei mittelintensiver und $7 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ bei wenig intensiver Bewirtschaftung.

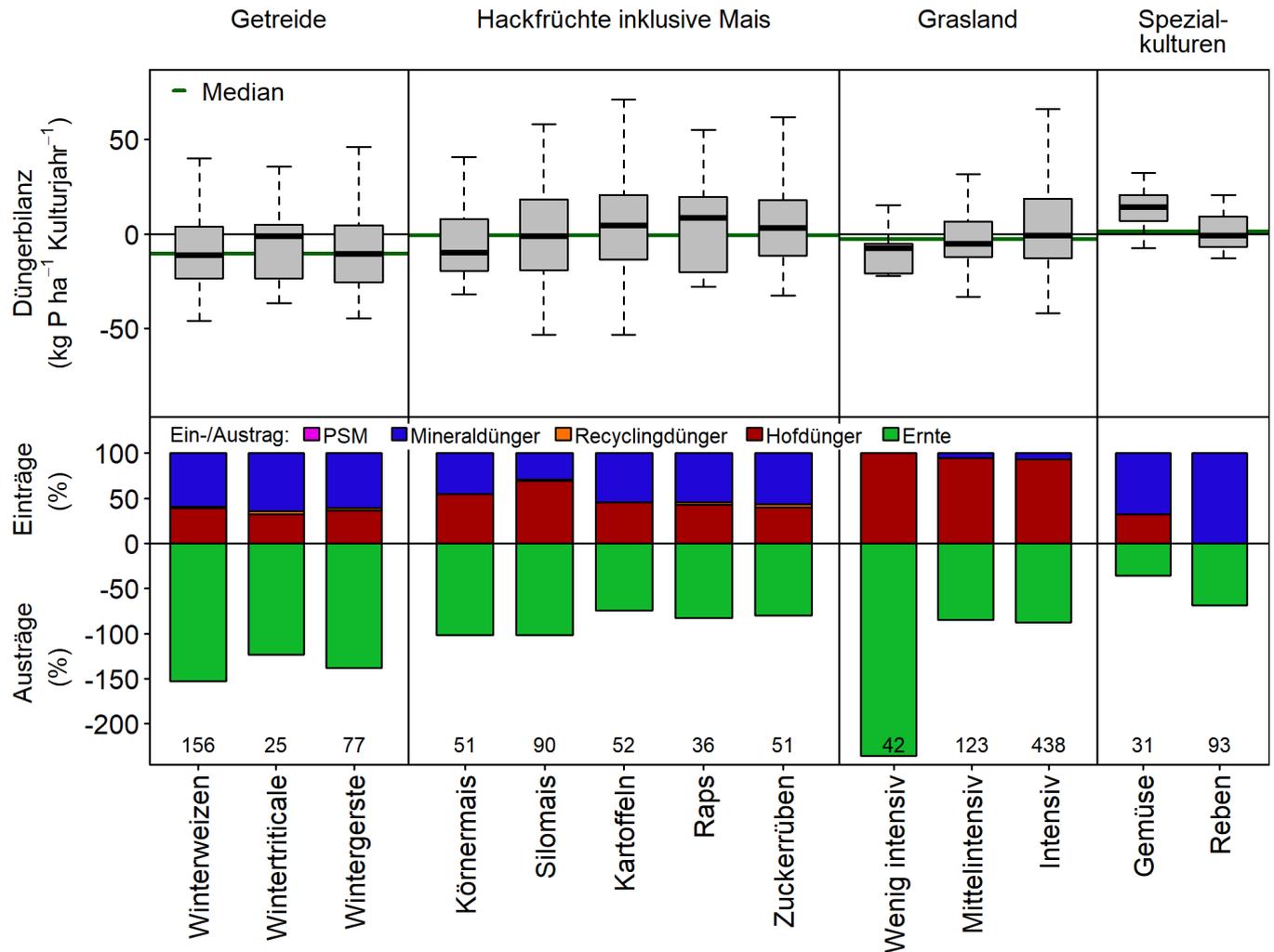


Abbildung 17 Boxplots der P-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.2.3 Kalium (K)

Der Median der K-Düngerbilanzen war ausser auf Grasland auf allen Kulturtypen etwa ausgeglichen (Abbildung 18, oben). Auf Grasland betrug der Median 60 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹.

Auf Grasland wurde K fast ausschliesslich über Hofdünger und im Rebbau fast ausschliesslich über Mineraldünger ausgebracht; auf anderen Kulturen war es meist eine Kombination aus Hofdünger-, Mineraldünger- und teilweise auch Recyclingdüngergaben (Abbildung 18, unten). Durchschnittlich wurden via Hof-, Mineral- und Recyclingdünger rund 87 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ für Getreide, 161 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ für Hackfrüchte und Mais sowie 32 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ für Spezialkulturen eingesetzt. Auf Grasland waren die K-Einträge über Dünger (v.a. Hofdünger) rund 252 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ bei intensiver, 202 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ bei mittelintensiver und 53 kg K ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ bei wenig intensiver Bewirtschaftung.

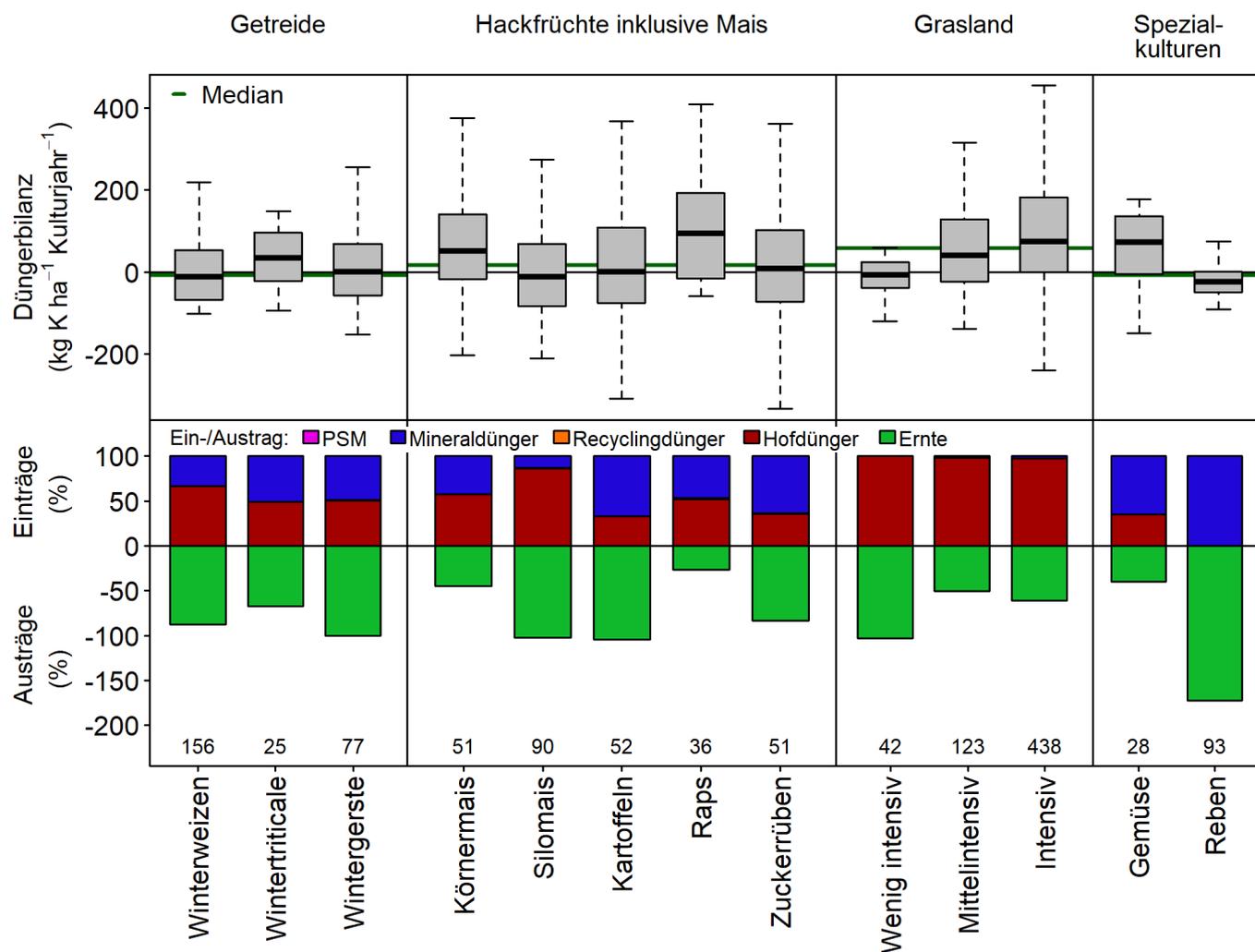


Abbildung 18 Boxplots der K-Düngerbilanzen pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.2.4 Kupfer (Cu)

Der Median der Cu-Nettoflüsse war in etwa ausgeglichen bis leicht positiv bei Getreide, Hackfrüchten inklusive Mais sowie auf wenig intensiv genutztem Grasland. Der Median der Cu-Nettoflüsse war deutlich positiv im Rebbau (rund 2'000 g Cu ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹, Abbildung 19 und Abbildung 20), wo Cu-Einträge fast ausschliesslich aus PSM-Anwendungen stammten (Abbildung 19, unten). Auf intensiv genutztem Grasland war der Median der Cu-Nettoflüsse 80 g Cu ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ und auf mittelintensiv genutztem Grasland etwas tiefer bei 48 g Cu ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹.

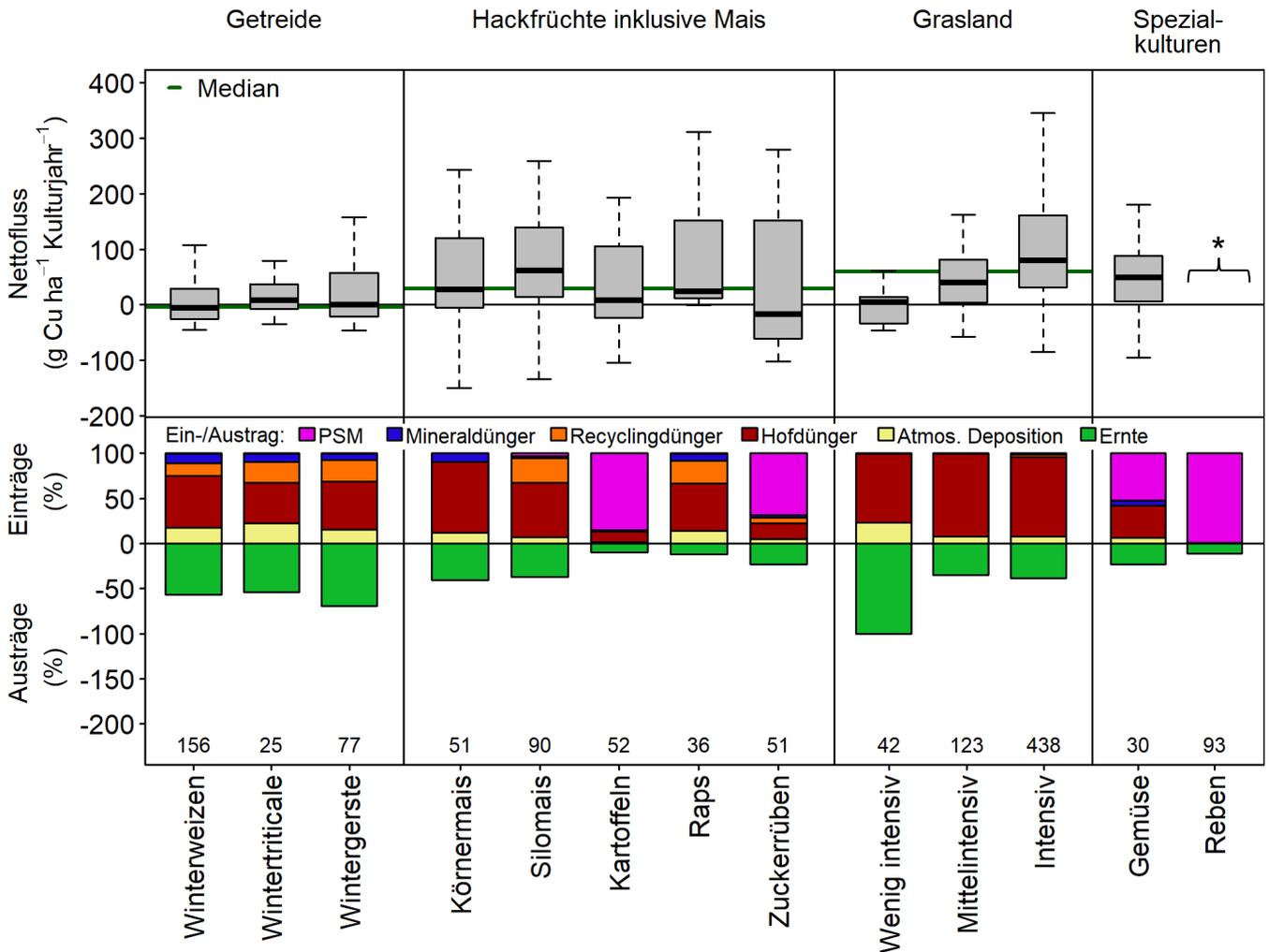


Abbildung 19 Boxplots der Cu-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre; * Rebbau siehe Abbildung 20

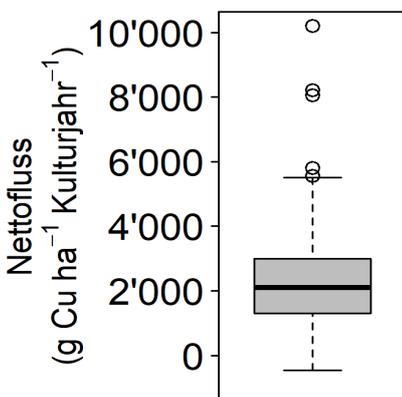


Abbildung 20 Boxplot der Cu-Nettoflüsse im Rebbau

Auf Grasland waren Hofdünger der wichtigste Cu-Eintragspfad, während bei Getreide, Hackfrüchten und Mais Hofdünger, PSM und bis ca. 2006 ausgebrachter Klärschlamm je nach Nutzpflanze wichtig waren (Abbildung 19, unten). Insbesondere bei Kartoffeln und Zuckerrüben waren PSM die wichtigste Cu-Quelle. Bei den Spezialkulturen stammten die Cu-Einträge im Gemüsebau aus Hofdüngern und PSM und im Rebbau fast ausschliesslich aus PSM (Abbildung 19 und Abbildung 20).

3.2.5 Zink (Zn)

Der Median der Zn-Nettoflüsse war leicht negativ bei Getreide ($-73 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$) und leicht positiv bei Hackfrüchten inklusive Mais ($65 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$) und Spezialkulturen ($28 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$, Abbildung 21, oben). Bei Spezialkulturen betrug der Zn-Nettofluss im Gemüsebau $300 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ und $12 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ im Rebbau (Abbildung 21, oben). Die höchsten Zn-Nettoflüsse traten auf intensiv bewirtschaftetem Grasland mit einem Median von $369 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ auf; auf mittelintensiv bewirtschaftetem Grasland war der Median tiefer bei $204 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ Kulturjahr}^{-1}$ und etwa ausgeglichen auf wenig intensiv bewirtschaftetem Grasland.

Ausser bei Spezialkulturen waren Hofdünger, Recyclingdünger und atmosphärische Deposition die wichtigsten Eintragspfad auf den meisten Kulturen (Abbildung 21, unten). Auf Grasland stiegen die Zn-Nettoflüsse mit der Intensität der Bewirtschaftung an und waren durch Hofdüngergaben bedingt (Abbildung 21). Im Rebbau machten PSM-Anwendungen rund 60% der Zn-Einträge aus.

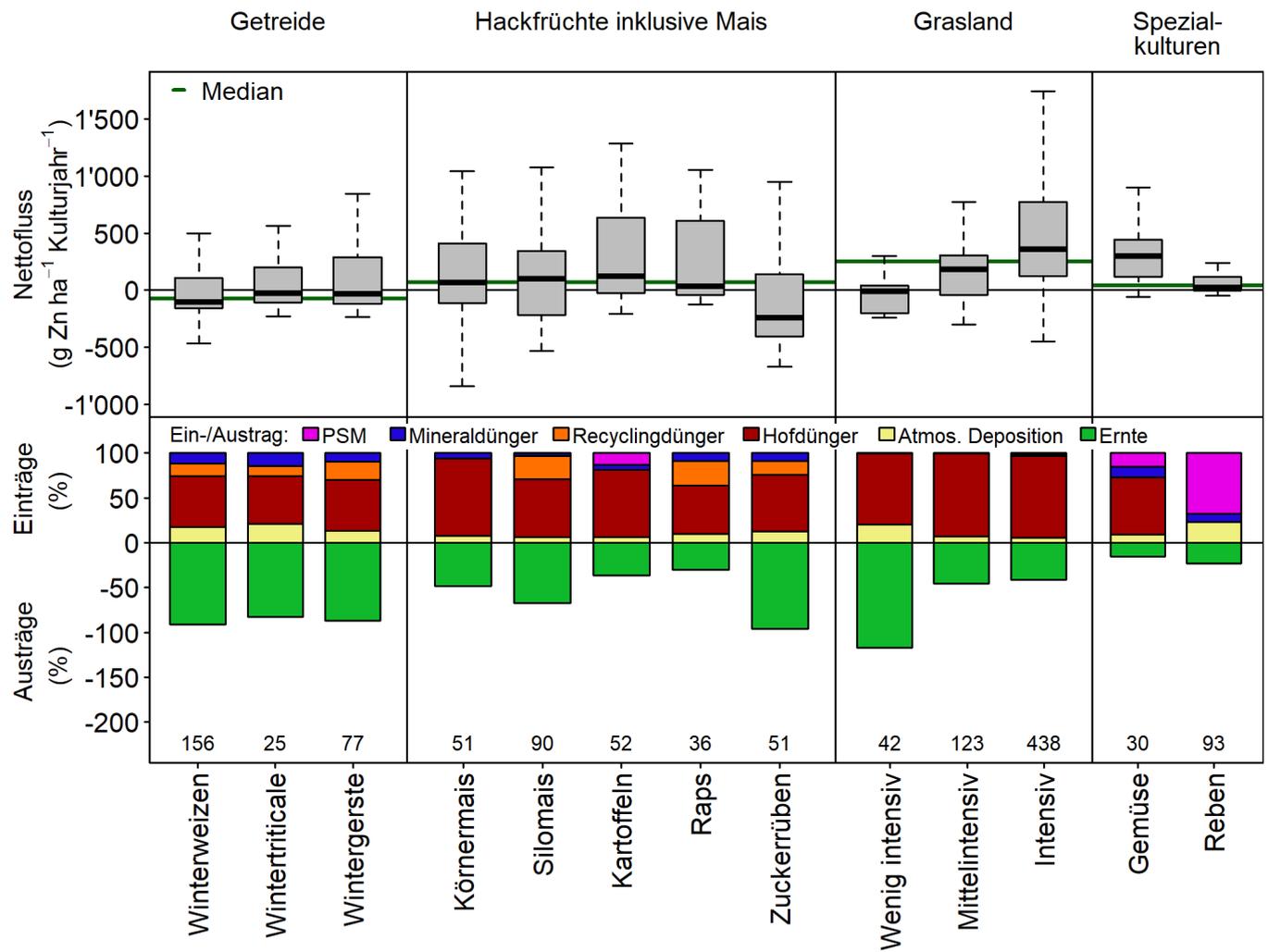


Abbildung 21 Boxplots der Zn-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.2.6 Cadmium (Cd)

Der Median der Cd-Nettoflüsse war bei allen Kulturtypen beinahe ausgeglichen (Abbildung 22, oben). Bei Silomais und Zuckerrüben wiesen die Cd-Nettoflüsse auf Nettoausträge von ca. -2 g Cd ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ hin.

