



Nährstoffbilanzvergleich

**Betriebsbilanzierung von Stickstoff und Phosphor
anhand zweier unterschiedlicher Methoden: Suisse-
Bilanz und Bodenoberflächenbilanz**

Autoren und Autorinnen

Simon Baumgartner, Anina Gilgen, Carole Epper, Lutz Merbold,
Frank Liebisch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	simon.baumgartner@agroscope.admin.ch
Titelbild	Gabriela Brändle
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2025
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as205

Haftungsausschluss:

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
Riassunto	7
1 Hintergrund und Ziele	8
1.1 Nährstoffüberschüsse und Umweltprobleme	8
1.2 Konzept Nährstoffbilanzierung	8
1.3 Nährstoffbilanzierung in der Schweiz	10
1.4 Ziel und Aufbau der vorliegenden Arbeit	11
2 Methodische Grundlagen der Nährstoffbilanzierung	12
2.1 Bodenoberflächenbilanz im Agrarumweltmonitoring	12
2.2 Suisse-Bilanz im Agrarvollzug	12
3 Datengrundlage & -analyse	14
3.1 Datengrundlage	14
3.2 Auswertung/Analyse	14
3.2.1 Bodenoberflächenbilanz	14
3.2.2 Suisse-Bilanz	16
3.2.3 Datenqualitätskontrollen	16
3.2.4 Statistik	17
4 Resultate & Diskussion	18
4.1 Bilanzresultate & -vergleich	18
4.1.1 Stickstoff	18
4.1.2 Phosphor	21
4.2 Unterschiede nach Betriebstypen und -management	24
4.3 Plausibilität und Nutzbarkeit der Daten	27
4.3.1 Quantitative Einordnung und Plausibilität	27
4.3.2 Einsatz der Bilanzierungsansätze zur Bewertung nationaler Zielgrössen	28
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	31
6 Literaturverzeichnis	32
7 Anhang	34

Zusammenfassung

Seit Jahrzehnten sind überschüssige Nährstoffe aus der Landwirtschaft, vor allem Stickstoff (N) und Phosphor (P), ein zentrales Thema in der Agrar- und Umweltpolitik der Schweiz und Europa. Diese Überschüsse führen zu Verlusten in die Umwelt und tragen dementsprechend zu Eutrophierung, Biodiversitätsverlust und Klimaerwärmung bei. Ziel ist es, ein Gleichgewicht zwischen der Nutzung von Nährstoffen zur Ernährungssicherung und der Minimierung ihrer negativen Umweltauswirkungen zu finden. Nährstoffbilanzen helfen, Nährstoffüberschüsse respektive -verluste zu quantifizieren. In der Schweiz werden verschiedene Bilanzierungsmodelle auf verschiedenen Ebenen verwendet. Dazu gehören die Bodenoberflächenbilanz (OECD-Bilanz), die für das betriebliche sowie nationale Agrarumweltmonitoring genutzt wird, sowie die Suisse-Bilanz, eine Anfall-Bedarfs-Bilanz, die im Rahmen der Direktzahlungsverordnung vom Bundesamt für Landwirtschaft für den Ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) auf Betriebsebene verwendet wird. Ziel dieser Arbeit war es, einzelbetriebliche Suisse-Bilanzen mit den Bodenoberflächenbilanzen für N und P zu vergleichen, um aufzuzeigen, inwiefern die Suisse-Bilanz als Agrarumweltindikator für die nachhaltige Nährstoffnutzung geeignet ist. Im Detail wurde analysiert, wie das Betriebsmanagement und die Betriebsstruktur sich auf die beiden Bilanzen auswirken. Gleichzeitig wurden Unterschiede in den jeweils zu Grunde liegenden Methoden aufgezeigt. Die Daten für den Vergleich stammen aus der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI), die von 2009 bis 2022 Betriebsdaten (jährlich ca. 300 Betriebe) sammelte.

Die N-Salden der Bodenoberflächenbilanz waren über die Beobachtungsjahre im Median positiv (zwischen 58 und 83 kg N_{tot} ha⁻¹) und zeigten über die Zeit einen Trend zu leicht reduzierten Werten. Dagegen waren die Suisse-Bilanzen für N im Median leicht negativ (zwischen -14 und -2 kg N_{verf} ha⁻¹) und zeigten denselben Trend, mit leicht abnehmenden Bilanzen über die Zeit. Da in der Suisse-Bilanz für organische Dünger verschiedene Abzüge (z.B. für Stall-, Lagerungs-, Weide- und Feldverluste) geltend gemacht werden können, war die Korrelation der beiden Bilanzen schwach. In der Oberflächenbilanz werden diese Verluste nicht abgezogen und fallen somit als Teil vom Saldo an. Somit wiesen Betriebe, welche verhältnismässig viel organische Dünger einsetzten und/oder einen hohen Tierbestand hatten, generell höhere Bodenoberflächenbilanzen auf, während die Suisse-Bilanzen diesen Unterschied nicht aufzeigten. Die Salden der P-Bodenoberflächenbilanzen waren im Median und über die Jahre ausgeglichen (zwischen -2 und 0 kg P ha⁻¹), während die Suisse-Bilanzen leicht negativ waren (zwischen -3 und -1 kg P ha⁻¹ LN). Die Korrelation der beiden Bilanzen war für P bedeutend besser als für N, da für P keine Abzüge in der Suisse-Bilanz geltend gemacht werden können.