Im Gegensatz zu Cu und Zn stammte Cd bei Getreide, Hackfrüchten und Mais mehrheitlich aus P-haltigen Mineraldüngern (Abbildung 22, unten). Da auf Grasland im Vergleich zu Hofdünger nur geringe Mengen an P-haltigen Mineraldüngern eingesetzt wurden, waren dort Hofdünger die wichtigste Cd-Quelle. Anders als bei Cu und Zn unterschieden sich Cd-Nettoflüsse auf Grasland nur unwesentlich zwischen den Intensitätsstufen der Bewirtschaftung und deren Mediane waren 0.2-1.1 g Cd ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹.

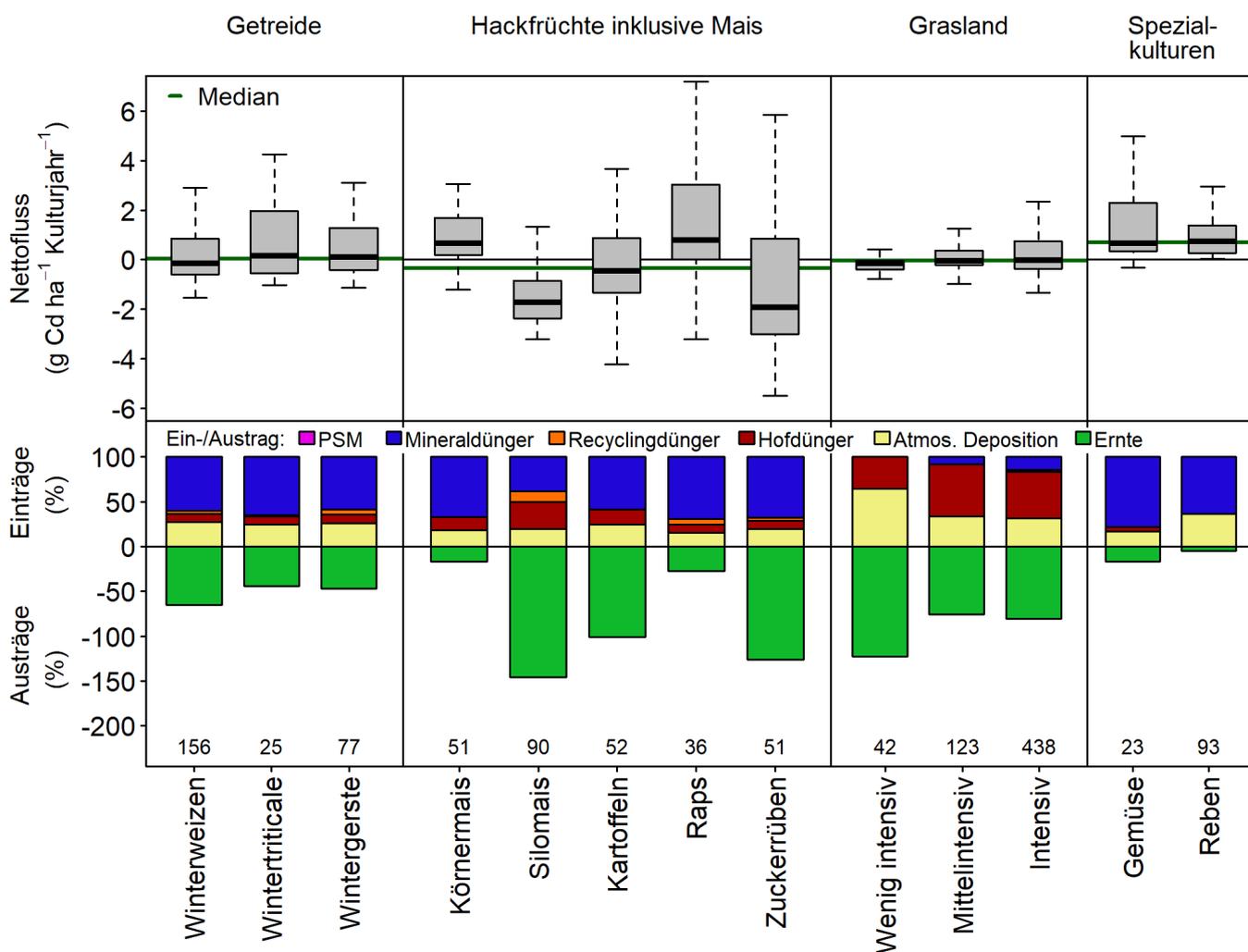


Abbildung 22 Boxplots der Cd-Nettoflüsse pro Kultur und Kulturjahr (oben, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt) und Ein- und Austräge als Prozentwert der Gesamteinträge (unten); Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.2.7 Uran (U)

Bei den U-Bilanzen wurden nur Einträge über P-haltige Mineraldünger berücksichtigt (Abbildung 23), da für Hofdünger bzw. Erntegut nur wenige Konzentrationsdaten existieren und P-haltige Mineraldünger auf landwirtschaftlichen Flächen meist den grössten U-Eintrag darstellen (Bigalke et al. 2020). Auch Hofdünger können im Einzelfall relevant sein, wenn im Verhältnis zu Hofdüngern nur wenig P-haltige Mineraldünger eingesetzt werden (Bigalke et al. 2020). Die vorliegenden Konzentrationsdaten in Hofdüngern sind jedoch für eine Bilanzierung derzeit nicht ausreichend.

Boxplots in Abbildung 23 zeigen, dass 75% der jährlichen U-Einträge auf Getreide, Hackfrüchten inklusive Mais und Spezialkulturen maximal 10-20 g U ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ erreichten (3. Quartil der Boxplots). Im Rapsanbau waren U-Einträge sehr variabel und lagen in 20% der Kulturjahre zwischen 10-50 g U ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ (Extremwerte sind in Abbildung 23 nicht gezeigt). Darüber hinaus kamen jedoch auch Einträge bis ca. 40 g U ha⁻¹ Kulturjahr⁻¹ regelmässig vor, insbesondere bei Kartoffeln und Zuckerrüben (Abbildung 23).

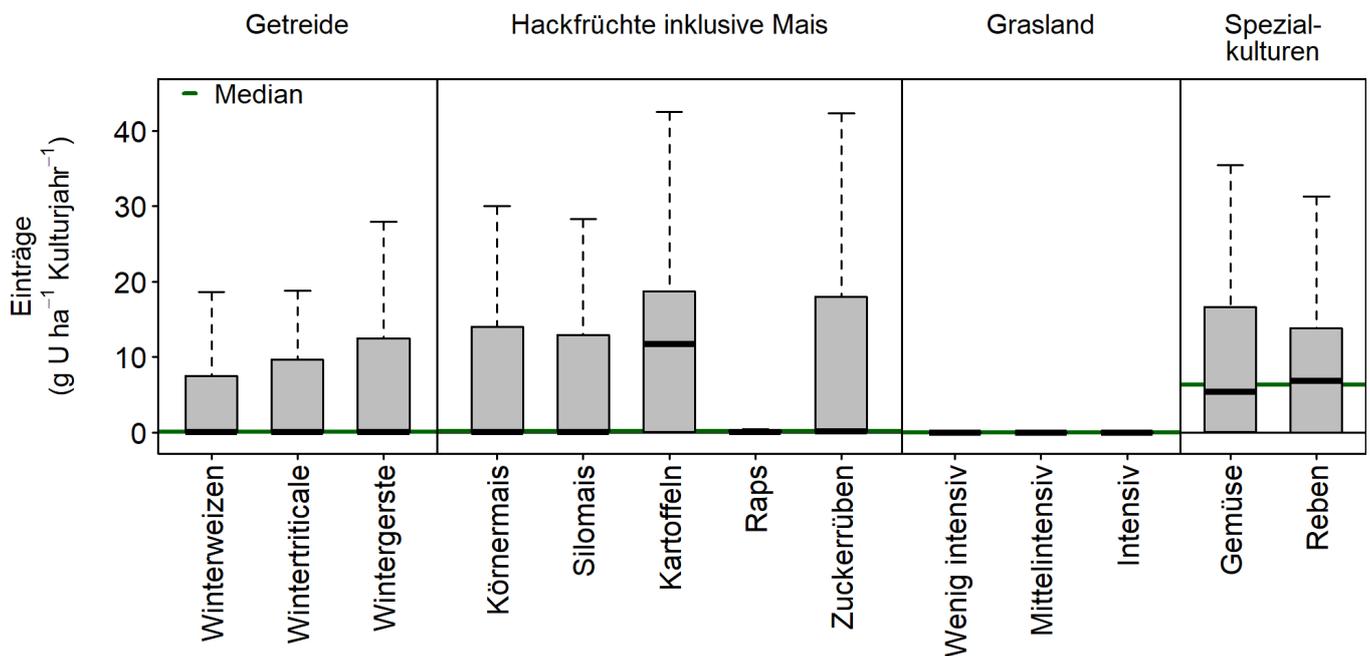


Abbildung 23 Boxplots der U-Einträge über Mineraldünger pro Kultur und Kulturjahr, Extremwerte zur besseren Übersicht nicht dargestellt; Zahl über x-Achse = Anzahl Kulturjahre

3.3 Schwermetallbilanzen und Nährstoffeinträge

3.3.1 Tierdichte auf dem Betrieb

Die N-, P- und K-Düngerbilanzen korrelierten auf Ackerbauparzellen signifikant positiv mit dem Tierbesatz pro Betrieb, ausgedrückt als Dünger-Grossvieheinheit pro LN (DGVE ha⁻¹). Auf Graslandparzellen war diese Korrelation nur für K signifikant (Abbildung 24A-C). Bei den Schwermetallen waren die Cu- und Zn-Nettoflüsse sowohl auf Ackerbau- als auch Graslandparzellen signifikant höher bei grösserem Tierbesatz pro Betrieb (Abbildung 24D-E).

Diese Beobachtungen lassen sich aus unterschiedlichen Hof- und Mineraldüngeranwendungen je nach Tierbesatz erklären (Abbildung 25), da N-, P- und K-Einträge über Hofdünger positiv mit dem Tierbesatz korrelierten (N: R² = 0.46, p < 0.01, P: R² = 0.50, p < 0.01, K: R² = 0.43, p < 0.01) und Hofdünger wichtige Cu- und Zn-Quellen darstellen.

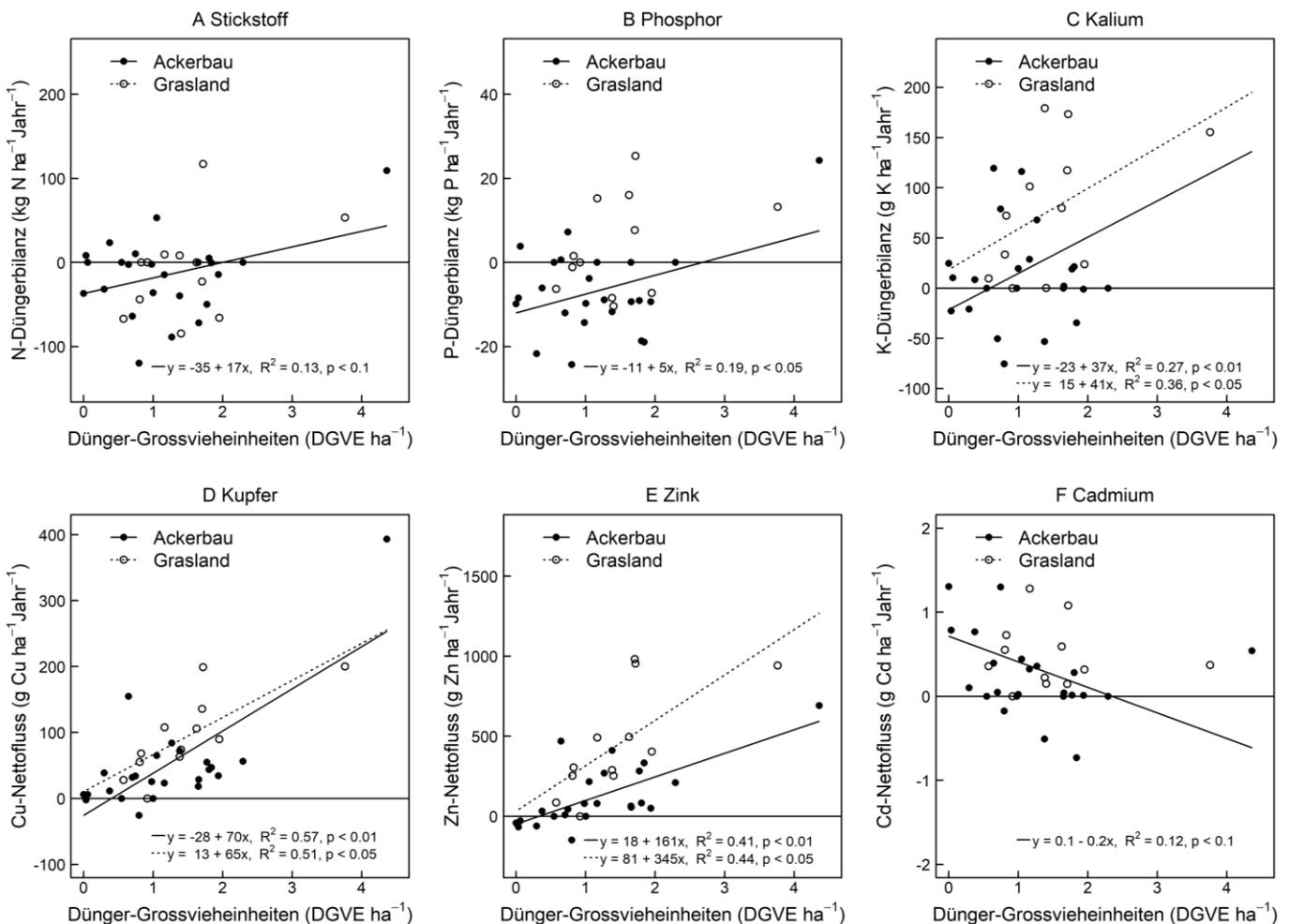


Abbildung 24 N-, P- und K-Düngerbilanzen (A-C) und Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse (D-F) gegenüber Dünger-Grossvieheinheiten pro Betrieb auf Ackerbau- und Graslandparzellen zwischen 1985-2017; Punkte = Mediane der Düngerbilanzen bzw. der Nettoflüsse pro Betrieb von 1985-2017; nur signifikante Korrelationslinien und -statistiken gezeigt

Die Cd-Nettoflüsse waren auf Ackerbauparzellen signifikant geringer bei grösserem Tierbesatz, jedoch war die Korrelation schwächer (R² = 0.12, Abbildung 24F) als bei den Korrelationen der Cu- und Zn-Nettoflüsse (R² zwischen 0.41 und 0.57, Abbildung 24D-E). Auf Graslandparzellen wurde keine signifikante Korrelation zwischen Cd-Nettoflüssen und Tierbesatz festgestellt (Abbildung 24F). N-, P- und K-Einträge über Mineraldünger waren signifikant (aber schwach) negativ mit dem Tierbesatz korreliert (N: R² = 0.18, p < 0.05, P: R² = 0.16, p < 0.05, K: R² = 0.10, p < 0.1).

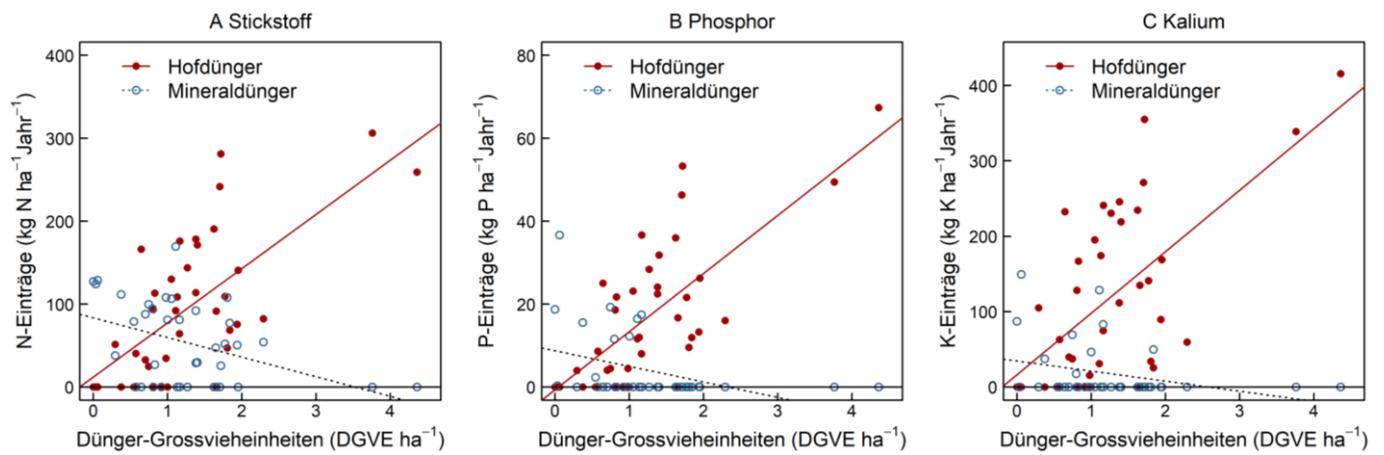


Abbildung 25 N-, P- und K-Einträge (A-C) aus Hof- bzw. Mineraldüngern gegenüber Dünger-Grossvieheinheiten pro Betrieb; Punkte = Einträge bzw. Nettoflüsse pro Parzelle von 1985-2017

3.3.2 Düngung und Schwermetalle

Die Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse waren auf den NABO-Parzellen signifikant positiv mit der P-Düngerbilanz korreliert (Cu: $R^2 = 0.44$, $p < 0.01$; Zn: $R^2 = 0.36$, $p < 0.01$; Cd: $R^2 = 0.19$, $p < 0.05$; Abbildung 26A-C), was den Einfluss der Nährstoffversorgung im Allgemeinen auf die Schwermetall-Nettoflüsse belegt.