Unsere Analysen zeigten, dass der Suisse-Bilanz-Saldo in seiner jetzigen Form nicht geeignet ist, N-Verluste verlässlich zu quantifizieren. Die Pauschalabzüge auf Ebene Stall und Lager und die lückenhafte Kaskade der N-Verluste bei den organischen Düngern verhindern eine spezifische Darstellung der tatsächlichen N-Verluste. Die Bodenoberflächenbilanz bietet eine bessere Grundlage für die Bewertung von Stickstoffüberschüssen. Durch das Anrechnen der Abzüge in der Suisse-Bilanz an deren Saldo könnte eine genauere Abschätzung der Verluste erreicht werden. Für P hingegen ist die Suisse-Bilanz ein nützlicher Umweltindikator, da sie eng mit der Bodenoberflächenbilanz verknüpft ist. Eine zusätzliche Berücksichtigung der obligatorischen, wiederkehrenden Bodenanalysen im Rahmen des ÖLN kann die Berechnung von regionalen Phosphorüberschüssen weiter verbessern. Stand heute stehen jedoch weder die Suisse-Bilanz-Saldi der Betriebe noch die Bodenanalysen auf Betriebsebene dem Agrarumweltmonitoring zur Verfügung.

Résumé

Depuis des décennies, les excédents d'éléments nutritifs issus de l'agriculture, et plus particulièrement l'azote (N) et le phosphore (P), sont l'une des préoccupations majeures de la politique agricole et environnementale en Suisse, comme en Europe. Ces excédents entraînent des pertes dans l'environnement et contribuent ainsi à l'eutrophisation, à l'appauvrissement de la biodiversité et au réchauffement climatique. L'objectif est de trouver un équilibre entre l'utilisation d'éléments nutritifs contribuant à la sécurité alimentaire et la réduction de leur impact négatif sur l'environnement. Les bilans d'éléments nutritifs aident à quantifier les excédents et les pertes. La Suisse recourt à différents modèles de bilans, et ce à différentes échelles. Parmi ceux-ci figurent notamment le bilan à la surface du sol (bilan OCDE), utilisé pour le monitoring agro-environnemental à l'échelle nationale et des exploitations, ainsi que le Suisse-Bilanz qui est un bilan des besoins et apports à l'échelle des exploitations, utilisé par l'Office fédéral de l'agriculture pour les prestations écologiques requises (PER), dans le cadre de l'ordonnance sur les paiements directs. L'objectif de cette étude était de comparer les Suisse-Bilanz établis à l'échelle des exploitations avec les bilans à la surface du sol pour l'azote et le phosphore, afin d'identifier dans quelle mesure le modèle Suisse-Bilanz se prête comme indicateur agro-environnemental pour une utilisation durable des éléments nutritifs. L'étude a analysé en détail la manière dont la gestion et la structure de l'exploitation se reflétaient sur les deux modèles de bilans. Parallèlement, elle a mis en évidence des différences dans les méthodes adoptées. Les données utilisées pour la comparaison proviennent du dépouillement centralisé des indicateurs agro-environnementaux (DC-IAE) qui a collecté les données de près de 300 exploitations par année, entre 2009 et 2022.

Durant les années d'observation, les soldes médians des bilans d'azote à la surface du sol étaient positifs (entre 58 et 83 kg N_{tot} ha⁻¹) et montraient une légère tendance à la baisse au fil du temps. Les Suisse-Bilanz affichaient par contre des soldes médians d'azote légèrement négatifs (entre -14 et -2 kg N_{disp} ha⁻¹) avec une même tendance baissière sur la durée. Le modèle Suisse-Bilanz admettant différentes déductions pour les engrais organiques (p. ex. pour les pertes à l'étable, au stockage, au pâturage et au champ), la corrélation entre les deux bilans n'était que faible. Dans le bilan à la surface du sol, ces pertes ne sont pas déduites et sont donc comptabilisées dans le solde. Ainsi, les exploitations qui utilisaient proportionnellement beaucoup d'engrais organiques et/ou qui avaient un cheptel important présentaient des bilans à la surface du sol généralement plus élevés que les autres, alors que les Suisse-Bilanz ne montraient pas cette différence. Les soldes médians des bilans de phosphore à la surface du sol étaient équilibrés sur la durée (entre -2 et 0 kg P ha⁻¹), alors qu'ils étaient légèrement négatifs dans les Suisse-Bilanz (entre -3 et -1 kg P ha⁻¹ SAU). La corrélation entre les deux modèles était nettement meilleure pour le phosphore que pour l'azote, car le modèle Suisse-Bilanz ne prévoit aucune déduction pour le phosphore.

Nos analyses ont montré que le modèle Suisse-Bilanz, dans sa forme actuelle, n'est pas adapté pour quantifier de manière fiable les pertes d'azote. Les déductions forfaitaires au niveau de l'étable et du stockage ainsi que la cascade incomplète d'informations sur les pertes d'azote dans les engrais organiques empêchent une interprétation spécifique des pertes effectives d'azote. Le bilan à la surface du sol offre une meilleure base pour l'évaluation des excédents d'azote. En comptabilisant les déductions dans le Suisse-Bilanz, on pourrait obtenir une estimation plus précise des pertes. Le Suisse-Bilanz est par contre un indicateur environnemental utile pour le phosphore, car il est étroitement corrélé au bilan à la surface du sol. La prise en compte des analyses de sol périodiques, obligatoires dans le cadre des PER, permettrait d'améliorer encore le calcul des excédents régionaux de phosphore. Cependant, à l'heure actuelle, ni les soldes Suisse-Bilanz des exploitations, ni les analyses de sol à l'échelle des exploitations ne sont disponibles pour le monitoring agro-environnemental.