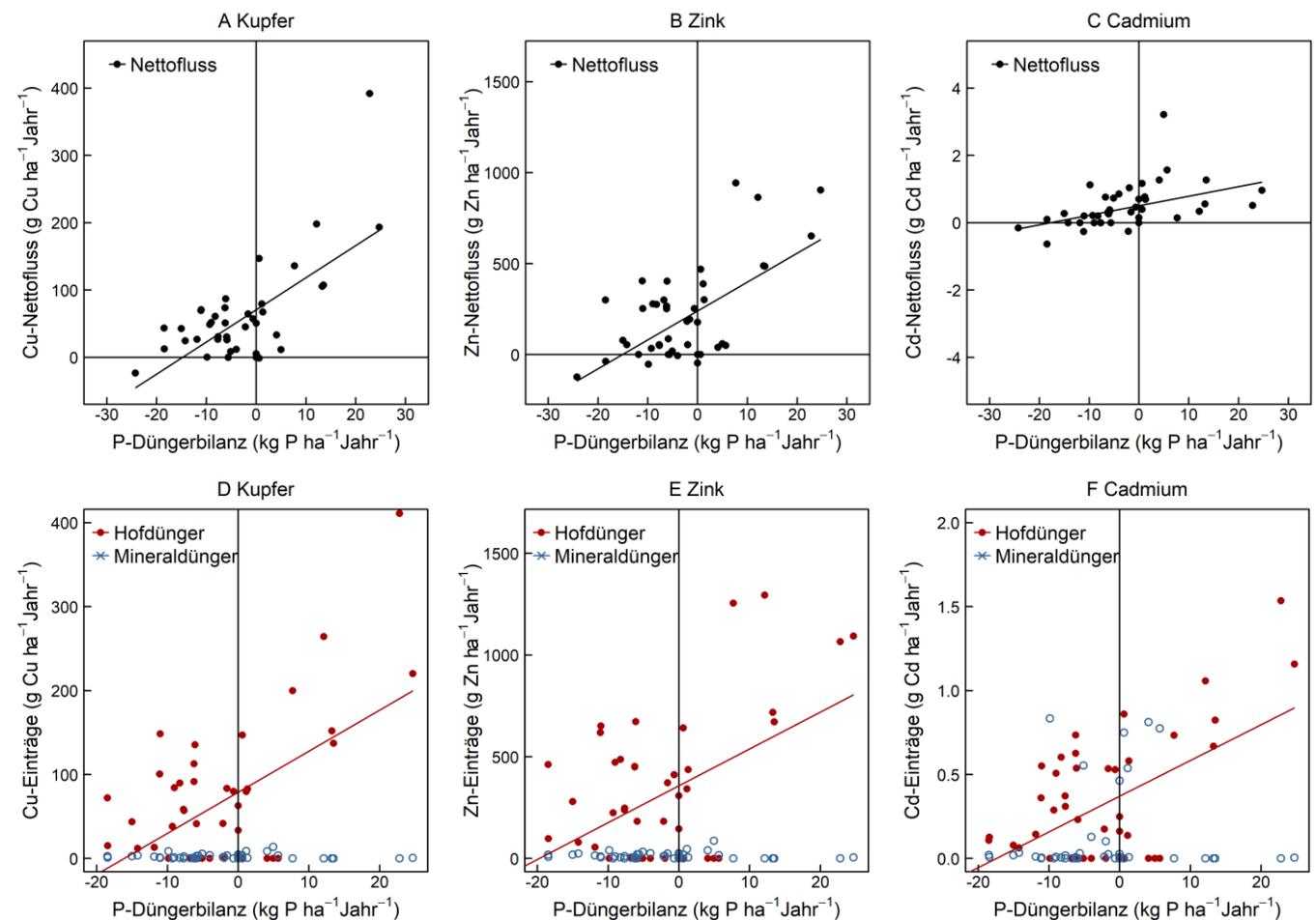


Abbildung 26 Cu-, Zn- und Cd-Einträge via Hof- und Mineraldüngern (A-C) und Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse (D-F) gegenüber P-Düngerbilanzen pro Jahr und Parzelle; Punkte = Mediane der Einträge bzw. Nettoflüsse pro Parzelle von 1985-2017; Rebbauparzellen nicht berücksichtigt

Die gesonderte Betrachtung von Schwermetalleinträgen aus Hof- und Mineraldüngern zeigt, dass Cu-, Zn- und Cd-Einträge aus Hofdüngern signifikant positiv mit der P-Düngerbilanz korreliert waren (Cu: $R^2 = 0.32$, $p < 0.01$; Zn: $R^2 = 0.24$, $p < 0.01$; Cd: $R^2 = 0.31$, $p < 0.01$), jedoch nicht jene Einträge aus Mineraldüngern (Abbildung 26D-F).

3.4 Zeitliche Entwicklung

Um die zeitliche Entwicklung der Schermetallbilanzen zu verfolgen, wurden die jährlichen parzellenbezogenen Schwermetallbilanzen mit den in Deutschland geltenden Grenzfrachten verglichen (vgl. Kapitel 2.4.3). Bedenkliche Cu-, Zn- und Cd-Nettoflüsse (d.h. Nettoflüsse über der Grenzfracht) sind in Abbildung 27 rot gezeichnet; kleinere Nettoflüsse sind in vier Klassen von erhöht (orange) bis gering (dunkelgrün) aufgeteilt. Da für U bisher auch in Deutschland keine Grenzfrachten definiert wurden, dienen die Farben einer Klassifikation grösserer und kleinerer U-Einträge und stellen somit keinen Vergleich mit Grenzfrachten dar. Die Zeitliche Entwicklung wird von 1987-2017 dargestellt, da in den Jahren 1985 und 1986 die Anzahl beobachteter NABO-Parzellen noch wesentlich geringer war als in den Folgejahren.

Während auf mehreren Graslandparzellen von 1987-2017 bedenkliche Cu- und Zn-Nettoflüsse vorkamen, wurden nur auf wenigen Graslandparzellen in einzelnen Jahren bedenkliche Cd-Nettoflüsse und hohe U-Einträge festgestellt (Abbildung 27). Etwa ab dem Jahr 2000 nahm der Anteil an Graslandparzellen mit erhöhten und bedenklichen Cu- und Zn-Nettoflüssen zu. Diese Zunahme folgte dem Verlauf der durchschnittlichen P-Einträge über Hofdünger (Abbildung 28, oben), welcher ab Beginn der 2000er-Jahre auf den beobachteten Graslandparzellen anstieg. Der Anstieg von P-Einträgen betraf sieben mittelintensiv bis intensiv bewirtschaftete Graslandparzellen, auf den übrigen Graslandparzellen wurden keine Trends festgestellt (Daten einzelner Parzellen nicht gezeigt). Es wurde bereits in Kapitel 3.3.2 gezeigt, dass Hofdüngergaben für Cu- und Zn-Einträge auf Grasland entscheidend sind. Auf einzelnen Parzellen spielte auch eine Veränderung der Zusammensetzung der Tierarten (z.B. Rinder- oder Geflügelmist) eine Rolle, so beispielsweise auf Parzelle B014, auf der ab dem Jahr 2004 neben Rindergülle und -mist neu auch Schweinegülle und ab dem Jahr 2013 zusätzlich Geflügelmist ausgebracht wurden. Schweinegülle und Geflügelmist enthalten im Vergleich zu Rindergülle höhere Cu- und Zn-Konzentrationen (siehe Tabelle A5, Anhang 3). Neben Veränderungen der Hofdüngergaben und deren Zusammensetzung führte auch die Verwendung von betriebsspezifischen Konzentrationsdaten aus Hofdünger-Beprobungen (seit 2004) zu einem methodisch bedingten Anstieg der Cu- und Zn-Nettoflüsse vom Jahr 2003 zum Jahr 2004 auf zwei Graslandparzellen (B077 und B116). Die P-Mineraldüngergaben (welche wichtige Cd- und U-Quellen sind) blieben auf Graslandparzellen über den gesamten Zeitraum etwa konstant und waren im Vergleich zu den Hofdüngergaben klein (Abbildung 28, oben).

Auf Ackerbauparzellen waren Cu- und Zn-Nettoflüsse im Vergleich zu Graslandparzellen weniger häufig in einem erhöhten oder bedenklichen Bereich (Abbildung 27). Cd-Nettoflüsse waren Ende der 1980er-Jahre auf rund 40% der Ackerbauparzellen erhöht oder bedenklich. Dieser Anteil ging danach bis 1991 auf unter 20% der Ackerbauparzellen zurück und bewegte sich seither zwischen 10% und 20% der Ackerbauparzellen (Abbildung 27). Der Anteil Ackerbauparzellen mit vergleichsweise hohen U-Einträgen durch Mineraldünger nahm von ca. 80% der Ackerbauparzellen im Jahr 1988 auf 20-35% zu Beginn der 2000er-Jahre ab und blieb seither in diesem Bereich. Die Cd- und U-Verläufe gingen mit einer Abnahme von P-Mineraldüngergaben auf den 27 berücksichtigten Ackerbauparzellen gegen Ende der 1980er einher (Abbildung 28, Mitte).

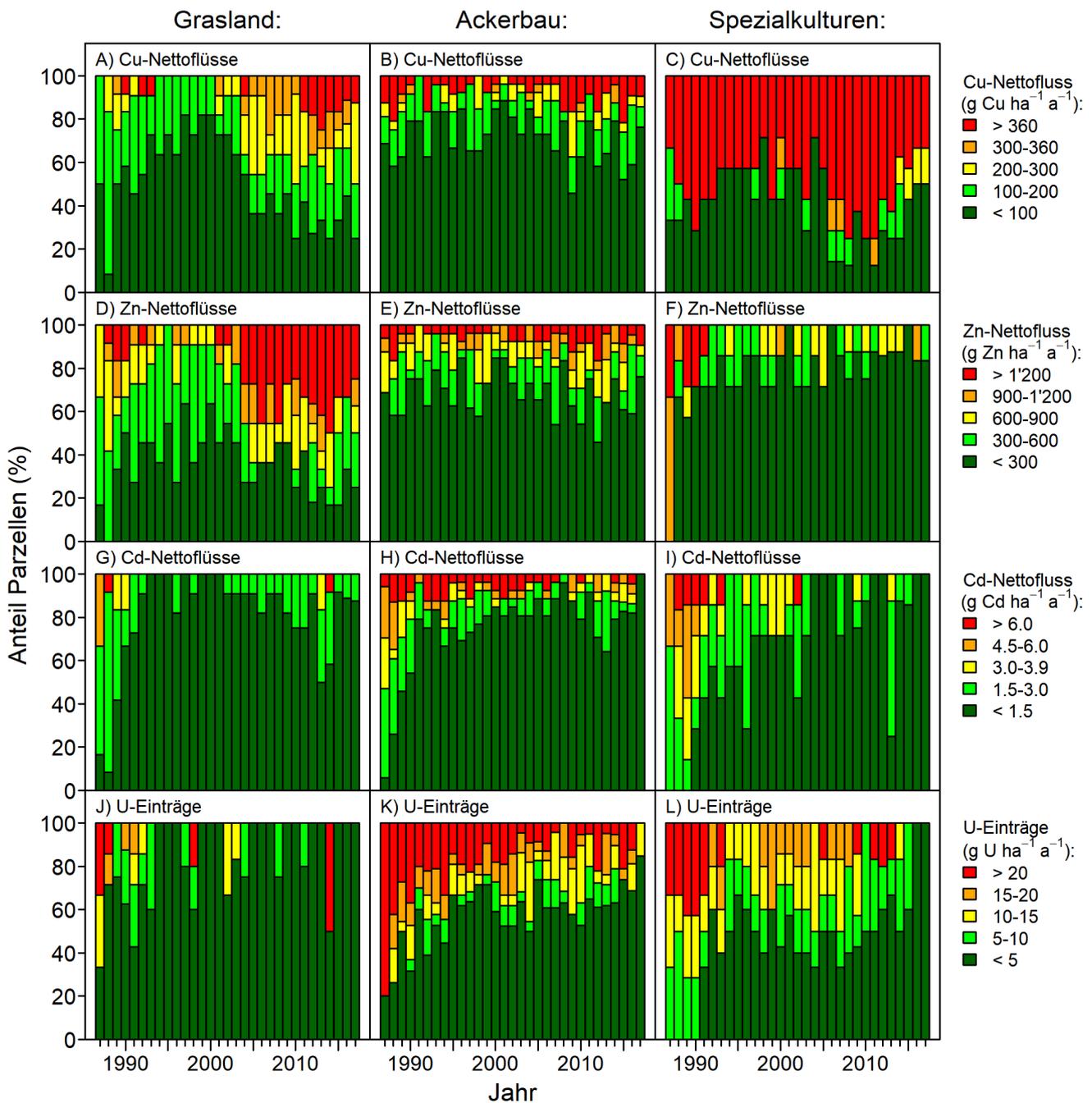


Abbildung 27 Anteil der Parzellen (%) pro Kategorie für Nettoflüsse (Cu: A-C, Zn: D-F und Cd: G-I) bzw. für Einträge über Mineraldünger (U: J-L) auf Grasland- (links, 10-12 Parzellen), Ackerbau- (Mitte, 22-26 Parzellen) und Spezialkulturparzellen (rechts, 7-8 Parzellen) von 1987-2017

Auf Spezialkulturparzellen waren Cu-Nettoflüsse aufgrund von PSM-Gaben besonders hoch (Abbildung 27), was insbesondere auf Rebbauparzellen zutraf, wie in vorherigen Kapiteln erläutert wurde. Bei Spezialkulturen nahm der Anteil an Parzellen mit erhöhten oder bedenklichen Cu-Nettoflüssen über den Beobachtungszeitraum nicht ab. U-Einträge über Mineraldünger waren bis Anfang der 1990er-Jahre auf rund 40% der Spezialkulturparzellen in einem vergleichsweise hohen Bereich. Danach nahm der Anteil Spezialkulturparzellen mit vergleichsweise hohen U-Einträgen ab und bewegte sich in den meisten Jahren zwischen 0-20%, was den Verlauf der durchschnittlichen P-Mineraldüngergaben widerspiegelt (Abbildung 28, unten).

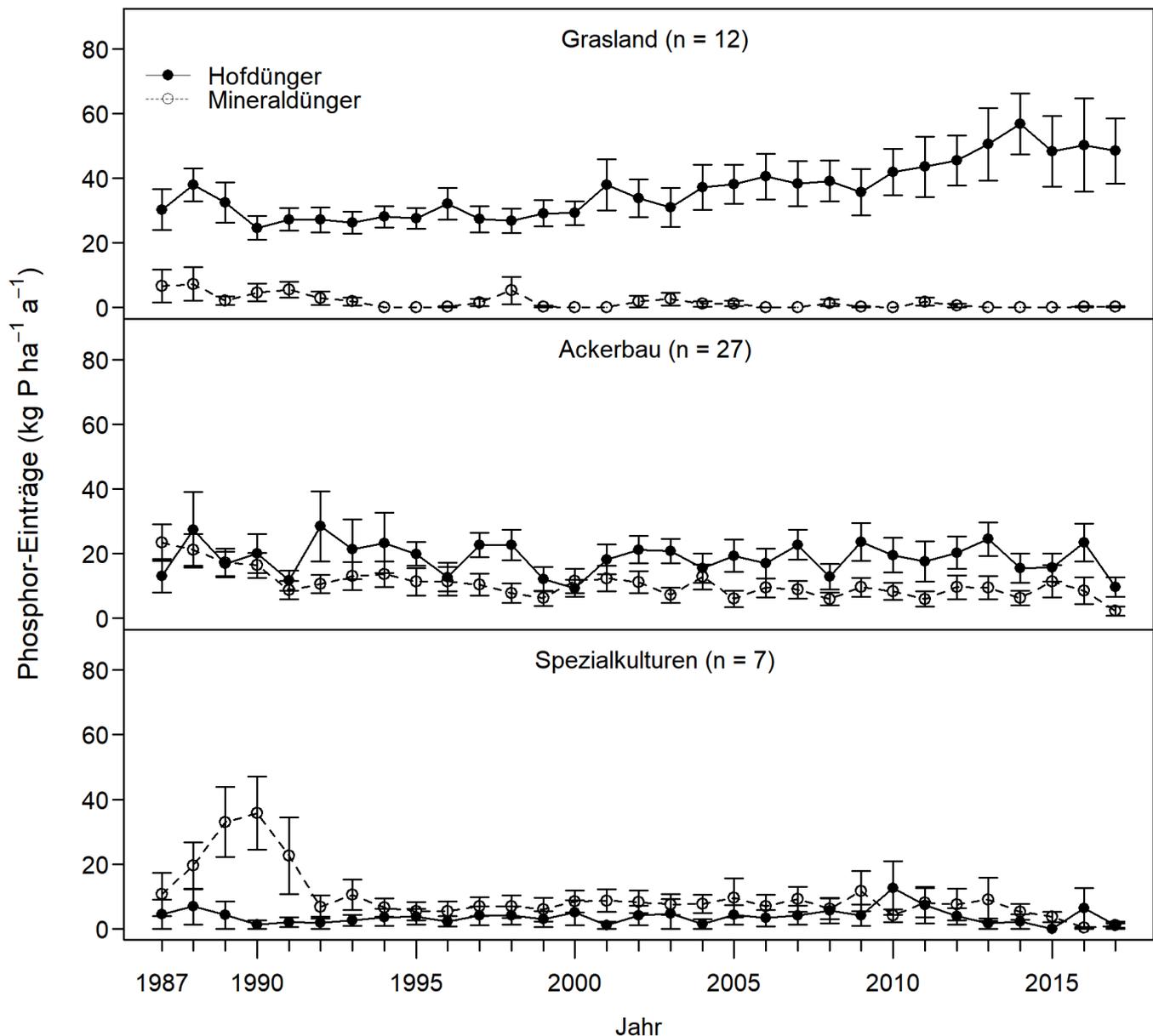


Abbildung 28 P-Einträge über Hof- und Mineraldünger auf Grasland- (oben), Ackerbau- (Mitte) und Spezialkulturparzellen (unten); Mittelwerte \pm Standardfehler

3.5 Abschätzung der Schwermetall-Akkumulation im Oberboden

Um eine mögliche Stoffanreicherung im Oberboden (0-0.2 m) abschätzen zu können, wurden die Schwermetall-Nettoflüsse mithilfe des im direkten Monitoring gemessenen Raumgewichts der Feinerde in theoretische Akkumulationsraten pro Jahrzehnt umgerechnet. Diese theoretischen Akkumulationsraten pro Jahrzehnt lagen auf 11 (Cu), 13 (Zn) bzw. zwei (Cd) der 46 Parzellen bei $> 1\%$ des jeweiligen Richtwertes gemäss VBo (1998) und auf drei Rebbauparzellen bei $> 5\%$ des Richtwertes für Cu (Abbildung 29).

Für Cu waren die theoretischen Akkumulationsraten pro Jahrzehnt insbesondere auf Rebbauparzellen sehr hoch. Drei Rebbauparzellen wiesen theoretische Akkumulationsraten von 8.8-14.1 mg Cu kg⁻¹ im Oberboden auf, was über ein Jahrzehnt 20-35% des Richtwertes entspricht. Die theoretischen Cu-Akkumulationsraten von acht weiteren Parzellen lagen zwischen 1% und 5% des Richtwertes, wobei es sich um sechs intensiv bewirtschaftete Graslandparzellen und zwei Ackerbauparzellen handelte (Abbildung 29).

Für Zn lagen die theoretischen Akkumulationsraten pro Jahrzehnt auf acht Graslandparzellen (sieben davon intensiv bewirtschaftet), drei Ackerbauparzellen sowie einer Gemüse- und einer Rebbauparzelle zwischen 1% und 5% des Richtwerts (Abbildung 29).

Für Cd wiesen jeweils eine Ackerbau- und eine Rebbauparzelle eine theoretische Akkumulationsrate pro Jahrzehnt von > 1% des Richtwerts gemäss VBBo auf (Abbildung 29). Für U lagen theoretische Akkumulationsraten pro Jahrzehnt auf fünf Parzellen zwischen 0.05-0.16 mg U kg⁻¹, diejenigen der übrigen Parzellen darunter (Abbildung 29). Bisher sind in der VBBo keine Richtwerte für U definiert.