Summary

Excess nutrients from agriculture, especially nitrogen (N) and phosphorus (P), have been a key topic in the agricultural and environmental policy of Switzerland and Europe for decades. These surpluses lead to losses into the environment and consequently contribute to eutrophication, biodiversity loss and global warming. The aim is to strike a balance between the use of nutrients for food security and the minimisation of their negative environmental impacts. Nutrient balances help us quantify both nutrient surpluses and losses. In Switzerland, different types of nutrient balances are used at different scales. These include the soil surface balance (OECD balance), used for both farm and national agri-environmental monitoring, and Suisse-Bilanz, an demand-supply balance used by the Federal Office for Agriculture within the context of the Direct Payment Ordinance for the Proof of Ecological Performance (PEP) at farm scale. The aim of this paper was to compare individual-farm Suisse-Bilanz balances with the soil-surface balances for N and P in order to determine the extent which Suisse-Bilanz is suitable as an agri-environmental indicator for sustainable nutrient use. The manner in which farm management and farm structure affected both balances was analysed in detail. At the same time, differences in their respective underlying methods were highlighted. The data for the comparison stem from the Swiss Agri-Environmental Data Network (SAEDN), which collected farm data annually from around 300 farms from 2009 until 2022.

Median N balances of the soil-surface balance were positive (between 58 and 83 kg N_{tot} ha⁻¹) over the observed years and showed a trend towards slightly reduced values over time. By contrast, the median Suisse-Bilanz balances for N were slightly negative (between -14 and -2 kg N_{avail} ha⁻¹) and showed the same trend, with slightly decreasing balances over time. Since various deductions (e.g. for losses from animal housing, storage, pasture and field) can be claimed for organic fertilisers in Suisse-Bilanz, the two balances were only weakly correlated. In the surface balance these losses are not deducted, and are therefore included as part of the balance. Consequently, farms which used relatively large amounts of organic fertilisers and/or had large herds generally had higher soil-surface balances, while the Suisse Bilanz balances did not show this difference. The P soil-surface balances remained stable at the median and over the years (between -2 and 0 kg P ha⁻¹), whilst the Suisse-Bilanz balances were slightly negative (between -3 and -1 kg P ha⁻¹ UAA). The two balances correlated significantly better for P than for N, since no deductions can be claimed in Suisse-Bilanz for P.

Our analyses showed that in its current form, the Suisse-Bilanz balance is not suitable for reliably quantifying N losses. The flat-rate deductions at housing and storage scales and the incomplete cascade of N losses for the organic fertilisers prevent a specific representation of the actual N losses. The soil-surface balance offers a better basis for evaluating nitrogen surpluses. A more accurate estimate of the losses could be obtained by offsetting the deductions in the balance of the Suisse-Bilanz. By contrast, the Suisse-Bilanz is a useful environmental indicator for P, since it is closely linked to the soil-surface balance. An additional consideration of the compulsory recurring soil analyses within the context of the PEP can further improve the calculation of regional phosphorus surpluses. As things currently stand, however, neither the Suisse-Bilanz balances of the farms nor the farm-scale soil analyses are available to the agri-environmental monitoring programme.

Riassunto

Da decenni i surplus di sostanze nutritive, soprattutto di azoto (N) e fosforo (P), in agricoltura sono un tema centrale della politica agricola e ambientale svizzera ed europea. Queste eccedenze provocano perdite nell'ambiente e di conseguenza contribuiscono all'eutrofizzazione, alla perdita di biodiversità e al riscaldamento climatico. L'obiettivo è trovare un equilibrio tra l'uso di sostanze nutritive per la garanzia dell'approvvigionamento alimentare e la riduzione al minimo del loro impatto negativo sull'ambiente. I bilanci delle sostanze nutritive aiutano a quantificare le eccedenze e le perdite di sostanze nutritive. In Svizzera si utilizzano vari modelli di bilanciamento a diversi livelli. Tra questi vi sono il bilancio sullo strato superficiale del suolo (bilancio OCSE), utilizzato per il monitoraggio aziendale e quello agroambientale nazionale, e Suisse-Bilanz, un bilancio produzione-fabbisogno utilizzato a livello aziendale nell'ambito dell'ordinanza sui pagamenti diretti dell'Ufficio federale dell'agricoltura per la prova che le esigenze ecologiche sono rispettate (PER). L'obiettivo del presente lavoro era mettere a confronto, a livello di singole aziende, i Suisse-Bilanz con i bilanci OCSE per N e P al fine di dimostrare in che misura il Suisse-Bilanz sia adatto come indicatore agroambientale per un uso sostenibile delle sostanze nutritive. Nel dettaglio sono stati analizzati gli effetti della gestione e della struttura aziendale sui due bilanci. Al contempo, sono state illustrate le differenze alla base dei due metodi. I dati per il confronto provengono dall'analisi centralizzata degli indicatori agroambientali (AC-IAA), che dal 2009 al 2022 ha rilevato dati di aziende agricole (circa 300 aziende all'anno).

Negli anni di osservazione, la mediana dei saldi di N del bilancio OCSE era positiva (tra 58 e 83 kg N_{tot} ha⁻¹), con una leggera tendenza al ribasso nel tempo. Al contrario, la mediana dei Suisse-Bilanz di N era leggermente negativa (tra -14 e -2 kg N_{verf} ha⁻¹) con la stessa tendenza e bilanci leggermente in diminuzione nel tempo. Poiché per Suisse-Bilanz è possibile far valere diverse deduzioni per i concimi, (per es. per le perdite a livello di stalla, stoccaggio, pascolo e campo), la correlazione tra due bilanci era piuttosto debole. Nel bilancio OCSE non è possibile far valere queste perdite, che quindi entrano a far parte del saldo di bilancio. In questo modo le aziende con un impiego relativamente elevato di concime organico e/o con grandi effettivi di animali, in generale presentavano bilanci OCSE più elevati, mentre per i Suisse-Bilanz non era riscontrabile questa differenza. La mediana dei saldi dei bilanci OCSE di P era equilibrata negli anni (tra -2 e 0 kg P ha⁻¹), mentre per i Suisse-Bilanz era leggermente negativa (tra -3 e -1 kg P ha⁻¹ per SAU). La correlazione tra i due bilanci era significativamente migliore per P rispetto a N, visto che per P non è possibile far valere deduzioni in Suisse-Bilanz.

Le nostre analisi hanno dimostrato che il saldo Suisse-Bilanz nella sua forma attuale non è adatto per quantificare in modo affidabile le perdite di N. Le deduzioni forfetarie a livello di stalla e di stoccaggio e la cascata incompleta di perdite di N per i concimi organici impediscono una rappresentazione specifica delle perdite di N effettive. Il bilancio OCSE fornisce una base migliore per la valutazione delle eccedenze di azoto. Compensando le deduzioni di Suisse-Bilanz con il loro bilancio si potrebbe ottenere una stima più esatta delle perdite. Per P, invece, Suisse-Bilanz è un indicatore ambientale utile, in quanto strettamente legato al bilancio OCSE. Tenendo conto anche delle analisi del suolo obbligatorie e ricorrenti nell'ambito della PER si può migliorare ulteriormente il calcolo delle eccedenze di fosforo a livello regionale. Ad oggi, tuttavia, per il monitoraggio agroambientale non sono disponibili né i saldi Suisse-Bilanz delle aziende agricole né le analisi del suolo a livello aziendale.

1 Hintergrund und Ziele

1.1 Nährstoffüberschüsse und Umweltprobleme

Nährstoffüberschüsse aus der Landwirtschaft sind seit Jahrzehnten ein bedeutendes Thema in der Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft und infolgedessen auch in der Agrar- und Umweltpolitik. Sie beziehen sich auf die Mengen an Nährstoffen, vor allem Stickstoff (N) und Phosphor (P), die in der Landwirtschaft anfallen und auf die Böden ausgebracht werden. Die Versorgung der landwirtschaftlichen Flächen mit zusätzlichen Nährstoffen, wie zum Beispiel durch organische oder mineralische Dünger ermöglichen eine Steigerung des pflanzlichen Wachstums und eine Ertragsstabilisierung und sind somit essenziell für die nationale Ernährungssicherheit. Gleichzeitig führen Nährstoffüberschüsse in der Regel zu Verlusten und folgend zu Umweltproblemen (Dalgaard et al., 2012). Eine Düngung über dem Pflanzenbedarf führt im Fall von N zu mehr gasförmigen (z.B. Ammoniakemissionen, Lachgasemissionen) und gelösten (Nitrat) Verlusten. Bei P-Verlusten handelt es sich meist um gelöste, organische und an Boden adsorbierte Formen. Diese Belastungen führen zur Eutrophierung von Ökosystemen und den Verlust von Biodiversität, tragen zur Klimawirkung bei und können, wenn sie mit Luftschadstoffen reagieren, Feinstaub bilden, welcher die menschliche Gesundheit schädigt (Erisman et al., 2013). Somit ist es essenziell, ein Gleichgewicht zwischen der Nutzung von Nährstoffen zur Sicherung der Ernährung und der Minimierung ihrer negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu finden.

Die existierenden Nährstoffüberschüsse stellen die Landwirtschaft vor grosse Herausforderungen. Die Schweizer Agrar- und Umweltpolitik beinhaltet verschiedene Ziele, die diese Nährstoffüberschüsse und die damit verbundenen Verluste reduzieren sollen. Zum Beispiel wurde anhand der Parlamentarischen Initiative 19.475 der Absenkpfade Nährstoffe beschlossen und in der Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft definiert (SR 9191.118, Art. 10b). Dieser besagt, dass die Nährstoffverluste aus der Landwirtschaft bis im Jahr 2030 um 15% (für N) und 20% (für P) im Vergleich zum Durchschnitt der Referenzperiode 2014 bis 2016 vermindert werden sollen. Als übergeordnete Ziele fungieren die Umweltziele der Landwirtschaft (UZL; BAFU/BLW 2008 & 2016). Diese definieren die Bedingungen, unter denen die Belastbarkeit der Ökosysteme sichergestellt werden soll. In den UZL werden neben relativen Zielen (z.B. Reduktion der Treibhausgasemissionen, inklusive Lachgasemissionen, um 33% gegenüber 1990 bis 2050) auch absolute Grössen (z.B. maximale Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft bei 25'000 t N pro Jahr) definiert. Werden alle N-relevanten Ziele berücksichtigt, müssen die N-Überschüsse in der Landwirtschaft um mindestens 33% reduziert werden im Vergleich zur Referenzperiode 2014-2016, um die UZL zu erreichen (Abschätzung gemäss BLW/Agroscope).