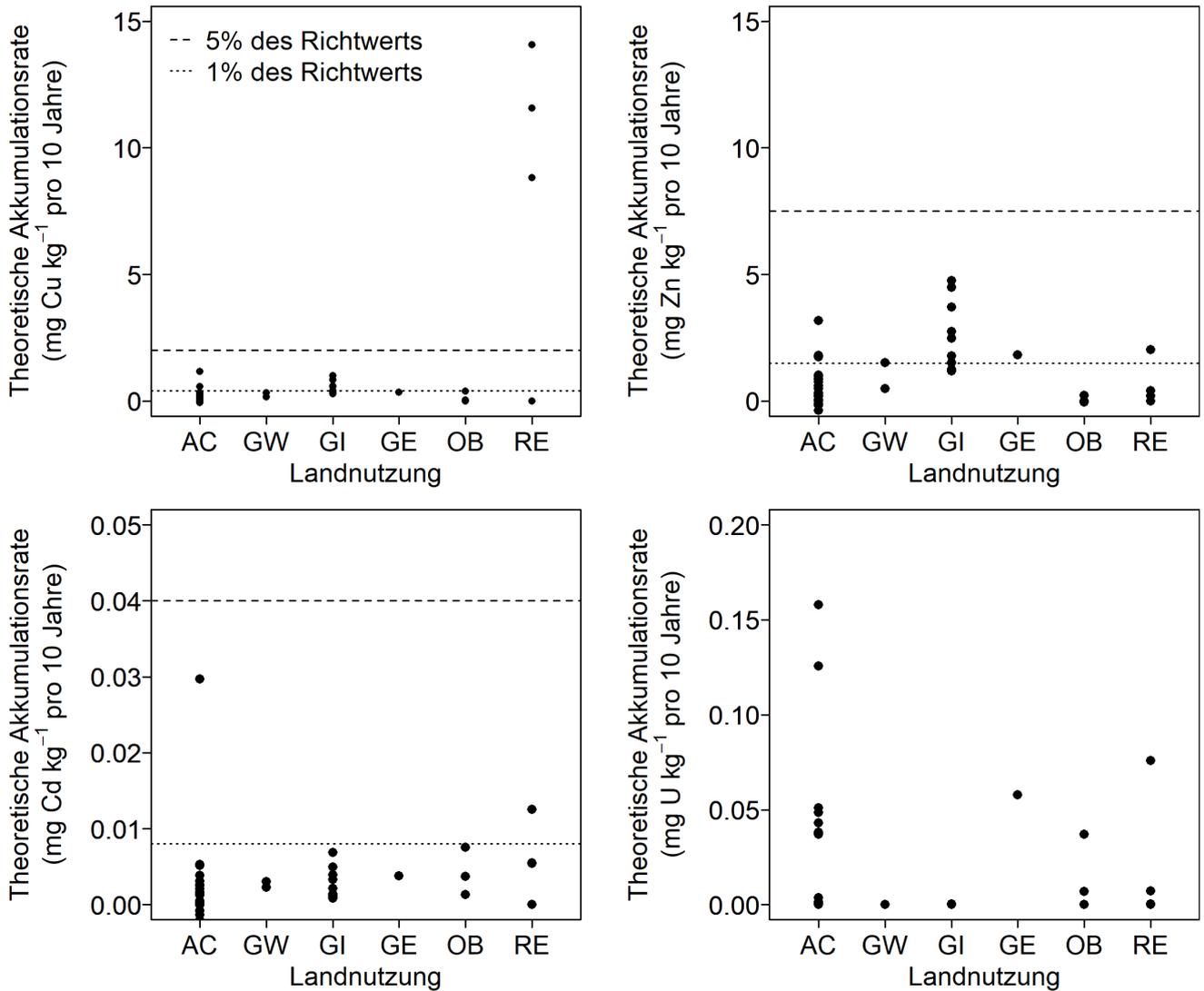


Abbildung 29 Stoffbilanzen transformiert in theoretische Akkumulationsraten im Oberboden (0-0.2 m) der NABO-Parzellen pro Jahrzehnt für Cu, Zn, Cd und U; AC = Ackerbau, GW = Grasland, wenig bis mittel intensiv bewirtschaftet, GI = Grasland, intensiv bewirtschaftet, GE = Gemüsebau, OB = Obstbau und RE = Rebbau

4 Diskussion

4.1 Relevanz für die Bodengesundheit

Im vorliegenden Bericht wurde die Relevanz der Stoffbilanzen für die Bodengesundheit zum einen durch Vergleiche mit den in Deutschland geltenden Grenzfrachten (BBodSchV 1999, vgl. Kapitel 3.4) und zum anderen durch die Berechnung theoretischer Akkumulationsraten (vgl. Kapitel 3.5) abgeschätzt. Es existieren verschiedene weitere Ansätze, um langfristige Einflüsse von Schwermetalleinträgen auf die Bodenfruchtbarkeit und die Umwelt zu ermitteln. Beispielsweise wird das Konzept kritischer Einträge in Ökosysteme (*"critical loads"*) eingesetzt, um mithilfe von Nettoflüssen, Bodenparametern und toxikologischen Kennwerten ökologische Effekte von Nährstoff- und Schwermetalleinträgen zu modellieren und zu beurteilen (Kecerdasan et al. 2007, Rihm und Achermann 2016). Diese Beurteilungsmethode erfordert eine grosse Anzahl von Bodenmesswerten und die hier vorliegenden Nettoflüsse stellen in Kombination mit weiteren Daten eine mögliche Grundlage für künftige Studien dar.

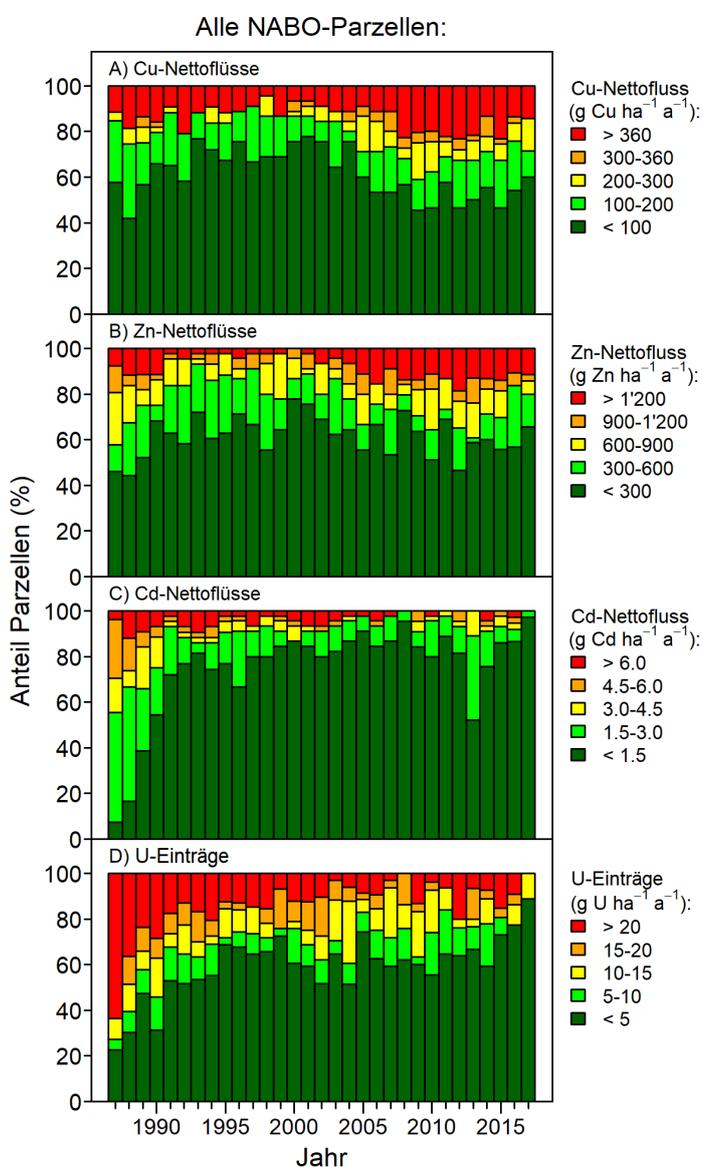


Abbildung 30 Anteil der Parzellen (%) pro Kategorie für Nettoflüsse (Cu, Zn und Cd) bzw. für Einträge über Mineraldünger (U) auf allen NABO-Parzellen (n = 39-46) von 1987-2017

Der Vergleich der Schwermetall-Nettoflüsse mit den Grenzfrachten zeigt, dass im Beobachtungszeitraum etwa 10-30% der NABO-Parzellen erhöhte bis bedenkliche Cu- und Zn-Nettoflüsse aufwiesen (Abbildung 27 und Abbildung 30, orange und rote Farbe). Der Anteil an Parzellen mit erhöhten bis bedenklichen Cu- und Zn-Nettoflüssen nahm über die Zeit nicht ab; während der 2000er-Jahre ist für Graslandparzellen sogar eine Zunahme festzustellen. Diese Zunahme ist einerseits auf eine vermehrte Hofdüngerausbringung auf sieben Graslandparzellen und andererseits auf verbesserte Grundlagendaten zu Schwermetallkonzentrationswerten in Hofdüngern aus Beprobungen ab dem Jahr 2004 zurückzuführen (vgl. Kapitel 3.4, Abbildung 28). Mögliche Gründe für eine vermehrte Hofdüngerausbringung sind u.a. Betriebserweiterungen, eine Intensivierung der Tierhaltung und neue Betriebszweige. So hat auf vier der sieben Graslandparzellen mit vermehrter Hofdüngerausbringung gleichzeitig der Tierbesatz pro landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) auf dem jeweiligen Betrieb zugenommen, was aufgrund der positiven Korrelation zwischen Tierbesatz pro LN und Nährstoffeintrag via Hofdünger zu erwarten ist (vgl. Kapitel 3.3.1). Auf einer der Parzellen hat sich zudem die Zusammensetzung der ausgebrachten Hofdünger verändert, da auf dem entsprechenden Betrieb neben Rindergülle und -mist aufgrund betrieblicher Veränderungen ab 2013 neu auch P-, Cu- und Zn-reichere Schweine- und Geflügelgülle anfiel (typische Konzentrationswerte siehe Tabelle A5).

Für Cd wiesen im Beobachtungszeitraum bis zu 30% der NABO-Parzellen erhöhte bis bedenkliche Nettoflüsse auf (Abbildung 27 und Abbildung 30, orange und rote Farbe). Im Gegensatz zu Cu und Zn ging der Anteil an Parzellen mit erhöhten bis bedenklichen

Cd-Nettoflüssen von Ende der 1980er- bis zur Mitte der 1990er-Jahre stark zurück (Abbildung 27 und Abbildung 30, orange-rote Farbe), was auf geringere Cd-Einträge durch verminderten P-Mineraldüngereinsatz im Ackerbau sowie abnehmende atmosphärische Deposition zurückzuführen ist (Abbildung 27 und Abbildung 28). Der verminderte P-Mineraldüngereinsatz dürfte eine Folge der Umstellung vieler NABO-Betriebe von konventioneller zu integrierter Produktion (IP) im gleichen Zeitraum sein (vgl. Kapitel 2.3.2, Abbildung 3). Die Cd-Nettoflüsse waren auf vielen NABO-Parzellen beinahe ausgeglichen. Auch eine Studie in 27 Ländern der EU fand mehrheitlich ausgeglichene Cd-Bilanzen und die Autoren halten eine mittelfristigen Abreicherung von Cd in Böden für möglich (Six und Smolders 2014). Trotzdem sollten zusätzliche Einträge über Mineraldünger besonders an Standorten mit hoher geogener Cd-Belastung möglichst klein gehalten werden.

Der Vergleich mit Grenzfrachten ermöglicht eine Einordnung der Grössenordnung der Nettoflüsse, ist jedoch nicht hinreichend, um die langfristigen Auswirkungen auf Schwermetallkonzentrationen im Boden abzuschätzen. Zu diesem Zweck können theoretische Akkumulationsraten pro Jahrzehnt herangezogen und mit den entsprechenden Richtwerten für Schwermetalle im Boden verglichen werden (VBBö 1998, Keller et al. 2005). Die Betrachtung über ein Jahrzehnt ermöglicht eine erste Einschätzung bezüglich der langfristigen Stoffanreicherung im Oberboden. Erhöhte theoretische Cu- und Zn-Akkumulationsraten wurden v.a. an intensiv bewirtschafteten Graslandstandorten und zwei Ackerbaustandorten bedingt durch Hofdüngerausbringung festgestellt. Im Rebbau wurden aufgrund von PSM-Anwendungen die höchsten theoretischen Akkumulationsraten für Cu gefunden (Abbildung 29). Sowohl der Vergleich mit der Grenzfracht (Abbildung 27) als auch die theoretische Akkumulationsrate (Abbildung 29) deuten darauf hin, dass auf Rebbauparzellen weitere deutliche Zunahmen vom Cu im Oberboden zu erwarten sind.

Die Erkenntnisse aus Nettoflüssen und theoretischen Akkumulationsraten werden durch Bodenmessdaten im NABO-Messnetz bestätigt. Seit Beginn der Zeitreihen wurden relevante Zunahmen an verschiedenen NABO-Standorten hauptsächlich für Cu und Zn beobachtet, jedoch kaum für Cd (Gubler et al. 2015a). U wurde im Monitoring der NABO bislang nicht regelmässig untersucht. Eine gezielte einmalige Untersuchung ausgewählter NABO-Standorte mit hohen P-Mineraldüngergaben zeigte jedoch deutliche Zunahmen sowohl für Cd und U auf rund der Hälfte der Standorte (Bigalke et al. 2016). Zunahmen von Cu und Zn im Oberboden wurden auf intensiv genutzten Graslandparzellen, einigen Ackerbauparzellen sowie auf Spezialkulturen – für Cu insbesondere Rebbauparzellen – beobachtet (Gubler et al. 2015a). Währendem Grasland- und Ackerbaustandorte trotz teilweise kontinuierlicher Zunahmen bisher zumeist Gehalte unterhalb des VBBö-Richtwerts aufweisen, liegen die Gehalte von drei Rebbaustandorten deutlich über dem Richtwert im Bereich von 200 bis 400 mg Cu kg⁻¹ Feinerde im Oberboden (Gubler et al. 2015a). Diese Belastungen sind teilweise historisch, teilweise neueren Datums. Des Weiteren liegen auch Standorte mit Gemüse- und Obstbau teilweise über dem Cu-Richtwert.

Insgesamt weisen die Resultate auf eine weitere Cu- und Zn-Anreicherung bei grossem Hofdüngereinsatz (intensiv genutztes Grasland und teilweise Ackerbau) und/oder regelmässigen PSM-Anwendungen gegen Pilzbefall (Rebbau und Obstbau) hin. Da der Hofdüngeranfall positiv mit der Anzahl Nutztiere pro LN korreliert (Abbildung 24), ist insbesondere bei Parzellen von Betrieben mit Fokus auf Tierhaltung (Kombiniert Veredlung, Kombiniert Milchkühe/Ackerbau, Rindvieh) eine standort- und kulturangepasste Bewirtschaftung zur nachhaltigen Schliessung von Stoffkreisläufen auf betrieblicher sowie auf regionaler Ebene wichtig. Auf betrieblicher Ebene zeigt die langjährige Erfahrung der NABO beispielsweise, dass Hofdünger oft intensiver eingesetzt werden auf Parzellen in der Nähe von Ställen als auf weiter entfernten Parzellen (dies lässt sich jedoch nicht aus den in diesem Bericht vorgestellten Daten belegen). Dies ist nachvollziehbar aus logistischen Gründen, kann jedoch im Einzelfall zu ungewollten stofflichen Belastungen auf einzelnen Parzellen führen. Auf höherer geografischer Ebene können Ergebnisse dieses Berichts mit weiteren Daten kombiniert werden, um mittels Modellen Stoffbilanzen in Einzugsgebieten oder anderen regionalen Dimensionen zu berechnen (vgl. Della Peruta et al. 2014).

4.2 Schwermetalle im Kontext der Nährstoffversorgung und Pflanzengesundheit

Hofdünger-Beprobungen der NABO in den Jahren 2006 und 2018 zeigen, dass Cu- und Zn-Konzentrationen in einigen Fällen geltende Grenzwerte überschreiten und in vielen Fällen nahe am Grenzwert der ChemRRV (2005)

liegen (Tabelle 5 und Tabelle 8). Da grosse Mengen Hofdünger ausgebracht werden, stellen diese auf vielen Parzellen den Haupteintragspfad für Cu und Zn dar. Insbesondere auf intensiv genutztem Grasland decken Hofdünger einen Grossteil des Nährstoffbedarfs (Abbildung 16 - Abbildung 18), was sich mit Erkenntnissen einer Studie zu N-Bilanzen in der Schweiz deckt (Bosshard und Richner 2013). Cu in Hofdüngern ist gemäss einer Studie aus Deutschland v.a. auf Futterzusätze zurückzuführen, welche nur zu einem geringen Teil (meist < 5% der aufgenommenen Menge) vom Organismus absorbiert werden und zu einem grossen Teil über Exkrememente ausgeschieden werden (Schultheiss et al. 2004). Cu und Zn sind essenzielle Mikronährstoffe und müssen als solche über das Futter in ausreichender Menge aufgenommen werden (Schlegel 2011). Die maximal zulässigen Cu- und Zn-Konzentrationen in Futtermitteln sind in der Futtermittelbuch-Verordnung (FMBV 2011) geregelt und Fütterungsempfehlungen für Nutztiere werden in durch Agroscope im "Grünen Buch" für Wiederkäuer (Agroscope 2016a) und im "Gelben Buch" für Schweine (Agroscope 2016b) herausgegeben. Obwohl Vorgaben über maximal zulässige Cu- und Zn-Konzentrationen in Futtermitteln in der Vergangenheit mehrfach verschärft wurden, zeigen hier berechnete Nettoflüsse keine Abnahme auf Grasland, was auf die Kombination ausgebrachter Mengen Hofdünger mit hohen Cu- und Zn-Konzentrationen zurückzuführen ist.

Während Cu-Einträge auf Grasland und im Ackerbau in der Regel auf Hofdüngereinträge zurückzuführen sind, so gehen diese auf Spezialkulturen und insbesondere im Rebbau hauptsächlich auf PSM-Anwendungen zurück. Cu-Anwendungen sind zwar auf den meisten Kulturen auf 4 kg Cu ha⁻¹ a⁻¹ und im Rebbau auf 6 kg Cu ha⁻¹ a⁻¹ begrenzt (Speiser et al. 2015), trotzdem ist basierend auf den hier berechneten Nettoflüssen von einer weiteren Cu-Anreicherung im Oberboden auszugehen. Es existieren verschiedene Ansätze, um Cu-Anwendungen zu reduzieren, u.a. durch den Anbau widerstandsfähigerer Sorten, Anpassungen in der Fruchtfolge und Entwicklung alternativer Produkte (Speiser et al. 2015). Wenngleich Cu-Anwendungen derzeit nicht ganz vermieden werden können, scheint ein noch stärkeres Verfolgen dieser Ansätze zur Reduktion von Cu-Einträgen angezeigt.

Im Gegensatz zu Cu- und Zn-Nettoflüssen sind Cd-Nettoflüsse hauptsächlich durch P-haltige Mineraldünger, atmosphärische Deposition und Klärschlammasbringung bis 2006 bedingt (Abbildung 13). Mineraldüngeranwendungen sind v.a. im Ackerbau und auf Spezialkulturen relevant, wo oft über 50% der P-Versorgung durch diese bereitgestellt werden (Abbildung 6). Cd-Belastungen in Mineraldüngern sind bereits seit den 1980er-Jahren bekannt (Boysen 1992, Wilcke und Döhler 1995) und eine Marktkampagne des BLW zeigte, dass rund 35% beprobter P-haltiger Mineraldünger den Cd-Grenzwert von 50 mg Cd pro kg P (ChemRRV 2005) überschritt (BLW 2012). Diese Befunde legen nahe, dass eine verbesserte Durchsetzung der Cd-Grenzwerte in Mineraldüngern und eine breitere Datenbasis der Cd-Gehalte in Mineraldüngern (spezifisch für einzelne Produkte) nötig ist, um einer möglichen Akkumulation im Boden vorzubeugen und durch eine verbesserte Datenbasis die Genauigkeit von Stoffbilanzen weiter zu verbessern.

Tabelle 8 Schwermetall-Grenzwerte in organischen Düngern, Recyclingdüngern (ausgenommen mineralische Recyclingdünger) und Hofdüngern gemäss ChemRRV (2005)

Substanz	Grenzwert (g t _{TS} ⁻¹)
Kupfer (Cu) ^A	100
Zink (Zn) ^B	400
Cadmium (Cd)	1
Uran (U)	Derzeit kein Grenzwert definiert

^A Bei einem Anteil von > 50% TS in Exkrementen von Schweinen: 150 g Cu t_{TS}⁻¹

^B Bei einem Anteil von > 50% TS in Exkrementen von Schweinen: 600 g Zn t_{TS}⁻¹

Im Vergleich zu Cd sind Belastungen durch U-Einträge via Mineraldüngereinträger ein relativ neueres Forschungsthema (Nziguheba und Smolders 2008). Die Resultate einer grösseren Studie im Auftrag des BLW deuten darauf hin, dass in der Schweiz Cd und U auf landwirtschaftlichen Flächen mit Mineraldüngung akkumulieren (Bigalke et al. 2016). Im Gegensatz zu Cd existieren für U derzeit weder in der Schweiz noch in der EU-Grenzwerte; in Deutschland ist beispielsweise ein Grenzwert von 50 mg U kg⁻¹ P₂O₅ (21.8 mg U kg⁻¹ P) in Diskussion (Dienemann und Utermann 2012, Bigalke et al. 2016). Die oben bereits angesprochene Marktkampagne zu Mineraldüngern in der

Schweiz weist auf relativ hohe U-Konzentrationen in P-haltigen Mineraldüngern hin und rund zwei Drittel der Dünger würden den in Deutschland zur Diskussion stehenden Grenzwert nicht einhalten (BLW 2012, Bigalke et al. 2016).