1.2 Konzept Nährstoffbilanzierung

Nährstoffbilanzen bilden im Saldo die Nährstoffnutzung für ein System ab. Dafür werden alle Nährstoffein- und Nährstoffausträge eines definierten Systems über einen bestimmten Zeitraum zusammen bilanziert. Der Saldo weist entweder auf einen Nährstoffüberschuss (Eintrag > Austrag) oder auf ein Nährstoffdefizit (Eintrag < Austrag) hin (Oenema et al., 2003). Überschüsse sind sehr eng mit Verlusten in die Umwelt verknüpft, weswegen man die Bilanzierung als Indikator für die Umweltwirkung benutzt (Klages et al. 2020) und meist direkt von Verlusten spricht (Spiess und Liebisch 2020). Nährstoffbilanzen werden auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen, bzw. Systemen eingesetzt (nationale Ebene, Betriebsebene oder auch Parzellenebene). Je nach Zweck, Fragestellung und den vorhandenen Datengrundlagen sind unterschiedliche Ansätze in Verwendung. Manche Bilanzen werden berechnet, um kultur- und standortspezifisch und dadurch effizienter zu düngen und somit Überschüsse zu reduzieren. Andere Bilanzen werden primär als Indikator für ein nachhaltiges Nährstoffmanagement, als regulatorisches Instrument für den landwirtschaftlichen Vollzug oder als Entscheidungshilfe für die Agrarpolitik genutzt (Oenema et al., 2003; Klages et al., 2020; Löw et al., 2021). Im Folgenden werden die wichtigsten Bilanzierungsansätze kurz erläutert und in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

Die **Bodenoberflächenbilanz** berücksichtigt Nährstoffe, die über die Bodenoberfläche auf das Feld eingetragen werden (Düngemittel, Symbiotische N-Fixierung durch die Leguminosen (SNF), Saatgut, und atmosphärische Deposition) und welche über die geernteten Pflanzenprodukte ausgetragen werden. Somit wird bei der

Bodenoberflächenbilanz der Fokus auf den Pflanzenbau gelegt und die Tierhaltung wird nur indirekt über die eingesetzten Hofdünger und die geernteten pflanzlichen Futtermittel einbezogen.

Die **Hoftorbilanz** zieht die Systemgrenze beim Betrieb und quantifiziert und bilanziert die totalen Im- und Exporte von landwirtschaftlichen Produkten und betriebsspezifischen Nährstoffflüssen. Die Einträge umfassen alle importierten Futtermittel, Tiere, Düngemittel (mineralische Dünger, Hof- und Recyclingdünger, übrige Dünger) und Saatgut sowie die SNF und die atmosphärische Deposition ausserlandwirtschaftlicher Quellen. Der Austrag wird definiert durch alle pflanzlichen und tierischen Produkte (inklusive Tiere), die den Betrieb verlassen.

Die Bodenoberflächen- und Hoftorbilanzen sind somit Bilanzen im eigentlichen Sinne und verfolgen das Ziel, die Ist-Zustände darzustellen und Nährstoffüberschüsse zu quantifizieren. Im Gegensatz dazu gibt es abgeänderte Formen der Bilanzierungen, die ein anderes Ziel verfolgen und den Soll-Zustand bilanzieren (Nährstoffbedarf einer Kultur wird als Austrag gerechnet). Diese Formen der Bilanzierung werden vor allem als Dünge- und Managementpläne genutzt, dazu gehören der Düngeplan und die Anfall-Bedarfs-Bilanz:

Der **Düngeplan** ist eine auf Parzellenebene realisierte, jedoch vereinfachte Bodenoberflächenbilanz, welche auf Betriebsebene aggregiert wird. Die Düngebedarfsermittlung basiert in der Regel auf kultur- und standortspezifischen Angaben, welche in regionalen oder nationalen Regelwerken festgelegt sind und sich an den aktuellen Grundlagen für die Bestimmung des Düngebedarfs orientieren (z.B. Jordan-Meile, 2023). Einträge enthalten meist Nachlieferung aus Boden, Hofdünger und Vorfrucht. Austräge werden meist über die Ertragserwartung definiert oder können für andere Verlustpfade, wie erhöhten Niederschlag, berücksichtigt sein. Die SNF ist meist als Teil der Vorfruchtwirkung abgebildet. Die atmosphärische Deposition wird selten berücksichtigt.

Die **Anfall-Bedarfs-Bilanz** ist ein weiterer Ansatz, der für die Bewertung bzw. Bilanzierung des Nährstoffmanagements eingesetzt wird – jedoch auf Betriebsebene statt auf Parzellenebene wie beim Düngeplan. Dieses Konzept kombiniert den Nährstoffanfall aus der Tierhaltung und aus dem Zukauf mit dem Nährstoffbedarf der Kulturen auf Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs. Die Anfallsseite repräsentiert den Eintrag und wird meist über Tierzahlen, Haltungssysteme und Nährstoffimporte geschätzt. Der Nährstoffbedarf wird über die Düngebedarfsermittlung, bzw. mit einem Düngeplan geschätzt und beinhaltet auch die Ertragskomponente. Die Suisse-Bilanz zählt zu dieser Form der Bilanzierung.

Keine Bilanzierung im eigentlichen Sinne stellt die **Systembilanzierung** dar. Die Systembilanzierung wird zur Verständigung von Prozessen angewendet, und erfasst nicht nur die Ein- und Austräge der Nährstoffe in das System, sie quantifiziert beispielsweise auch die Nährstoffflüsse oder Umsetzungsprozesse innerhalb vom Boden- oder Anbausystem. Dies wird meist mit Hilfe von wissenschaftlich abgestützten Modellen oder Messsystemen realisiert. Somit lassen sich die verschiedenen Verlustwege (Verflüchtigung, Auswaschung etc.) und die Nährstoffspeicherung (z.B. in der organischen Substanz des Bodens) besser verstehen, quantifizieren und oft auch optimieren (Oenema, 2003). Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass Synergien und Zielkonflikte in Bezug auf Ziele und Verlustpfade abgebildet werden können. Beispiele dafür sind das Agrammon-Model (Kupper, 2022) oder das «Swiss Ammonia and Greenhous Gas Emission – SAGE»-Model, welche N-Verluste aus der Tierhaltung ausweisen.