4.3 Vergleich zum Agrarumweltmonitoring der Schweiz

Neben dem Monitoring der NABO werden auch im Agrarumweltmonitoring der Schweiz (AUM) jährlich Bewirtschaftungsdaten landwirtschaftlicher Betriebe erhoben, jedoch mit anderer inhaltlicher Ausrichtung. Während im AUM von rund 300 Betrieben seit 2009 alle Parzellen (gut 6'000 Parzellen) untersucht werden, so werden von der NABO seit 1985 von 4-20 Betrieben alle Parzellen und von insgesamt 46 Betrieben die Parzelle des direkten Bodenmonitorings (NABO-Parzelle) untersucht. Während sich die Auswertungen des AUM auf eine sich verändernde Auswahl von Betrieben beziehen, so ist das Monitoring der NABO auf ausgewählte Parzellen fokussiert, deren Entwicklung über die Zeit im Kontext der Bewirtschaftung untersucht wird. Das Monitoring der NABO zeichnet sich insbesondere durch den langen Beobachtungszeitraum, regelmässig (mindestens alle fünf Jahre) gemessene Bodenwerte auf unterschiedlichen Landnutzungen (nicht nur landwirtschaftliche Flächen) sowie die Kombination von Boden- und Bewirtschaftungsdaten auf landwirtschaftlichen Flächen aus (Tabelle 9). Das langfristige Monitoring der NABO kann somit sehr genaue Informationen zu Veränderungen in der Bewirtschaftung der Parzellen und Betriebe liefern und deren Auswirkungen auf die Bodengesundheit untersuchen. Dies ist ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zu anderen Monitoring-Programmen in der Schweiz.

Tabelle 9 Vergleich zwischen Monitoring des AUM und der NABO

Vergleich	AUM	NABO
Zeitraum	Seit 2009	Seit 1985
Betriebe mit Daten aller Parzellen	Ca. 300	4-20
Parzellen		
Jährliche Bewirtschaftungsdaten	Ca. 6'000	40-46
Regelmässiges Bodenmonitoring gleichbleibender Standorte mit unterschiedlicher Landnutzung	Keines	> 100

Derzeit werden im AUM nur Cu und Zn als Schwermetalle berücksichtigt. Die Resultate deuten für tierhaltende Betriebe sowie Spezialbetriebe in eine ähnliche Richtung wie die Resultate dieses Berichts und zeigen (1) erhöhte Cu- und Zn-Nettoflüsse auf Betrieben mit grossem Tierbesatz von > 2 GVE pro ha LN sowie (2) stark erhöhte Cu-Nettoflüsse auf Spezialbetrieben, insbesondere im Rebbau (BLW 2014).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Langzeit-Monitoring als Instrument der Vorsorge

Langzeitdaten zum Zustand der Böden und deren Bewirtschaftung stellen eine unersetzliche Datengrundlage dar, um Gefährdungen der Bodenfruchtbarkeit und der Bodengesundheit im Sinne der Vorsorge frühzeitig zu erkennen und um konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. So weisen die hier vorgestellten Oberflächenbilanzen landwirtschaftlicher Parzellen bei mehrjähriger intensiver Hofdüngerausbringung und bei wiederholter Anwendung von Cu-haltigen PSM im Rebbau auf eine mögliche Akkumulation von Cu und Zn im Oberboden hin. Die aus Bewirtschaftungsdaten berechneten theoretischen Akkumulationsraten zeigen aber auch, dass eine unerwünschte Annäherung an Richtwerte im Boden über lange Zeiträume (Jahrzehnte) erfolgt. Im Boden gemessene Werte weisen grundsätzlich in die gleiche Richtung. Diese Beobachtungen unterstreichen die Relevanz von Langzeitdaten zum Erkennen von sich langsam entwickelnden Gefährdungen der Bodenfruchtbarkeit. Das Monitoring von Böden und deren Bewirtschaftung ist damit ein wichtiges Instrument im Rahmen der Vorsorge (USG 1983, VBBo 1998).

Die Resultate dieses Berichts zeigen, dass die Menge ausgebrachter Hofdünger pro Parzellenfläche und Jahr positiv mit der Anzahl gehaltener Nutztiere pro landwirtschaftliche Nutzfläche korreliert. Aus diesem Grund sind unter den Parzellen des NABO-Monitorings jene von Betrieben mit intensiverer Tierhaltung eher von erhöhten Cu- und Zn-Nettoflüssen betroffen als jene von Betrieben mit extensiverer Tierhaltung (Nettofluss = Einträge minus Austräge pro Fläche und Zeit, Formel 1). Ein ähnlicher Befund lässt sich auf Betriebsebene aus den Erkenntnissen des Schweizer Agrarumweltmonitorings ableiten, das für Betriebe mit > 2 GVE pro ha landwirtschaftliche Nutzfläche erhöhte Cu- und Zn-Nettoflüsse ausweist (BLW 2014). Eine Fortführung des langfristigen Monitorings von Parzellen intensiv tierhaltender Betriebe erscheint aus diesem Grund nach wie vor angezeigt.

Für Cd sind Mineraldünger, atmosphärische Deposition und bis 2006 unbehandelt ausgebrachter Klärschlamm die wichtigsten Eintragspfade. Insbesondere P-reiche Mineraldünger weisen oft erhöhte Cd-Konzentrationen auf. Insgesamt zeigen Resultate dieses Berichts, ähnlich wie andere Untersuchungen (Bigalke et al. 2016), dass eine Beobachtung und nötigenfalls Begrenzung von Cd-Nettoflüssen v.a. an Standorten mit hohen P-Mineraldüngergaben wichtig ist. Es ist zu beachten, dass die Datenlage für Cd- und U-Konzentrationen in Mineraldüngern derzeit nicht optimal ist und breitangelegte Beprobungen nötig wären, um Unsicherheiten in der Berechnung von Oberflächenbilanzen weiter zu minimieren (Roth und Fitzgerald 2015, Bigalke et al. 2017).

5.2 Empfehlungen

Zur Reduktion von Unsicherheiten in der Bilanzierung sind **regelmässige Beprobungen** ausgebrachter Hofdünger unabdingbar. Die Beprobung von Nährstoffen und Schwermetallen in Hofdüngern sollte folglich in regelmässigen Abständen auf NABO-Betrieben wiederholt werden. Zudem ist es prinzipiell möglich, die Beprobung auf weitere Substanzen (z.B. Mikroverunreinigungen aus Medizinalprodukten) auszuweiten, um Daten für öko- und humantoxikologische Studien zu generieren. Zusätzlich besteht auch ein bereits angesprochener Bedarf nach umfassenden Daten zu Cd- und U-Gehalten in Mineraldüngern, insbesondere von solchen mit hohem P-Anteil.

In der Schweiz existieren Grenzwerte für Schwermetallkonzentrationen in landwirtschaftlichen Hilfsstoffen (ChemRRV 2005) sowie Richtwerte in Böden (VBBo 1998). Im Gegensatz zu Deutschland sind **bisher keine vorsorgeorientierten Grenzfrachten** definiert, welche die maximale zusätzliche Fracht über alle Eintragspfade eines Stoffes definieren (in der deutschen Bodenschutzverordnung als "zulässige zusätzliche jährliche Frachten" bezeichnet; BBodSchV 1999). Im Vergleich zu einzeln definierten maximalen Konzentrationen oder Frachten pro Eintragspfad (z.B. für PSM oder Dünger) erlaubt ein solch integraler Wert eine von der Bodengesundheit her definierte Norm und ermöglicht eine gewisse Flexibilität bei der Wahl von Massnahmen. Zudem werden Zielkonflikte minimiert, welche entstehen können, wenn sich Massnahmen an einem Eintragspfad negativ auf einen anderen Eintragspfad auswirken sollten. Zur Begrenzung von Stoffeinträgen in Böden wäre daher eine klare und einheitliche Vorgabe von Grenzfrachten wünschenswert.

Die Ergebnisse dieses Berichts können in Kombination mit kantonalen Messnetzen (kantonale Bodenbeobachtung, KABO) zur **Bilanzierung regionaler Stoffflüsse** herangezogen werden, beispielsweise zur Berechnung von Nährstoffbudgets in Einzugsgebieten oder anderen geografischen Skalen (vgl. Della Peruta et al. 2014).

Für die landwirtschaftliche Praxis bestätigen die Resultate dieses Berichts frühere Empfehlungen (z.B. Keller et al. 2005):

- Der **Tierbesatz pro Betrieb sollte an die vorhandene landwirtschaftliche Nutzfläche angepasst sein**, um eine mit grossem Hofdüngereinsatz einhergehende mögliche Akkumulation von Cu und Zn im Boden zu vermeiden; zudem sollten die Cu- und Zn-Mengen in der Tierfütterung soweit möglich und sinnvoll reduziert werden;
- **Mineraldünger mit hohen P-Gehalten sollten möglichst sparsam eingesetzt werden**, um die Wahrscheinlichkeit einer Cd- und U-Akkumulation im Boden zu minimieren;
- Besonders im Rebbau sollten **Cu-haltige PSM wo möglich reduziert** werden, beispielsweise durch Förderung pilzwiderstandsfähiger Rebsorten und/oder Cu-freie Alternativen.

5.3 Ausblick

Schwermetall- und Nährstoffbilanzen gestatten in Kombination mit regelmässig gemessenen Bodendaten ein Gesamtbild über die langfristige Entwicklung der Schweizer Böden im Kontext der landwirtschaftlichen Nutzung. In weiteren Studien sollen die hier vorgestellten Oberflächenbilanzen daher mit Messdaten des direkten Monitorings, insbesondere zur zeitlichen Entwicklung, verglichen werden, um das Verständnis von Einflüssen der Düngung bzw. von PSM-Anwendungen auf den Bodenzustand über lange Zeiträume (Jahrzehnte) zu verbessern. Der Vergleich der erwarteten Entwicklung der Schwermetallkonzentrationen (aufgrund der hier berechneten theoretischen Akkumulationsraten) mit den seit den 1980er-Jahren im Boden gemessenen Konzentrationen wird Hinweise darauf geben, inwieweit andere Prozesse im Boden bzw. die Bodenbearbeitung relevant sind. Die Resultate können u.a. dazu dienen, anhand von Szenarien die Effektivität verschiedener Massnahmen zur Verminderung der Stoffanreicherung in Böden abzuschätzen und dadurch einen Beitrag zur Vorsorge vor Gefährdungen der Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit gemäss USG (1983) und VBBo (1998) zu leisten.

Literaturverzeichnis

- AG (1997) Schwermetalle und Nährstoffgehalte in landwirtschaftlichen Handelsdüngern. Jahresbericht 1997. Kantonales Laboratorium Aargau, Sektion Chemiesicherheit und Stoffe, Aarau
- Agridea, BLW (2019) Wegleitung Suisse-Bilanz. Agridea und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- Agroscope (2016a) Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch). Agroscope, Posieux
- Agroscope (2016b) Fütterungsempfehlungen für Schweine (Gelbes Buch). Agroscope, Posieux
- Amelung W, Blume H-P, Fleige H, Horn R, Kandeler E, Kögel-Knabner I, Kretzschmar R, Stahr K, Wilke B-M (2018) Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Springer-Verlag GmbH, Berlin
- Arruda-Neto JDT, Tavares M V, Filadelfo M (1997) Concentrations of uranium in animal feed supplements: Measurements and dose estimates. J Radioanal Nucl Chem 221:97–104. doi: 10.1007/BF02035249
- BAFU, BLW (2012) Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BAFU, BLW (2013a) Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BAFU, BLW (2013b) Bodenschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BAFU, Empa (2016) Luftbelastung 2015. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt und Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bern
- BAFU, Empa (2020) Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2020. Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Bern
- BBodSchV (1999) Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- BFS (2013) Die Bodennutzung in der Schweiz: Resultate der Arealstatistik. Eidgenössisches Departement des Innern, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel
- Bigalke M, Imseng M, Schneider S, Schwab L, Wigganhauser M, Keller A, Müller M, Frossard E, Wilcke W (2020) Uranium Budget and Leaching in Swiss Agricultural Systems. Front Environ Sci 8:1–11. doi: 10.3389/fenvs.2020.00054
- Bigalke M, Rehmus A, Keller A (2016) Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Universität Bern und Agroscope, Bern und Zürich
- Bigalke M, Ulrich A, Rehmus A, Keller A (2017) Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland. Environ Pollut 221:85–93. doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.035
- BLW (2012) Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BLW (2014) Agrarbericht 2014. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BLW (2019) Agrarbericht 2019. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern
- BLW (2021) Produkte: Pflanzenschutzmittelverzeichnis. www.psm.admin.ch/de/produkte, letztmals aufgerufen am 1.3.2021. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern
- Bosshard C, Richner W (2013) Bestimmungsfaktoren des Stickstoff-Überschusses auf Betriebsebene. Teil 2: Analyse auf Kulturbene. Abschlussbericht zuhanden des Bundesamts für Landwirtschaft. Agroscope, Reckenholz-Tänikon
- Boysen P (1992) Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln. Umweltbundesamt, Berlin

- Brunner PH, Rechberger H (2017) Handbook of material flow analysis, Second Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida
- BUWAL (1991) Schwermetalle und Fluor in Mineraldüngern. Schriftenreihe Umwelt Nr. 162. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- ChemRRV (2005) Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen. SR 814.81. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Della Peruta R, Keller A, Schulin R (2014) Sensitivity analysis, calibration and validation of EPIC for modelling soil phosphorus dynamics in Swiss agro-ecosystems. Environ Model Softw 62:97–111. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.08.018
- Desaules A, Studer K (1993) Nationales Bodenbeobachtungsnetz. Messresultate 1985-1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- Destatis (2018) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Destatis, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- Dettwiler J, Clément J, Chassot G (2006) Düngung und Umwelt. Fachkommentare zum anwendbaren Bundesrecht. Umwelt-Wissen: Boden. Bundesamt für Umwelt, Bern
- Dienemann C, Utermann J (2012) Uran in Boden und Wasser. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau
- Flisch R, Sinaj S, Charles R, Richner W (2009) GRUDAF 2009 - Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 16
- FMBV (2020) Verordnung des WBF über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Zusatzstoffen für die Tierernährung und Diätfuttermitteln (Futtermittelbuch-Verordnung). SR 916.307.1. Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung, Bern
- Freiermuth R (2006) Modell zur Berechnung der Schwermetallflüsse in der Landwirtschaftlichen Ökobilanz. SALCA-Schwermetall. Agroscope FAL Reckenholz, Reckenholz
- Frossard E, Condron LM, Oberson A, Sinaj S, Fardeau JC (2000) Processes governing phosphorus availability in temperate soils. J Environ Qual 29:15–23. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900010003x
- Goodlass G, Halberg N, Verschuur G (2003) Input output accounting systems in the European community - An appraisal of their usefulness in raising awareness of environmental problems. Eur J Agron 20:17–24. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00068-6
- Gross T, Keller A, Müller M, Gubler A (2021) Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. Agroscope Science Nr. 122. doi: 10.34776/as122g
- GschG (1991) Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer. SR 814.20. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern
- GSchV (1998) Gewässerschutzverordnung. SR 814.201. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Gsponer R (1990) Schwermetalle in Düngemitteln: Ein Diskussionsbeitrag. Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Fachstelle Bodenschutz, Zürich
- Gubler A, Schwab P, Wächter D, Meuli RG, Keller A (2015a) Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern
- Gubler A, Wächter D, Blum F, Bucheli TD (2015b) Remarkably constant PAH concentrations in Swiss soils over the last 30 years. Environ Sci Process Impacts 17:1816–1828. doi: 10.1039/C5EM00344J
- Hackenberg S, Wegener H (1999) Schadstoffeinträge in Böden durch Wirtschafts- und Mineraldünger, Komposte und Klärschlamm sowie durch atmosphärische Deposition. Baeza Verlag, Witzenhausen, Deutschland
- Hedbrant J, Sörme L (2001) Data vagueness and uncertainties in urban heavy-metal data collection. Water, Air, Soil Pollut Focus 1:43–53. doi: 10.1023/A:1017591718463

- Herter U, Kupper T, Külling D (2003) Risikoabschätzung zur landwirtschaftlichen Abfalldüngerverwertung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich
- Hoop D, Schmid D (2016) Betriebstypologie ZA2015 (BT-ZA2015). Agroscope, Ettenhausen
- Hoop D, Schmid D (2019) Betriebstypologie ZA2015 der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten. Version 1.04, März 2019. Agroscope, Ettenhausen
- Huber PJ (1981) Robust statistics. Wiley, New York
- Imseng M, Wiggenhauser M, Keller A, Müller M, Rehkämper M, Murphy K, Kreissig K, Frossard E, Wilcke W, Bigalke M (2018) Fate of Cd in Agricultural Soils: A Stable Isotope Approach to Anthropogenic Impact, Soil Formation, and Soil-Plant Cycling. *Environ Sci Technol* 52:1919–1928. doi: 10.1021/acs.est.7b05439
- Imseng M, Wiggenhauser M, Müller M, Keller A, Frossard E, Wilcke W, Bigalke M (2019) The Fate of Zn in Agricultural Soils: A Stable Isotope Approach to Anthropogenic Impact, Soil Formation, and Soil-Plant Cycling. *Environ Sci Technol* 53:4140–4149. doi: 10.1021/acs.est.8b03675
- IUL (1997) Resultate von Stichprobenuntersuchungen im Rahmen der Düngerkontrolle in den Jahren 1996 und 1997. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Bern
- Janssen PHM (1994) Assessing sensitivities and uncertainties in models: a critical evaluation. In: Grasman J, van Straten G (Ed.) Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics. Springer, Dordrecht
- Jeanros B, Courvoisier N (2019) Optimale Fruchtfolgen im Feldbau (4. Auflage). Agrarforschung Schweiz 10:7-8
- Kecerdasan I, Ikep P, de Vries W, Loftis S, Tipping E, Meili M, Groenenberg JE, Schütze G (2007) Impact of soil properties on critical concentrations of cadmium, lead, copper, zinc, and mercury in soil and soil solution in view of ecotoxicological effects. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Springer, New York
- Keller A (2000) Assessment of uncertainty in modelling heavy metal balances of regional agroecosystems. Doctoral thesis. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich
- Keller A, Abbaspour KC, Schulin R (2002) Assessment of Uncertainty and Risk in Modeling Regional Heavy-Metal Accumulation in Agricultural Soils. *J Environ Qual* 31:175–187. doi: 10.2134/jeq2002.1750
- Keller A, Rossier N, Desaulles A (2005) Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftspartellen der nationalen Bodenbeobachtung. Schriftenreihe der FAL 54, Agroscope, FAL Reckenholz, Zürich
- Keller T, Desaulles A (1997) Flächenbezogene Bodenbelastung mit Schwermetallen durch Klärschlamm. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau - Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Zürich und Bern
- Klärschlammverordnung (1981) SR 814.225.23. Aufgehoben seit 1.10.1992. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Knoche H, P B, Viereck-Götte H, Böken L (1999) Schwermetalltransfer Boden-Pflanzen. Texte 11/99. Forschungsbericht 10706001/20. Umweltbundesamt, Berlin
- Kupper T, Bürge D, Bachmann HJ, Güsewell S, Mayer J (2014) Heavy metals in source-separated compost and digestates. *Waste Manag* 34:867–874. doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.007
- LANDI (2020) Zielsortiment 2020. Fenaco, Bern
- Last L, Buchmann N, Gilgen AK, Grant M, Shreck A (2015) Foresight study: research for a sustainable swiss food system. Swiss Federal Office for Agriculture and World Food System Center, Bern
- LBV (1998) Verordnung über landwirtschaftliche Begriffe und die Anerkennung von Betriebsformen (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung). SR 910.91. Der Schweizerische Bundesrat, Bern
- LwG (1998) Bundesgesetz über die Landwirtschaft (Landwirtschaftsgesetz, LwG). SR 910.1. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern
- Mann S, Rate A, Gilkes R (2002) Cadmium accumulation in agricultural soils in Western Australia. *Water, Air, Soil Pollut* 141:281-297

- McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ (1979) A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 21:239-245
- McLaughlin MJ, Tiller KG, Naidu R, Stevens DP (1996) Review: The behaviour and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Aust J Soil Res* 34:1–54. doi: 10.1071/SR9960001
- Menzi H, Lehmann E, Kessler J (1999) Anfall und Zusammensetzung von Hofdünger aus der Rindviehmast. *Agrarforschung* 6:417–420
- Menzi H, Kessler J (1998) Heavy metal content of manures in Switzerland. In: Martinez J, Maudet MN (Ed.) *Proceedings of the 8th International Conference FAO ESCORENA Network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in agriculture*, Rennes
- Mihelcic JR, Fry LM, Shaw R (2011) Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. *Chemosphere* 84:832–9. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.046
- Mortvedt JJ (1996) Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. In: Rodriguez-Barrueco C (Ed) *Fertilizers and Environment: Proceedings of the International Symposium Fertilizers and Environment*, Salamanca, Spain, 26-29.9.1994. Springer, Dordrecht
- Nanzer S, Oberson A, Berger L, Berset E, Hermann L, Frossard E (2014) The plant availability of phosphorus from thermo-chemically treated sewage sludge ashes as studied by ³³P labeling techniques. *Plant Soil* 377:439–456. doi: 10.1007/s11104-013-1968-6
- Nicholson F, Chambers B, Williams J, Unwin R (1999) Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresour Technol* 70:23–31. doi: 10.1016/S0960-8524(99)00017-6
- Nziguheba G, Smolders E (2008) Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Sci Total Environ* 390:53–57. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.031
- Oberholzer HR, Knuchel RF, Weisskopf P, Gaillard G (2012) A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agron Sustain Dev* 32:639–649. doi: 10.1007/s13593-011-0072-7
- Oenema O, Kros H, De Vries W (2003) Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *Eur J Agron* 20:3–16. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00067-4
- Richner W, Sinaj S (2017) GRUD 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* 8(6), Spezialpublikation
- Rihm B, Achermann B (2016) Critical loads of nitrogen and their exceedances. Bundesamt für Umwelt, Bern
- Roth N, Fitzgerald R (2015) Human and environmental impact of uranium derived from mineral phosphate fertilizers. SCAHT report for BLW. Swiss Centre for Applied Human Toxicology, Basel
- Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M (2004) Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex
- SCHER (2010) Opinion on the environmental and health risks posed by depleted uranium. Scientific Committee on Health and Environmental Risks, Brussels
- Schlegel P (2011) Zink in der Schweinefütterung. Merkblatt für die Praxis. ALP Aktuell, Agroscope, Posieux
- Schlegel P, Kessler J (2016) Mineralstoffe und Vitamine. In: *Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch)*. Agroscope, Posieux
- Schnug E, Lottermoser BG (2013) Fertilizer-derived uranium and its threat to human health. *Environ Sci Technol* 47:2433–2434. doi: 10.1021/es4002357
- Speiser B, Mieves E, Tamm L (2015) Kupfereinsatz von Schweizer Biobauern in verschiedenen Kulturen. *Agrarforschung Schweiz* 6(4)
- Schultheiss U, Roth U, Döhler H, Eckel H (2004) Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Umweltbundesamt, Berlin

- Schwab P, Gubler A (2016) Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Agroscope Science* 40
- Schweizerischer Bundesrat (2016) Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016-2019. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Schweizerischer Bundesrat (2017) Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Schweizerischer Bundesrat (2020) Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik ab 2022. Schweizerischer Bundesrat, Bern
- Six L, Smolders E (2014) Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Sci Total Environ* 485–486:319–328. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.109
- Spiess E (2011) Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutr Cycl Agroecosystems* 91:351–365. doi: 10.1007/s10705-011-9466-9
- Spiess E, Liebisch F (2020) Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. *Agroscope Science* 100
- Thöni L, Seitler E, Schnyder E, Ehrenmann J (2018) Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Moosanalysen 1990-2015. *Umwelt-Zustand: Luft*. Bundesamt für Umwelt, Bern
- TSG (1966) Tierseuchengesetz (TSG). SR 916.40. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern
- Ulrich AE (2019) Cadmium governance in Europe's phosphate fertilizers: Not so fast? *Sci Total Environ* 650:541–545. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.014
- Ulrich AE, Schnug E, Prasser HM, Frossard E (2014) Uranium endowments in phosphate rock. *Sci Total Environ* 478:226–234. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.069
- UN (2015) Sustainable development goals: the 2030 agenda for sustainable development. A/RES/70/1. General Assembly, United Nations, New York
- USG (1983) Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz). SR 814.01. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern
- VBBö (1998) Verordnung über Belastungen des Bodens. SR 814.12. Der Schweizerische Bundesrat, Bern
- Vogler K, Schmitt H (1990) Schwermetalltransfer Boden-Pflanze. Nationales Forschungsprogramm Boden (NFP22), Forschungsbericht Nr. 53, Liebefeld-Bern
- Von Steiger B, Baccini P (1990) Regionale Stoffbilanzierung von landwirtschaftlichen Böden mit messbarem Ein- und Austrag. Nationales Forschungsprogramm Nutzung des Bodens in der Schweiz, Liebefeld-Bern
- von Wartburg J (2015) Schwermetalle in Mineraldüngern. Bachelorarbeit. Geografisches Institut, Universität Bern
- VSBo (1986) Verordnung vom 9. Juni 1986 über Schadstoffe im Boden (VSBo), aufgehoben per 1.10.1998 durch VBBö (1998). SR 814.12. Der Schweizerische Bundesrat, Bern
- WHO (2012) Uranium in drinking-water. Background document for the development of WHO guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, Geneva
- Wilcke W, Döhler H (1995) Schwermetalle in der Landwirtschaft. Quellen, Flüsse, Verbleib. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

6 Anhänge

A1 – NABO-Betriebstypen

Tabelle A1 Angaben zu Betrieben (NABOStandortnummerAn = anonymisierte Standortnummer) mit Bewirtschaftungsdaten mit Einteilung des Betriebstyps, landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) und durchschnittlichen Grossvieheinheiten (GVE) pro LN von 1985-2000; kA = keine Angaben, KMA = Kombiniert Milchkühe/Ackerbau

NABOStandortnummerAn	Kanton	Höhe (m ü.M.)	LN (ha)	Rindvieh (GVE ha ⁻¹)	Schweine (GVE ha ⁻¹)	Spezialkulturen (% der LN)	Betriebstyp
B142	TG	500	107	1.3	0.3	0	Kombiniert Veredlung
B004	VD	500	35	1.8	0.0	0	KMA
B149	VS	500	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B031	BE	500	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B108	BL	300	70	1.6	0.3	0	Rindvieh
B123	AR	900	14	1.0	0.0	0	Rindvieh
B090	VD	500	39	1.8	0.0	0	KMA
B058	BE	500	26	1.7	0.0	0	KMA
B091	BE	400	38	0.0	0.0	0	Ackerbau
B056	BE	900	21	1.0	0.1	0	Kombiniert Veredlung
B009	TG	500	8	0.0	0.0	97	Spezialkultur
B083	SH	500	34	1.6	0.0	0	KMA
B119	AG	500	14	1.8	0.0	0	Rindvieh
B046	LU	400	26	1.4	0.6	0	Kombiniert Veredlung
B104	LU	600	28	1.7	0.6	0	Kombiniert Veredlung
B124	NE	800	41	1.7	0.0	0	KMA
B033	GL	400	20	1.5	0.3	0	Kombiniert Veredlung
B020	NE	1100	41	1.6	0.0	0	Rindvieh
B030	LU	500	29	1.8	0.4	0	KMA
B014	FR	700	53	1.8	0.0	0	Rindvieh
B122	BE	500	22	1.3	0.5	0	Kombiniert Veredlung
B061	AG	400	15	0.9	0.1	9	KMA
B146	FR	400	56	1.6	0.2	0	Ackerbau
B100	SG	400	36	1.6	0.0	0	KMA
B097	UR	1100	20	1.6	0.0	0	Rindvieh
B043	SG	500	34	0.0	1.0	kA	Spezialkultur ^A
B041	BE	600	28	0.0	1.0	12	Kombiniert Veredlung
B036	VD	400	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B109	BE	1000	15	1.7	0.1	0	Rindvieh
B118	BL	400	52	1.4	0.3	0	KMA
B085	JU	500	54	1.6	0.0	0	Rindvieh
B089	VD	400	33	0.0	0.0	0	Ackerbau
B116	FR	800	82	1.5	0.2	0	Rindvieh
B143	GR	1100	45	1.6	0.0	1.7	Rindvieh ^A
B150	SG	500	13	1.2	0.6	0	Kombiniert Veredlung
B087	GR	800	26	1.9	0.1	0	Kombiniert Andere
B032	GR	500	58	1.1	0.4	0	Kombiniert Veredlung
B063	VD	700	0	0.0	0.0	0	Ackerbau
B134	JU	500	153	1.0	0.8	0	Kombiniert Veredlung
B007	BE	600	13	1.8	0.0	0	KMA
B013	TG	600	35	1.6	0.1	0	KMA
B028	TI	300	51	1.7	0.0	1.8	Kombiniert Andere ^A
B145	TI	300	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B141	VS	400	35	0.0	0.0	0.0	Ackerbau ^A
B012	SO	400	23	1.4	0.5	0	Kombiniert Veredlung

^A Angaben unvollständig zwischen 1985-2000, teilweise geschätzt bzw. Angaben des Zeitraums 2001-2017 übernommen

Tabelle A2 Angaben zu Betrieben (NABOStandortnummerAn = anonymisierte Standortnummer) mit Bewirtschaftungsdaten mit Einteilung des Betriebstyps, landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) und durchschnittlichen Grossvieheinheiten (GVE) pro LN von 2001-2017; kA = keine Angaben, KMA = Kombiniert Milchkühe/Ackerbau

NABOStandortnummerAn	Kanton	Höhe (m ü.M.)	LN (ha)	Rindvieh (GVE ha ⁻¹)	Schweine (GVE ha ⁻¹)	Spezialkulturen (% der LN)	Betriebstyp
B142	TG	500	103	1.3	0.3	0	Kombiniert Veredlung
B004	VD	500	42	1.8	0.0	0	KMA
B149	VS	500	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B031	BE	500	2	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B108	BL	300	70	1.0	0.0	0	Rindvieh
B123	AR	900	10	1.0	0.0	0	Rindvieh
B090	VD	500	48	1.8	0.0	0	KMA
B058	BE	500	28	1.8	0.0	0	KMA
B091	BE	400	49	0.0	0.0	24	Ackerbau
B056	BE	900	21	0.9	0.5	0	Kombiniert Veredlung
B009	TG	500	8	0.0	0.0	97	Spezialkultur
B083	SH	500	47	1.6	0.2	0	KMA
B119	AG	500	24	1.2	0.0	33	KMA
B046	LU	400	24	1.2	0.8	0	Kombiniert Veredlung
B104	LU	600	25	1.2	0.5	0	Kombiniert Veredlung
B124	NE	800	40	1.9	0.0	0	KMA
B033	GL	400	26	1.5	0.3	0	Kombiniert Veredlung
B020	NE	1100	44	1.8	0.0	0	Rindvieh
B030	LU	500	34	1.8	0.7	0	KMA
B014	FR	700	56	1.7	0.0	0	Rindvieh
B122	BE	500	24	2.0	0.4	0	Kombiniert Veredlung
B061	AG	400	15	1.5	0.0	1	KMA
B146	FR	400	52	1.6	0.2	0	Ackerbau
B100	SG	400	42	1.7	0.0	0	KMA
B097	UR	1100	20	1.6	0.0	0	Rindvieh
B043	SG	500	34	0.0	1.0	kA	Spezialkultur
B041	BE	600	27	0.0	1.0	8	Kombiniert Veredlung
B036	VD	400	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B109	BE	1000	16	1.3	0.1	0	Rindvieh
B118	BL	400	51	1.6	0.0	0	KMA
B085	JU	500	54	2.0	0.0	0	Rindvieh
B089	VD	400	33	0.0	0.0	0	Ackerbau
B116	FR	800	56	1.0	0.5	4	Kombiniert Veredlung
B143	GR	1100	45	1.6	0.0	0	Rindvieh
B150	SG	500	16	1.2	0.6	0	Kombiniert Veredlung
B087	GR	800	25	1.9	0.1	0	Kombiniert Andere
B032	GR	500	63	1.4	0.1	0	Kombiniert Veredlung
B063	VD	700	29	0.0	0.0	0	Ackerbau
B134	JU	500	155	1.2	0.9	0	Kombiniert Veredlung
B007	BE	600	13	1.8	0.0	0	KMA
B013	TG	600	33	1.9	0.0	0	KMA
B028	TI	300	51	1.7	0.0	6	Kombiniert Andere
B145	TI	300	1	0.0	0.0	100	Spezialkultur
B141	VS	400	35	0.0	0.0	0	Ackerbau
B012	SO	400	48	1.6	0.3	0	Kombiniert Veredlung
B062	VS	500	19	0.0	0.0	20	Spezialkultur

A2 – Erhebung der Bewirtschaftungsdaten

Tabelle A3 Übersicht über Erhebung der Bewirtschaftungsdaten auf NABO-Betrieben über die verschiedenen Erfassungsperioden

Erfassung	1985-1991 (Erfassungsperiode 1)	1992-2003 (Erfassungsperiode 2)	Seit 2004 (Erfassungsperiode 3)
Art der Datenanfrage	Schriftlich und telefonisch	Schriftlich	Schriftlich
Feldkalender bzw. Parzellenblätter	Ja	Ja	Ja
Fruchtfolgeplan	Nein	Ja	Ja
Wiesenjournale	Nein	Ja	Ja
Gesamtbetriebliche Nährstoffbilanz	Nein	Ja	Ja
Tierzahlen	Einmalig	Ja	Ja
Anderweitige Datenerfassung durch Landwirte	Nicht obligatorisch	Ab 1992 freiwillig; seit 1998 im Rahmen des ÖLN obligatorisch für Direktzahlungen	Im Rahmen des ÖLN obligatorisch für Direktzahlungen
Datenbank zur Eingabe	Papierformular; AGRO-TECH (nachträglich)	Access	AGRO-TECH
Produkte-Codes	Automatische Zuteilung von ProduktNrAgrotech zu Massnahmen und Aktivitäten in AGRO-TECH (nachträglich)	Massnahmen und Aktivitäten werden via Access eine sog. BWC-Nr. zugewiesen (nicht mehr genutzt)	Automatische Zuteilung von ProduktNrAgrotech zu Massnahmen und Aktivitäten in AGRO-TECH
Finanzielle Aufwandsentschädigung für Landwirte	Nein	Ja	Ja
Erfassung pro Flächeneinheit	Gesamtmenge pro Massnahmenfläche erfasst	Mengen pro ha erfasst	Gesamtmenge pro Massnahmenfläche erfasst
Erfassung pro Zeiteinheit	Mengen pro Datum	Jahressummenmenge oder Menge pro Datum	Mengen pro Datum

A3 – Konzentrationsdaten

Tabelle A4 Cu- und Zn-Konzentrationen in PSM pro kg Produkt

ProduktNr	Handelsname	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
30024	Amarel-Kupfer-DF	180'000	0
30136	Cupravit blau	350'000	0
30137	Cuprofix 50%	500'000	0
30138	Cuprosan 3P	150'000	0
30139	Cuprosan U-DG	180'000	0
30140	Cuproxat flüssig LG	190'000	0
30174	Bouillie bordelaise	200'000	0
30194	Euparen-Kupfer 30/15	150'000	0
30262	Kocide 2000	350'000	0
30265	Kupfer 50%	500'000	0
30315	Multivino	150'000	0
30342	Oxykupfer 50	500'000	0
30353	Phytokupfer	350'000	0
30534	Microperl 40%	400'000	0
30655	Kocide Opti	300'000	0
30791	Kocide DF 40% (Bayer)	400'000	0
30802	Vinipur Spezial 15%	150'000	0
30803	Vinipur Spezial fluid	146'700	0
30839	Cupro-Folpet Ultra SC	147'000	0
31403	Cupromaag	500'000	0
31709	Cuprosan Ultra 15%	150'000	0
31772	Topas Multivino	150'000	0
31836	Kupfer 50% Bayer	500'000	0
32063	Turbofal	110'000	0
32064	Turbofal WG	180'000	0
32131	Virimaag	250'000	0
32165	Recop	500'000	0
32694	Ocarina (40.6% Kupfer)	406'000	0
32814	Pergado C (19.5% Kupfer)	195'000	0
32033	Tattoo (Mancozeb 30.2%, Kupersulfat 0.25%)	25'000	6'075
30003	Acrobat MZ WG (66.7% Mancozeb)	0	16'675
30031	Antracol WG 70 (Propineb 70%)	0	158'200
30172	Diithane NeoTec (75% Mancozeb)	0	18'750
30181	Electis (68.5% Mancozeb)	0	17'125
30284	Mancozeb 80 LG (80% Mancozeb)	0	20'000
30392	Remiltine pépite (46.5% Mancozeb)	0	11'625
30396	Ridomil Gold (64% Mancozeb)	0	16'000
30409	Rover Star (27.5% Mancozeb)	0	6'875
30412	Sandofan YM pépite (56% Mancozeb)	0	14'000
30417	Sereno (50% Mancozeb)	0	12'500
30477	Valbon (70% Mancozeb)	0	17'500
30582	Trimanoc DG (75.0% Mancozeb)	0	18'750
30609	Mancozeb-Cymox (67% Mancozeb)	0	16'750
30697	Revus MZ (60% Mancozeb)	0	15'000
30793	Megapur Duo (66.6% Mancozeb)	0	16'650
30609	Mancozeb-Cymox (67% Mancozeb)	0	16'750
31149	Curzate M WG (68% Mancozeb)	0	17'000
31232	Captan-Zineb (Zineb 37%)	0	87'875
31249	Cyman-Supra 1 (46.5% Mancozeb)	0	11'625
31260	Mancozeb 80 (80% Mancozeb)	0	20'000

Tabelle A4 (Fortsetzung)

ProduktNr	Handelsname	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
30793	Megapur Duo (66.6% Mancozeb)	0	16'650
30609	Mancozeb-Cymox (67% Mancozeb)	0	16'750
31149	Curzate M WG (68% Mancozeb)	0	17'000
31232	Captan-Zineb (Zineb 37%)	0	87'875
31249	Cyman-Supra 1 (46.5% Mancozeb)	0	11'625
31260	Mancozeb 80 (80% Mancozeb)	0	20'000
31341	Galben M (65% Mancozeb)	0	16'250
31725	Ridomil Fitorex (64% Mancozeb)	0	16'000
31867	Mancozeb WG (60% Mancozeb)	0	12'000
32110	Fentin Supra (62.5% Mancozeb)	0	15'625
32173	Galaxy WL (66.7% Mancozeb)	0	16'675
32174	Patafol (64% Mancozeb v. Agroplant)	0	16'000

Tabelle A5 Mittlere Trockensubstanz (TS) und Konzentrationen von Nährstoffen (N, P und K) und Schwermetallen (Cu, Zn und Cd) in Hofdüngern; R = Rinder, S = Schweine, unverd. = unverdünnt, verd. = verdünnt

Typ	ProduktNr	Hofdünger	TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	N (g kg _{TS} ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	K (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	Cd (mg kg _{TS} ⁻¹)
Rindvieh	20184	R-Stapelmist	0.190	26	7	31	26	129	0.2
	20209	R-Gülle 1:2 verd.	0.030	49	9	74	37	162	0.2
	20608	R-Gülle 1:1 verd.	0.045	49	9	74	37	162	0.2
	20609	R-Gülle kotarm	0.075	65	5	133	19	123	0.2
	20610	R-Harngülle	0.030	65	5	249	29	123	0.3
	20611	R-Mist Milchvieh	0.210	26	7	43	24	118	0.2
	20612	R-Mist Mastvieh	0.210	26	7	28	22	91	0.2
	20908	R-Gülle unverd. ^A	0.090	49	9	74	37	162	0.2
	20909	R-Gülle kotarm unverd. ^A	0.150	65	5	133	19	123	0.2
	20910	R-Harngülle unverd. ^A	0.060	65	5	249	29	123	0.3
Schweine	20613	S-Gülle 1:1 verd.	0.025	120	25	42	117	747	0.2
	20913	S-Gülle unverd. ^A	0.050	120	25	42	117	747	0.2
	20614	S-Mist	0.270	29	11	26	125	1'370	0.1
Geflügel	20618	Geflügelmist	0.650	52	12	18	71	378	0.3
Andere	20188	Pferdemist	0.350	20	3	23	26	129	0.2
	20190	Schaf-/Ziegenmist	0.270	29	5	49	24	118	0.2
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.	0.035	77	17	166	218	214	0.4

^A Güllemengen der ProduktNr 20908, 20909, 20910 und 20913 sind in den Bewirtschaftungsdaten als unverdünnte Werte angegeben, d.h. sie wurden basierend auf der effektiven Verdünnung während der Erfassung auf unverdünnte Werte umgerechnet

Weitere Quellen in Ergänzung zu den in Kapitel 2.6.3 genannten: TS und Nährstoffkonzentrationen sind hauptsächlich aus GRUD (Richner und Sinaj 2017) und in einigen Fällen (insbesondere Mischgülle) durch die NABO geschätzt.