Die Bilanzierungsansätze lassen sich meist kombinieren oder bauen aufeinander auf und ergänzen sich. Die verschiedenen Modelle für die Nährstoffbilanzierungen unterscheiden sich nebst den Anwendungszwecken und den verschiedenen Systemgrenzen auch in weiteren Aspekten: z.B. wird je nach Modell anders mit Nährstoffkomponenten (z.B. organischem N) umgegangen (vgl. Tabelle 1). Demzufolge sind die resultierenden Saldi verschieden und Interpretationen bezüglich Problemstatus oder Handlungsbedarf können sich unterscheiden. Infolgedessen sind die Resultate der Nährstoffbilanzen immer wieder Teil der politischen und medialen Debatte.

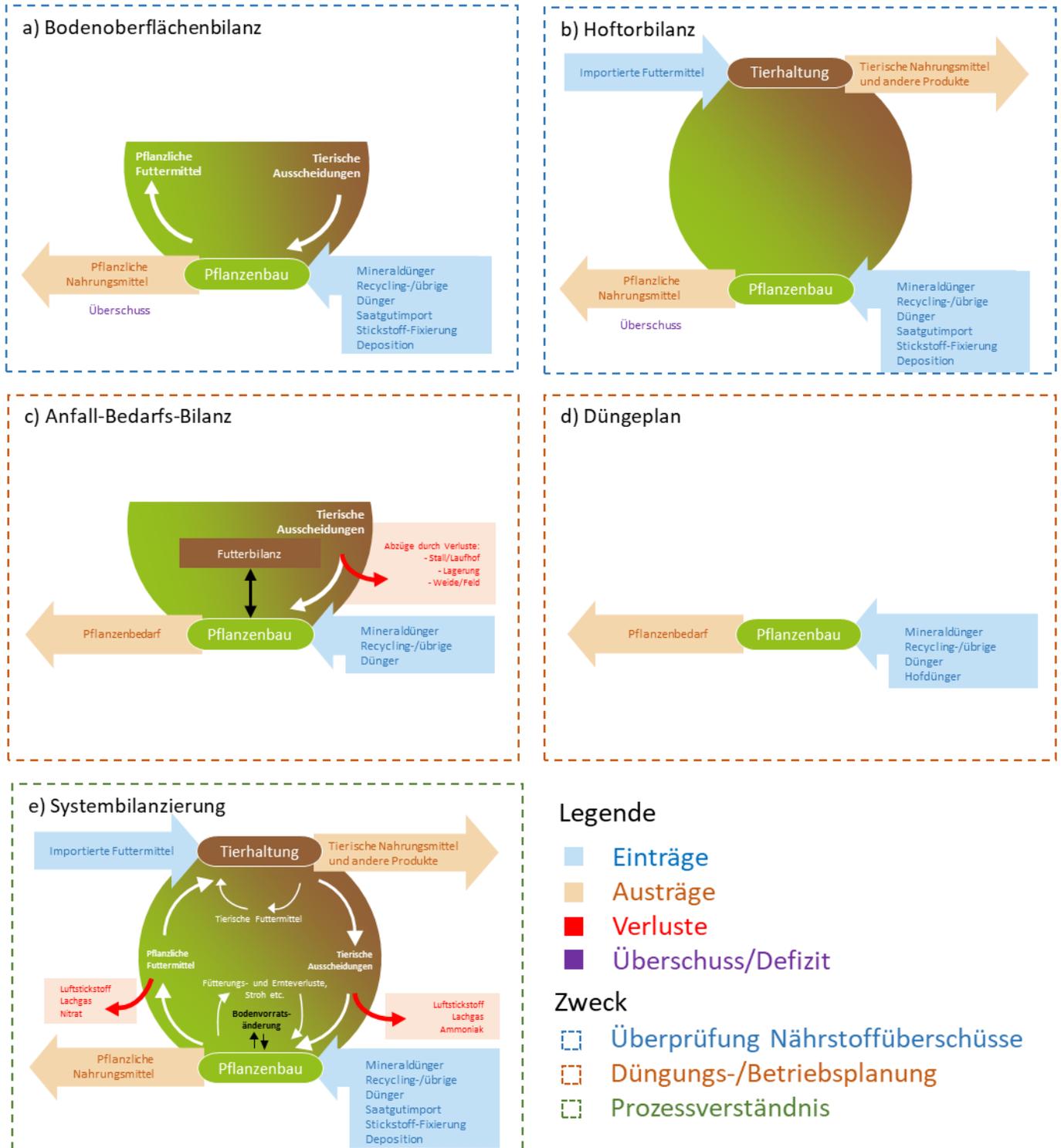


Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Bilanzierungsmethoden, welche im Kapitel 1.2 beschrieben werden.

1.3 Nährstoffbilanzierung in der Schweiz

Durch die Intensivierung der Produktion und den gestiegenen Mineraldüngereinsatz kam es in den 1970er-Jahren zu Nährstoffüberschüssen in der Schweizer Landwirtschaft und eine Zunahme der Umweltbelastung (Anwander Phan-huy, 2000). Nährstoffbilanzen haben sich im letzten Jahrhundert als Werkzeug der Agrarpolitik und im Agrarvollzug etabliert, um Nährstoffüberschüsse (oder -defizite) zu quantifizieren. In den 1990er-Jahren gewannen diese national und international an Bedeutung. Um die Effektivität von Massnahmen zur Nährstoffreduzierungen im landwirtschaftlichen Sektor zu überprüfen, wurden nationale Nährstoffbilanzen nach der OSPAR-Methode

berechnet. Die OSPAR-Methode basiert auf dem Ansatz der Hoftorbilanz (Kapitel 1.2). Dabei wird die gesamte Landwirtschaft der Schweiz als ein einziger Betrieb betrachtet. Diese Bilanz wird im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) von Agroscope seit 1993 jährlich berechnet (Spiess 1999, Spiess 2011, Spiess & Liebisch 2020, Spiess & Liebisch 2023). Die OSPAR-Bilanz dient aktuell auch als Grundlage zur Überprüfung der Zielerreichung des Absenkpfad Nährstoffe (SR 9191.118, Art. 10b).

Parallel zur Berechnung der nationalen OSPAR-Bilanz wurde begonnen, auf nationaler Ebene die Nährstoffbilanzen basierend auf der Methode der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zu berechnen. Diese ist eine Bodenoberflächenbilanz, wird vom Bundesamt für Statistik (BFS) berechnet und dient ebenfalls der internationalen Berichterstattung. Im internationalen Kontext wird die Bodenoberflächenbilanz sehr häufig als Indikator benutzt, da die Datenverfügbarkeit im Vergleich zur Hoftorbilanz (OSPAR-Bilanz) auf nationaler Ebene besser ist (Oenema et al., 2023; Klages et al., 2020; Spiess & Liebisch, 2020). Auch Agroscope wendet im Auftrag des BLW die Bodenoberflächenbilanz nach den OECD-Grundsätzen an, um Auswertungen für Regionen und Betriebstypen durchzuführen (Gilgen et al., 2023; Baumgartner et al., 2024).

Auf nationaler Ebene änderte die Agrarpolitik im Jahr 1993 den Fokus von der reinen Produktionsförderung hin zu einem Ausbau der Kulturlandschaft. Seit der Einführung der Direktzahlungsverordnung (DZV) im Jahr 1999 können nur noch Betriebe Direktzahlungen beziehen, welche den Ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) erfüllen (Anwander Phan-huy, 2000; Osterburg, 2005; BLW, 2023). Der ÖLN schreibt einen effizienten Umgang mit den Nährstoffen N und P auf dem Betrieb vor, der laut Artikel 13 DZV (DZV SR 910.13) anhand einer Nährstoffbilanz überprüft wird. Seit 2002 wird dazu die «Suisse-Bilanz» als Indikator verwendet, dass kein überschüssiger N bzw. P ausgebracht wird (Übersax & Schüpbach, 2004). Im Gegensatz zur Hoftor- (OSPAR) und Bodenoberflächen- (OECD) Bilanz wird die Suisse-Bilanz durch den Betrieb selbst oder von ihm beauftragten Dritten berechnet. Die Methodik wird durch das BLW definiert und bereitgestellt (Agridea & BLW, 2023). Seit einiger Zeit verdichten sich die Hinweise, dass die Suisse-Bilanz nicht mehr zweckmässig ist, um eine ausgeglichene Nährstoffnutzung nachzuweisen, und ein Revisionsbedarf besteht (Bosshard et al., 2012). Erstens werden in der Suisse-Bilanz einheitliche Verlustabzüge getätigt, die nicht der einzelbetrieblichen Realität entsprechen. Zweitens wird sie nur auf Betriebsebene statt auf Parzellenebene berechnet, so dass parzellenspezifische Nährstoffbedürfnisse nicht angewendet und somit Überschüsse teils nicht ersichtlich sind (Bosshard & Richner, 2013). Zudem zeigen die Suisse-Bilanzen auf Stufe Einzelbetrieb mehrheitlich ausgeglichene Salden an (Suter & Reidy, 2021), was in starkem Kontrast zu den Überschüssen der nationalen Bilanzen steht (Spiess & Liebisch, 2023; BFS, 2023). Dies deutet darauf hin, dass die Suisse-Bilanz als Nährstoffmanagementtool und Vollzugsinstrument in ihrer jetzigen Form nicht geeignet ist.

1.4 Ziel und Aufbau der vorliegenden Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, zwei in der Schweiz verwendete Ansätze zur Berechnung der betrieblichen Nährstoffbilanz – die Bodenoberflächenbilanz und Suisse-Bilanz für N und P – zu vergleichen, um methodische und allenfalls zeitliche Unterschiede sowie Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren. Dafür soll aufgezeigt werden, ob sich die Anforderungen für ein effizientes Nährstoffmanagement mit den Anforderungen der Betriebsbilanzierung im Umweltmonitoring vereinbaren lassen, was für die Überprüfung verschiedenster agrarpolitischer Ziele (z.B. Absenkpfad Nährstoffe, UZL) notwendig ist. Als Datengrundlage fungiert der Datensatz der ZA-AUI (Gilgen et al., 2023), welcher aus realen Betriebsdaten (ca. 300 Betriebe für die Jahre 2009 – 2022) besteht. Die Hoftorbilanz konnte für diesen Vergleich nicht berechnet werden, da die notwendigen Daten für die Betriebe nicht im vollen Umfang zur Verfügung stehen.