Tabelle A6 Mittlere Konzentrationen von Nährstoffen (N, P und K) und Schwermetallen (Cu, Zn, Cd und U) in Mineraldüngern pro kg Produkt

Typ	Pro- duktNr	Mineraldünger	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
N	20000	Ammonsalpeter	270	0	0	7.1	50	0.1	0
	20004	Ammonsalpeter 33.5%	335	0	0	1.0	2	0.1	0
	20005	Ammonsulfat gr. 21% N + S	210	0	0	3.7	30	0.0	0
	20437	Harnstoff 46%	460	0	0	5.5	45	0.0	0
	20595	Ammoniumnitrat 33.5%	335	0	0	3.6	3	0.1	0
	21106	Lonza-Sol N-flüssig 39%	390	0	0	7.1	50	0.0	0
	21109	N Perlka 19% N, 40% Ca	190	0	0	4.3	46	0.1	0
P	20074	Superphosphat 19%	0	83	0	25.0	161	13.8	55
	20114	Granuphos 17%	0	74	0	17.0	129	7.5	49
	20158	Thomaskorn 24%	0	105	8	26.0	118	18.0	69
	20173	Triple Super 46%	0	201	0	45.0	299	52.0	133
	21102	Potafos	0	107	0	14.2	160	6.6	71
	21110	Dolophos 15%	0	65	0	14.2	160	6.6	43
K	20012	Kalisulfat 50 %	0	0	415	0.5	32	0.1	1
	20014	Kalimagnesia 30% + 6% Mg	0	0	249	3.4	45	0.6	1
	20148	Kalimagnesia	0	0	249	3.4	45	0.6	1
	20258	Patentkali plus 40%	0	0	332	0.1	0	0.0	1
	20446	Kalisalz 60%	0	0	498	4.8	37	0.1	1
	20447	Patentkali 0/26/5	0	0	216	45.0	40	0.1	1
	21105	Kali 40%	0	0	332	3.3	2	0.2	1
NP	20023	Diammonphosphat 18/46/0	180	201	0	9.8	60	3.0	71
	20259	NP 2 x 15 plus (Lonza)	150	65	0	12.0	12	0.2	71
	20438	NP 28/28	280	122	0	12.0	12	0.2	81
PK	20018	PK Landor 0/20/30	0	87	249	42.0	163	4.8	58
	20019	Granor 0/15/30	0	65	249	6.8	31	1.5	43
	20076	Foskal 0/15/30	0	65	249	20.0	50	2.1	43
	20098	Kalfosan 0/20/30	0	87	249	29.0	133	10.0	58
	20099	Arbellin Boro	0	35	149	8.5	78	2.6	23
	20102	Ceral 0/14/28 + 3% Mg	0	61	232	17.0	92	1.9	40
	20111	Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg	0	48	166	16.7	110	2.2	32
	20153	NP Landor 0/10/30 + 3% Mg	0	44	249	8.5	78	2.6	29
	20155	PK Foskal 0/13/26	0	57	216	20.0	50	3.1	38
	20261	PK Hyperphoskali 0/15/25	0	65	208	13.0	205	10.5	43
	20449	PK Thomaskali 0/12/11 + 3% Mg	0	44	83	7.8	98	3.4	29
	21000	PK Landor 0/20/20	0	87	166	0.0	0	5.2	58
	21114	Litho-Physalg	0	44	208	8.5	78	2.6	29

Tabelle A6 (Fortsetzung)

Typ	Pro- duktNr	Mineraldünger	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
NPK	20031	NPK Landor Spezial 6/8/24 (Promix)	60	35	199	30.0	21	0.7	23
	20034	NPK 13/13/21	130	57	174	18.0	68	2.4	38
	20035	NPK 13/13/26	130	57	216	19.0	99	8.3	38
	20057	Ferti Special	40	22	42	6.8	31	1.5	14
	20071	Printal 8/13/26	80	57	216	71.0	11	0.1	38
	20073	Carodor neu 10/10/30 (Polydor)	83	42	249	6.5	24	2.1	28
	20078	NPK Rapsdünger	50	52	199	16.0	31	6.0	35
	20079	NPK Rapsdünger (PK)	50	73	0	16.0	68	8.7	48
	20080	Ricasol 15	159	66	160	18.0	120	11.0	44
	20081	Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na	200	35	66	18.0	68	2.4	23
	20087	Montisan 6/6/12	59	38	115	8.9	120	5.0	25
	20090	Vernal Plus	200	26	50	30.0	21	0.6	17
	20093	Vignal chlorfrei	70	31	125	6.8	31	1.5	20
	20156	NPK Landor 20/10/10	200	44	83	17.0	287	7.6	29
	20157	NPK Landor 15/8/20	150	35	166	6.8	31	1.5	23
	20251	Legumor 14/6/22	136	28	187	12.0	8	0.7	19
	20333	Mulkaphos-N 6/12/20	60	52	166	16.0	64	2.8	35
	20348	Calcifert 6/10/30	60	44	249	6.8	31	1.5	29
	20349	Calcifert 13/8/25	130	35	0	0.0	0	0.0	23
	20386	Fertisan S 12/6/18	120	27	152	13.0	26	5.2	18
	20607	Vinosan	106	45	0	0.0	0	0.0	30
	20615	Vitafos	30	118	149	200.0	200	0.0	78
	20616	Foskal 7/4/35	70	17	291	16.0	62	3.8	12
	20617	Tresan Bor	130	57	174	6.8	31	1.5	38
	21101	Ideal, Fertimix	60	44	232	6.8	31	1.5	29
	21103	Polyvalent 6/12/30 + 1.5% Mg	60	52	249	16.0	57	1.2	35
	21104	NPK Uetikon 13/14/23 + 1.5% Mg	130	61	191	6.8	31	1.5	40
21107	NPK Voldünger 20/20/20	200	87	166	100.0	50	0.0	58	
21115	Plüssfert Prairie 18/5/6 + 2.5% Mg	180	22	50	0.0	0	2.2	14	
Ca	20039	Hasolit B	0	0	0	0.0	0	0.0	0
	20122	Solubor	0	0	0	0.0	0	0.0	0
	20374	Calciumchlorid	0	0	0	0.0	0	0.0	0
	22000	Ricokalk	3	4	0	2.2	16	0.2	0
Andere	20128	Algan	15	0	8	0.1	5	0.0	1

Weitere Quellen in Ergänzung zu den in Kapitel 2.6.2 genannten: Für Schwermetallkonzentrationen wurde zusätzlich zu den im Text genannten Quellen eine Bachelorarbeit (von Wartburg 2015) herangezogen. Für P-haltige Mineraldünger, für die keine U-Konzentrationsmesswerte vorlagen, wurde der Wert basierend auf dem P-Gehalt sowie dem Median der U-Konzentration in BLW (2012) von 291.2 mg U pro kg P₂O₅ (bzw. 667.2 mg U pro kg P) geschätzt.

Tabelle A7 Mittlere Trockensubstanz (TS) und Konzentrationen von Nährstoffen (N, P und K) und Schwermetallen (Cu, Zn und Cd) in Recyclingdüngern

Typ	ProduktNr	Recyclingdünger	TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	N (g kg _{TS} ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	K (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	Cd (mg kg _{TS} ⁻¹)
Klärschlamm	20200	Klärschlamm flüssig	0.03	4	2	0	347	1'501	2.0
	20201	Klärschlamm entwässert	0.06	4	2	0	347	1'501	2.0
	20900	Klärschlamm ARA Oensingen	0.05	3	1	0	295	902	1.3
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach	0.05	2	1	0	410	913	1.8
	20902	Klärschlamm ARA La Sarraz	0.05	6	2	0	447	936	1.0
	20903	Klärschlamm getrocknet La Roche	0.95	30	30	1	494	987	1.2
	20904	Klärschlamm getrocknet ARA Werdhölzli	0.90	33	29	1	475	1'064	1.8
	21112	Klärschlamm ARA Brugg	0.05	3	1	0	354	1'141	1.9
	21113	Klärschlamm ARA Leuggern	0.05	4	2	0	542	1'184	2.0
Kompost	20204	Kompost	0.49	14	2	4	51	232	0.3

Tabelle A8 Mittlere Trockensubstanz (TS) und Konzentrationen von Nährstoffen (N, P und K) und Schwermetallen (Cu, Zn und Cd) im Erntegut

Typ	ProduktNr	Erntegut	TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	N (g kg _{TS} ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	K (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	Cd (mg kg _{TS} ⁻¹)	
Getreide	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	0.88	4	1	9	4	9	0.1	
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	0.85	24	4	4	3	35	0.1	
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	0.88	4	1	10	4	9	0.1	
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	0.88	5	1	19	4	9	0.1	
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	0.85	24	4	4	3	36	0.1	
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	0.88	5	1	14	4	9	0.1	
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	0.85	17	5	5	3	29	0.0	
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	0.85	17	4	6	3	29	0.0	
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	0.88	5	1	20	4	9	0.1	
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	0.85	19	4	8	7	55	0.2	
	40028	Dinkel, Ernte Körner	0.85	19	4	4	4	45	0.0	
	40033	Winterroggen, Ernte Körner	0.85	15	3	4	4	45	0.0	
	40035	Dinkel, Ernte Stroh	0.88	6	1	11	9	4	0.1	
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	0.88	4	1	10	4	9	0.1	
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	0.85	19	5	4	3	35	0.1	
	Hackfrüchte und Leguminosen	40046	Raps, Ernte Stroh	0.85	8	2	16	3	11	0.4
		40047	Winterraps, Ernte Körner	0.90	29	8	9	3	48	0.2
		40050	Sonnenblumen, Ernte Körner	0.85	37	8	10	15	48	0.1
		40053	Sonnenblumen, Ernte Stroh	0.85	15	1	60	8	114	0.5
		40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	0.21	14	3	23	6	21	0.2
40059		Frühkartoffeln, Ernte Knollen	0.21	13	3	24	6	21	0.2	
40061		Zuckerrüben, Ernte Rüben	0.23	5	2	7	5	30	0.3	
40062		Zuckerrüben, Ernte Kraut	0.15	22	2	27	6	15	0.2	
40064		Futterrüben, Ernte Rüben	1.00	11	2	11	5	30	0.3	
40065		Futterrüben, Ernte Kraut	0.15	23	2	39	6	15	0.2	
40091		Soja, Ernte Bohnen	0.85	71	7	17	15	48	0.1	
40104		Hanf, Ernte	0.85	11	4	15	0	0	0.0	
40117		Erbsen, Ernte (Konserven)	0.18	41	7	40	10	73	0.1	
40126		Karotten, Ernte	0.12	15	3	16	5	19	0.2	
40303		Luzerne, Schnitt	1.00 ^A	35	4	20	9	40	0.1	
40304	Erbsen, Ernte	0.85	24	6	10	10	73	0.1		

Tabelle A8 (Fortsetzung)

Typ	ProduktNr	Erntegut	TS (kg _{TS} kg ⁻¹)	N (g kg _{TS} ⁻¹)	P (g kg _{TS} ⁻¹)	K (g kg _{TS} ⁻¹)	Cu (mg kg _{TS} ⁻¹)	Zn (mg kg _{TS} ⁻¹)	Cd (mg kg _{TS} ⁻¹)
Mais	40067	CCM Ernte Körner und Kolben	0.61	15	4	5	3	22	0.0
	40071	Körnermais, Ernte Körner	0.85	15	4	3	3	22	0.0
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	1.00 ^A	12	2	12	4	32	0.2
	41040	Körnermais, Ernte Stroh	0.85	9	2	19	5	39	0.0
Reben	40198	Reben, Ernte	0.19	26	5	33	206	33	0.0
Obstbau	40201	Äpfel, Ernte	0.15	9	1	11	5	23	0.0
	40206	Kirschen, Ernte	0.17	13	4	33	6	5	0.0
Gemüse	40108	Blumenkohl, Ernte	0.20	33	5	0	0	0	0.0
	40111	Bohnen, Ernte	0.10	47	6	39	6	43	0.0
	40113	Kohl, Ernte	0.05	30	4	33	6	164	0.5
	40124	Kabis, Ernte	0.08	33	3	25	3	16	0.1
	40154	Sellerie, Ernte	0.11	21	5	26	4	17	0.1
	40156	Spinat, Ernte	0.08	50	9	78	12	136	0.3
	40160	Wirz, Ernte	0.10	30	2	21	3	16	0.1
	40162	Zucchetti, Ernte	0.08	20	2	23	6	35	0.1
	40165	Zwiebeln, Ernte	0.12	17	4	28	6	18	0.1
	40181	Salat, Ernte	0.05	52	5	33	21	60	0.5
	40227	Spargel, Ernte	0.06	60	7	46	23	61	0.0
Spezialkulturen (andere)	40106	Erdbeeren, Ernte Früchte	0.11	10	6	65	11	11	0.0
Grasland	40191	Wiese, Schnitt	1.00 ^A	23	4	20	8	40	0.1
	40192	Weide, Schnitt	1.00 ^A	23	3	6	8	40	0.1
	40193	Emd	1.00 ^A	23	4	12	8	40	0.1
	40194	Heu, Schnitt	1.00 ^A	23	3	12	8	40	0.1
	40195	Grassilage (Ballen)	1.00 ^A	23	3	20	8	40	0.1
	40196	Trockengras, Schnitt	1.00 ^A	23	3	12	8	40	0.1

^A In Bewirtschaftungsdaten wird das Erntegut dieser Nutzpflanzen als TS und nicht Frischgewicht angegeben (vgl. Gross et al. 2021)

Weitere Quellen in Ergänzung zu den in Kapitel 2.6.5 genannten: Für einige Kulturen wurde auf Literaturauswertungen und 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. P-Gehalte der wichtigsten Kulturpflanzen wurden den häufig gemessenen aus GRUDAF (2001) entnommen.

A4 – Zufallsvariablen (unsichere Bilanzgrößen)

Tabelle A9 N-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in g N kg⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. g N kg⁻¹, Std. = Standardabweichung; leere Felder = Minimum und Maximum sind nicht für alle ProduktNr definiert

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.	
Hofdünger	20184	R-Stapelmist		26		4	
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.		77		21	
	20608	R-Gülle 1:1 verd.		49		7	
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm		65		10	
	20611	R-Mist Milchvieh		26		4	
	20612	R-Mist Mastvieh		26		4	
	20613	S-Gülle 1:1 verd.		120		18	
	20614	S-Mist		29		4	
	20618	Geflügelmist		52		8	
	20908	R-Gülle unverd.		49		7	
	20910	R-Harngülle		65		10	
	20913	S-Gülle unverd.		120		18	
	Mineraldünger	20000	Ammonsalpeter		270		5
		20004	Ammonsalpeter 33.5%		335		7
20005		Ammonsulfat gr. 21% N + S		210		4	
20023		Diammonphosphat 18/46/0		180		4	
20031		NPK Landor Spezial		60		1	
20034		NPK 13/13/21		130		3	
20035		NPK 13/13/26		130		3	
20071		Printal 8/13/26		80		2	
20073		Carodor neu 10/10/30		83		2	
20078		NPK Rapsdünger		50		1	
20079		NPK Rapsdünger (PK)		50		1	
20080		Ricasol 15		159		3	
20081		Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na		200		4	
20087		Montisan 6/6/12		59		1	
20090		Vernal Plus		200		4	
20156		NPK Landor 20/10/10		200		4	
20251		Legumor 14/6/22		136		3	
20333		Mulkaphos-N 6/12/20		60		1	
20348		Calcifert 6/10/30		60		1	
20349		Calcifert 13/8/25		130		3	
20386		Fertisan S 12/6/18		120		2	
20437		Harnstoff 46%		460		9	
20595		Ammoniumnitrat 33.5%		335		7	
20607		Vinosan		106		2	
20615		Vitafos		30		1	
20616		Foskal 7/4/35		70		1	
20617		Tresan Bor		130		3	
Mineraldünger	21101	Ideal, Fertimix		60		1	
	21103	Polyvalent 6/12/30 + 1.5% Mg		60		1	
	21106	Lonza-Sol N-flüssig 39%		390		8	
	21109	N Perlka 19% N, 40% Ca		190		4	
	21115	Plüßfert Prairie 18/5/6 + 2.5% Mg		180		4	
	22000	Ricokalk		3		0	

Tabelle A9 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Recyclingdünger	20200	Klärschlamm flüssig		4		1
	20201	Klärschlamm entwässert		3		0
	20204	Kompost		14		2
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach		2		0
	20902	Klärschlamm ARA La Sarraz		6		1
	20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli		33		5
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	4	4	8	1
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	18	24	29	4
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	4	4	8	1
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	4	5	8	1
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	21	24	31	4
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	4	5	7	1
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	15	17	20	3
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	12	17	19	3
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	4	5	8	1
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	15	19	22	3
	40028	Dinkel, Ernte Körner	16	19	21	3
	40035	Dinkel, Ernte Stroh	4	6	8	1
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	4	4	12	1
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	18	19	24	3
	40046	Raps, Ernte Stroh	6	8	12	1
	40047	Winterraps, Ernte Körner	29	29	38	4
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	9	14	18	2
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen	6	13	17	2
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben	5	5	14	1
	40062	Zuckerrüben, Ernte Kraut	13	22	27	3
	40064	Futterrüben, Ernte Rüben	9	11	13	2
	40065	Futterrüben, Ernte Kraut	13	23	33	3
	40067	CCM Ernte Körner und Kolben	13	15	18	2
	40071	Körnermais, Ernte Körner	13	15	18	2
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	10	12	15	2
	40091	Soja, Ernte Bohnen	53	71	88	11
	40117	Erbsen, Ernte (Konserven)	35	41	47	6
	40126	Karotten, Ernte		15		2
	40154	Sellerie, Ernte		21		3
	40156	Spinat, Ernte		50		8
	40165	Zwiebeln, Ernte		17		3
	40191	Wiese, Schnitt		23		3
	40192	Weide, Schnitt	20	23	36	3
	40193	Emd	20	23	36	3
	40194	Heu, Schnitt	20	23	36	3
	40195	Grassilage (Ballen)	20	23	36	3
40196	Trockengras, Schnitt	20	23	36	3	
40198	Reben, Ernte		26		4	
40201	Äpfel, Ernte		9		1	
40900	Winterroggen, Ernte Stroh	4	4	8	1	
41040	Körnermais, Ernte Stroh	5	9	9	1	

Tabelle A10 P-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in g P kg_{TS}⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. g P kg⁻¹, Std. = Standardabweichung; leere Felder = Minimum und Maximum sind nicht für alle ProduktNr definiert

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Hofdünger	20184	R-Stapelmist		7		1
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.		17		3
	20608	R-Gülle 1:1 verd.	9	9	18	2
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm		5		1
	20611	R-Mist Milchvieh	2	7	12	2
	20612	R-Mist Mastvieh	3	7	10	2
	20613	S-Gülle 1:1 verd.		25		4
	20614	S-Mist	5	11	20	4
	20618	Geflügelmist		12		2
	20908	R-Gülle unverd.	9	9	18	2
	20910	R-Harngülle		5		1
	20913	S-Gülle unverd.		25		4
	Mineraldünger	20018	PK Landor 0/20/30		87	
20023		Diammonphosphat 18/46/0		201		4
20031		NPK Landor Spezial		35		1
20034		NPK 13/13/21		57		1
20035		NPK 13/13/26		57		1
20071		Printal 8/13/26		57		1
20073		Carodor neu 10/10/30		42		1
20074		Superphosphat 19%		83		2
20076		Foskal 0/15/30		65		1
20078		NPK Rapsdünger		52		1
20079		NPK Rapsdünger (PK)		73		1
20080		Ricasol 15		66		1
20081		Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na		35		1
20087		Montisan 6/6/12		38		1
20090		Vernal Plus		26		1
20098		Kalfosan 0/20/30		87		2
20099		Arbellin Boro		35		1
20102		Ceral 0/14/28 + 3% Mg		61		1
20111		Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg		48		1
20114		Granuphos 17%		74		1
20153		NP Landor 0/10/30 +		44		1
20155		PK Foskal 0/13/26		57		1
20156		NPK Landor 20/10/10		44		1
20158		Thomaskorn 24%		105		2
20173		Triple Super 46%		201		4
20251		Legumor 14/6/22		28		1
20261		PK Hyperphoskali 0/15/25		65		1
20333		Mulkaphos-N 6/12/20		52		1
20348		Calcifert 6/10/30		44		1
20349		Calcifert 13/8/25		35		1
20386		Fertisan S 12/6/18		27		1
20449		PK Thomaskali 0/12/11		44		1
20607		Vinosan		45		1
20615		Vitafos		118		2
20616	Foskal 7/4/35		17		0	

Tabelle A10 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Mineraldünger	20617	Tresan Bor		57		1
	21101	Ideal, Fertimix		44		1
	21102	Potafos		107		2
	21103	Polyvalent 6/12/30 + 1.5% Mg		52		1
	21114	Litho-Physalg		44		1
	21115	Plüssfert Prairie 18/5/6 + 2.5% Mg		22		0
	22000	Ricokalk		4		0
Recyclingdünger	20200	Klärschlamm flüssig		2		0
	20201	Klärschlamm entwässert	2	2	2	0
	20204	Kompost		2		0
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach	1	1	1	0
	20902	Klärschlamm ARA La Sarraz		2		0
20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli	27	29	35	4	
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	4	4	5	1
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	4	4	5	1
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	4	5	5	1
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	4	4	5	1
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	1	1	2	0
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	4	4	5	1
	40028	Dinkel, Ernte Körner	4	4	5	1
	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	4	4	5	1
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	4	4	5	1
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	4	5	5	1
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	4	4	5	1
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	1	1	2	0
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	4	4	5	1
	40028	Dinkel, Ernte Körner	4	4	5	1
	40035	Dinkel, Ernte Stroh	1	1	1	0
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	1	1	2	0
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	4	5	6	1
	40046	Raps, Ernte Stroh		2		0
	40047	Winterraps, Ernte Körner	6	8	9	1
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	2	3	4	0
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen	2	3	4	0
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben	1	2	2	0
	40062	Zuckerrüben, Ernte Kraut		2		0
	40064	Futterrüben, Ernte Rüben	2	2	3	0
	40065	Futterrüben, Ernte Kraut		2		0
40067	CCM Ernte Körner und Kolben	3	4	6	1	
40071	Körnermais, Ernte Körner		4		1	
40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	2	2	3	0	
40091	Soja, Ernte Bohnen		7		1	
40117	Erbsen, Ernte (Konserven)		7		1	
40126	Karotten, Ernte		3		0	

Tabelle A10 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Erntegut	40154	Sellerie, Ernte		5		1
	40156	Spinat, Ernte		9		1
	40165	Zwiebeln, Ernte		4		1
	40191	Wiese, Schnitt		4		1
	40192	Weide, Schnitt		3		1
	40193	Emd		4		1
	40194	Heu, Schnitt	3	3	3	0
	40195	Grassilage (Ballen)	3	3	4	1
	40196	Trockengras, Schnitt		3		1
	40198	Reben, Ernte		5		1
	40201	Äpfel, Ernte		1		0
	40900	Winterroggen, Ernte Stroh	1	1	1	0
	41040	Körnermais, Ernte Stroh		2		0

Tabelle A11 K-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in g K kg_{TS}⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. g K kg⁻¹, Std. = Standardabweichung; leere Felder = Minimum und Maximum sind nicht für alle ProduktNr definiert

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Hofdünger	20184	R-Stapelmist		31		5
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.		166		25
	20608	R-Gülle 1:1 verd.		74		11
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm		133		20
	20611	R-Mist Milchvieh		43		6
	20612	R-Mist Mastvieh		28		4
	20613	S-Gülle 1:1 verd.		42		6
	20614	S-Mist		26		4
	20618	Geflügelmist		18		3
	20908	R-Gülle unverd.		74		11
	20910	R-Harngülle		249		37
Mineraldünger	20012	Kalisulfat 50 %		415		8
	20014	Kalimagnesia 30% + 6% Mg		249		5
	20018	PK Landor 0/20/30		249		5
	20031	NPK Landor Spezial		199		4
	20034	NPK 13/13/21		174		3
	20035	NPK 13/13/26		216		4
	20071	Printal 8/13/26		216		4
	20073	Carodor neu 10/10/30		249		5
	20076	Foskal 0/15/30		249		5
	20078	NPK Rapsdünger		199		4
	20080	Ricasol 15		160		3
	20081	Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na		66		1
	20087	Montisan 6/6/12		115		2
	20090	Vernal Plus		50		1
	20098	Kalfosan 0/20/30		249		5
	20099	Arbellin Boro		149		3
	20102	Ceral 0/14/28 + 3% Mg		232		5
	20111	Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg		166		3
	20148	Kalimagnesia		249		5
	20153	NP Landor 0/10/30 + 3% Mg		249		5
	20155	PK Foskal 0/13/26		216		4
	20156	NPK Landor 20/10/10		83		2
	20158	Thomaskorn 24%		8		0
	20251	Legumor 14/6/22		187		4
	20258	Patentkali plus 40%		332		7
	20261	PK Hyperphoskali 0/15/25		208		4
	20333	Mulkaphos-N 6/12/20		166		3
	20348	Calcifert 6/10/30		249		5
	20386	Fertisan S 12/6/18		152		3
	20446	Kalisalz 60 %		498		10
	20447	Patentkali 0/26/5		216		4
	20449	PK Thomaskali 0/12/11 + 3% Mg		83		2
	20615	Vitafos		149		3
20616	Foskal 7/4/35		291		6	
20617	Tresan Bor		174		3	
21101	Ideal, Fertimix		232		5	
21103	Polyvalent 6/12/30 + 1.5% Mg		249		5	

Tabelle A11 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Mineraldünger	21114	Litho-Physalg		208		4
	21115	Plüssfert Prairie 18/5/6 + 2.5% Mg		50		1
	22000	Ricokalk		0		0
Recyclingdünger	20201	Klärschlamm entwässert		0		0
	20204	Kompost		4		1
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach		0		0
	20902	Klärschlamm ARA La Sarraz		0		0
	20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli		1		0
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh		9		1
	40007	Winterweizen, Ernte Körner		4		1
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh		10		2
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh		19		3
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner		4		1
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh		14		2
	40017	Wintergerste, Ernte Körner		5		1
	40021	Sommergerste, Ernte Körner		6		1
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh		20		3
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner		8		1
	40028	Dinkel, Ernte Körner		4		1
	40035	Dinkel, Ernte Stroh		11		2
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh		10		2
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner		4		1
	40046	Raps, Ernte Stroh		16		2
	40047	Winterraps, Ernte Körner		9		1
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen		23		3
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen		24		4
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben		7		1
	40062	Zuckerrüben, Ernte Kraut		27		4
	40064	Futterrüben, Ernte Rüben		11		2
	40065	Futterrüben, Ernte Kraut		39		6
	40067	CCM Ernte Körner und Kolben		5		1
	40071	Körnermais, Ernte Körner		3		1
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze		12		2
	40091	Soja, Ernte Bohnen		17		3
	40117	Erbsen, Ernte (Konserven)		40		6
	40126	Karotten, Ernte		16		2
	40154	Sellerie, Ernte		26		4
	40156	Spinat, Ernte		78		12
	40165	Zwiebeln, Ernte		28		4
	40191	Wiese, Schnitt		20		3
	40192	Weide, Schnitt		6		1
	40193	Emd		12		2
	40194	Heu, Schnitt		12		2
	40195	Grassilage (Ballen)		20		3
	40196	Trockengras, Schnitt		12		2
	40198	Reben, Ernte		33		5
	40201	Äpfel, Ernte		11		2
	40900	Winterroggen, Ernte Stroh		11		2
41040	Körnermais, Ernte Stroh		19		3	

Tabelle A12 Cu-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in mg Cu kg_{TS}⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. mg Cu kg⁻¹, Std. = Standardabweichung

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Hofdünger	20184	R-Stapelmist	3	26	88	12
	20608	R-Gülle 1:1 verd.	13	37	160	37
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm	1	19	188	35
	20611	R-Mist Milchvieh	3	24	80	10
	20612	R-Mist Mastvieh	15	22	51	9
	20613	S-Gülle 1:1 verd.	30	117	376	81
	20614	S-Mist	38	125	501	110
	20908	R-Gülle unverd.	13	37	160	37
	20910	R-Harngülle	19	29	71	23
	20913	S-Gülle unverd.	30	117	376	81
Mineraldünger	20000	Ammonsalpeter	2	7	16	2
	20023	Diammonphosphat 18/46/0	6	10	13	3
	20034	NPK 13/13/21	8	18	50	5
	20074	Superphosphat 19%	22	25	30	4
	20081	Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na	5	18	50	5
	20111	Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg	14	17	22	5
	20446	Kalisalz 60 %	1	5	11	3
	21106	Lonza-Sol N-flüssig 39%	2	7	16	2
	22000	Ricokalk	0	2	2	1
Recyclingdünger	20201	Klärschlamm entwässert	328	347	361	17
	20204	Kompost	38	51	73	14
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach	376	410	444	48
	20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli	374	475	526	48
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	1	3	6	1
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	3	3	6	1
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	1	3	6	1
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	1	3	6	1
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	5	7	7	1
	40028	Dinkel, Ernte Körner	3	4	5	1
	40035	Dinkel, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	1	3	6	1
	40047	Winterraps, Ernte Körner	3	3	4	0
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	3	6	13	4
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen	3	6	13	4
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben	2	5	11	2
	40064	Futterrüben, Ernte Rüben	2	5	11	2

Tabelle A12 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Erntegut	40067	CCM Ernte Körner und Kolben	2	3	4	1
	40071	Körnermais, Ernte Körner	2	3	4	1
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	2	4	11	2
	40156	Spinat, Ernte	2	12	23	4
	40191	Wiese, Schnitt	2	8	16	3
	40192	Weide, Schnitt	2	8	16	3
	40193	Emd	2	8	16	3
	40194	Heu, Schnitt	2	8	16	3
	40195	Grassilage (Ballen)	2	8	16	3
	40196	Trockengras, Schnitt	2	8	16	3
	40900	Winterrogen, Ernte Stroh	2	4	10	1

Tabelle A13 Zn-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in mg Zn kg⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. mg Zn kg⁻¹, Std. = Standardabweichung

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Hofdünger	20184	R-Stapelmist	45	129	453	65
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.	123	214	552	226
	20608	R-Gülle 1:1 verd.	102	162	395	162
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm	44	123	716	75
	20611	R-Mist Milchvieh	41	118	412	59
	20612	R-Mist Mastvieh	49	91	448	88
	20613	S-Gülle 1:1 verd.	337	747	2'490	339
	20614	S-Mist	146	1'370	5'513	1'641
	20908	R-Gülle unverd.	102	162	395	162
	20910	R-Harngülle	44	123	716	75
	20913	S-Gülle unverd.	337	747	2'490	339
	Mineraldünger	20000	Ammonsalpeter	27	50	63
20005		Ammonsulfat gr. 21% N + S	9	30	38	6
20023		Diammonphosphat 18/46/0	48	60	93	22
20034		NPK 13/13/21	30	68	211	14
20074		Superphosphat 19%	152	161	170	9
20081		Suplesan, 20/8/8/2 + 2% Na	30	68	211	14
20111		Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg	76	110	154	40
20446		Kalisalz 60 %	5	37	70	22
21103		Polyvalent 6/12/30 + 1.5% Mg	20	57	90	12
21106		Lonza-Sol N-flüssig 39%	27	50	63	10
20111		Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg	90	238	390	50
22000	Ricokalk	0	16	16	3	
Recyclingdünger	20201	Klärschlamm entwässert	1'412	1'501	1'590	126
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach	786	913	1'040	180
	20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli	878	1'064	1'256	101
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	12	35	61	10
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	13	36	53	10
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	20	29	54	8
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	20	29	54	8
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	46	55	56	5
	40028	Dinkel, Ernte Körner	25	45	83	18

Tabelle A13 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Erntegut	40035	Dinkel, Ernte Stroh	2	4	10	1
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	3	9	16	2
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	12	35	61	10
	40047	Winterraps, Ernte Körner	46	48	50	2
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	12	21	40	7
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen	12	21	40	7
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben	15	30	57	12
	40064	Futtermüben, Ernte Rüben	15	30	57	12
	40067	CCM Ernte Körner und Kolben	18	22	36	6
	40071	Körnermais, Ernte Körner	18	22	36	6
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	11	32	152	17
	40156	Spinat, Ernte	16	136	256	40
	40191	Wiese, Schnitt	13	40	78	12
	40192	Weide, Schnitt	13	40	78	12
	40193	Emd	13	40	78	12
	40194	Heu, Schnitt	13	40	78	12
	40195	Grassilage (Ballen)	13	40	78	12
	40196	Trockengras, Schnitt	13	40	78	12
	40900	Winterroggen, Ernte Stroh	3	9	16	2

Tabelle A14 Cd-Konzentrationen der Zufallsvariablen nach ProduktNr pro Kategorie sortiert; R = Rinder, S = Schweine, Werte in mg Cd kg_{TS}⁻¹ (Hofdünger, Recyclingdünger und Erntegut) bzw. mg Cd kg⁻¹, Std. = Standardabweichung

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Hofdünger	20184	R-Stapelmist	0.0	0.2	3.4	0.1
	20218	Mischgülle R/S 1:1 verd.	0.2	0.4	0.5	0.1
	20608	R-Gülle 1:1 verd.	0.1	0.2	3.2	0.2
	20609/ 20909	R-Gülle kotarm	0.1	0.2	1.5	0.2
	20611	R-Mist Milchvieh	0.0	0.2	3.1	0.4
	20612	R-Mist Mastvieh	0.1	0.2	0.6	0.1
	20613	S-Gülle 1:1 verd.	0.1	0.2	0.5	0.1
	20614	S-Mist	0.1	0.1	0.4	0.1
	20908	R-Gülle unverd.	0.1	0.2	3.2	0.2
	20910	R-Harngülle	0.1	0.3	0.6	0.2
	20913	S-Gülle unverd.	0.1	0.2	0.5	0.1
	Mineraldünger	20023	Diammonphosphat 18/46/0	0.1	3.0	7.5
20074		Superphosphat 19%	9.3	13.8	22.0	7.1
20111		Thomaskali 0/11/20 + 1.8% Mg	0.1	2.2	3.6	1.9
20446		Kalisalz 60 %	0.1	0.1	0.2	0.0
22000		Ricokalk	0.0	0.2	0.0	0.1
Recyclingdünger	20200	Klärschlamm flüssig	1.3	1.7	9.0	3.4
	20201	Klärschlamm entwässert	1.6	2.0	16.0	8.2
	20901	Klärschlamm ARA Zurzach	1.6	1.8	1.9	0.2
	20904	Klärschlamm getrocknet Werdhölzli	1.4	1.8	2.2	0.2
Erntegut	40006	Winterweizen, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40007	Winterweizen, Ernte Körner	0.0	0.1	0.4	0.1
	40008	Sommerweizen, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40009	Sommergerste, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40010	Sommerweizen, Ernte Körner	0.0	0.1	0.5	0.1
	40014	Wintergerste, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40017	Wintergerste, Ernte Körner	0.0	0.0	0.2	0.0
	40021	Sommergerste, Ernte Körner	0.0	0.0	0.2	0.0
	40024	Sommerhafer, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40025	Sommerhafer, Ernte Körner	0.1	0.2	0.2	0.0
40028	Dinkel, Ernte Körner	0.0	0.0	0.1	0.0	

Tabelle A14 (Fortsetzung)

Kategorie	ProduktNr	Hilfsstoff oder Kultur	Minimum	Mittelwert	Maximum	Std.
Erntegut	40035	Dinkel, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40040	Wintertriticale, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0
	40041	Wintertriticale, Ernte Körner	0.0	0.1	0.4	0.1
	40047	Winterraps, Ernte Körner	0.1	0.2	0.2	0.1
	40055	Speisekartoffeln, Ernte Knollen	0.0	0.2	0.4	0.1
	40059	Frühkartoffeln, Ernte Knollen	0.0	0.2	0.4	0.1
	40061	Zuckerrüben, Ernte Rüben	0.0	0.3	0.8	0.2
	40064	Futtermüben, Ernte Rüben	0.0	0.3	0.8	0.2
	40067	CCM Ernte Körner und Kolben	0.0	0.0	0.1	0.0
	40071	Körnermais, Ernte Körner	0.0	0.0	0.1	0.0
	40079	Silomais, Ernte ganze Pflanze	0.0	0.2	0.5	0.1
	40117	Erbsen, Ernte (Konserven)	0.1	0.1	0.1	0.0
	40156	Spinat, Ernte	0.0	0.3	2.0	0.2
	40191	Wiese, Schnitt	0.0	0.1	0.4	0.1
	40192	Weide, Schnitt	0.0	0.1	0.4	0.1
	40193	Emd	0.0	0.1	0.4	0.1
	40194	Heu, Schnitt	0.0	0.1	0.4	0.1
	40195	Grassilage (Ballen)	0.0	0.1	0.4	0.1
	40196	Trockengras, Schnitt	0.0	0.1	0.4	0.1
	40900	Winterroggen, Ernte Stroh	0.0	0.1	0.6	0.0