Im Folgenden werden die methodischen Grundlagen der zwei Nährstoffbilanzierungsansätze im Detail erörtert (Kapitel 2). Kapitel 3 beschreibt die Datengrundlage und das Vorgehen für die Auswertung. Danach werden die jeweiligen Ein- und Austragsparameter vorgestellt und die Bilanzen miteinander verglichen (Kapitel 4.1). Anschliessend werden die Unterschiede in den Bilanzen nach Betriebstypen und Betriebsmanagement diskutiert (Kapitel 4.2). Als vorletzter Schritt werden die Plausibilität der Daten und deren Nutzbarkeit diskutiert (Kapitel 4.3) und zum Abschluss die Lücken und Schwächen in den heute eingesetzten Bilanzen sowie Handlungswege für die Verbesserung aufgezeigt (Kapitel 5).

2 Methodische Grundlagen der Nährstoffbilanzierung

2.1 Bodenoberflächenbilanz im Agrarumweltmonitoring

Die Bodenoberflächenbilanz nach OECD-Methode (im folgenden Bodenoberflächenbilanz genannt) wird in der Schweiz heute vor allem für die internationale Berichterstattung und auch im Agrarumweltmonitoring verwendet (Tabelle 1).

Die Bodenoberflächenbilanz verwendet alle Inputparameter ohne Abzüge für eventuelle Verluste an die Umwelt (z.B. Ammoniakverluste im Stall). Als Konsequenz werden diese Verluste, aber auch Änderungen im Bodenvorrat der Nährstoffe, im Bilanzsaldo abgebildet (Abbildung A 1). Da gewisse Verluste an die Umwelt in der Realität nicht vermieden werden können, wird für N deshalb eine N-Bilanz grösser als 0 angestrebt, um die Pflanzen mit genügend N zu versorgen und die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Generell versucht man eine hohe Nährstoffnutzungseffizienz (NUE) als Austräge geteilt durch Einträge zu erreichen. Die Festlegung einer Zielgrösse oder eines Richtwertes für die Interpretation der Bodenoberflächenbilanz auf Schlag- oder Betriebsebene ist jedoch aufgrund der Komplexität der Nährstoffkreisläufe nicht trivial und kann je nach Ziel und Anwendungsfall variieren. So gibt es in der Schweiz nur projektspezifische Zielgrössen (zum Beispiel 30 kg N ha⁻¹ für das Nitratprojekt; Bünemann-König et al., 2022). Durch den Flächenbezug lassen sich die Bodenoberflächenbilanzen aggregieren und skalieren. Somit können Parzellen (z.B. Feldkalender), Betriebe (ZA-AUI) oder die ganze Schweiz (BFS) miteinander in Beziehung gebracht und auf dieser Basis verglichen werden.

2.2 Suisse-Bilanz im Agrarvollzug

Bei der Suisse-Bilanz, einer Anfall-Bedarfs-Bilanz, werden die auf dem Betrieb verwendeten Düngemittel (sowohl eigenproduziert als auch zugeführt) dem durchschnittlichen Nährstoffbedarf der angebauten Kulturen gegenübergestellt. Für N werden in der Suisse-Bilanz, im Gegensatz zur Bodenoberflächenbilanz, bei organischen Düngern diverse Abzüge gemacht, um den pflanzenverfügbaren N (N_{verf}) zu schätzen. Diese Abzüge entsprechen den Nährstoffverlusten, welche im Stall/Laufhof, bei der Lagerung, auf der Weide oder im Feld auftreten. Diese Abzüge sind stark vereinfacht und teilweise über verschiedene Betriebsstufen zusammengefasst. Der Suisse-Bilanzsaldo entspricht also nicht dem einer Gesamtbilanz.

In der Suisse-Bilanz werden nur die Einträge über die Dünger direkt bilanziert. Andere Inputparameter werden nur indirekt über die Düngungsnorm, welche dem durchschnittlichen Düngungsbedarf einer Kultur entspricht, berücksichtigt. Der durchschnittliche Düngungsbedarf wurde in Referenzexperimenten und -umwelten erhoben und beinhaltet auch die durchschnittliche Nachlieferung von Nährstoffen aus dem Boden. Die Nachlieferung aus dem Boden wird vor allem durch die Vorfrucht, Standortbedingen der Parzellen (z.B. Boden) und auch durch die atmosphärische Deposition getrieben (Richner & Sinaj, 2017; Richner et al., 2010) und werden jedoch explizit nicht berücksichtigt, genauso wie die Nachlieferung aus organischen Düngern in den Folgejahren. Gleichzeitig können für einige Kulturen höhere Erträge und dadurch auch höhere Nährstoffbedürfnisse geltend gemacht werden (Agridea & BLW, 2023). Die Saldi der Suisse-Bilanz werden als Prozentwert rapportiert, d.h. Anteil der Nährstoffeinträge am Nährstoffbedarf der Kulturen. Zur Erfüllung des ÖLN war bis 2023 ein prozentualer Saldo von +110% definiert (Eintrag darf den durchschnittlichen Bedarf um 10% übersteigen), ab 2024 wurde der 10%-Sicherheitszuschlag gestrichen und die Suisse-Bilanz muss nun für den ÖLN 100% betragen. Zusätzlich zum Prozentwert der Suisse-Bilanz kann der Saldo auch als flächenbezogene Bilanz berechnet werden (auf düngbare Fläche oder auf totale landwirtschaftliche Nutzfläche).

Tabelle 1: Wichtige Unterschiede zwischen Bodenoberflächen- und Suisse-Bilanz. Direkt bilanzierte Parameter sind rot und indirekt bilanzierte Parameter blau dargestellt. Dieselben Farben werden in Abbildung 1 verwendet.

	Bodenoberflächenbilanz	Suisse-Bilanz
Bilanztyp	Bodenoberflächenbilanz	Anfall-Bedarfs-Bilanz
Verwendung	Agrarumweltmonitoring, als Grundlage für agrarpolitische Entscheidungen, Wissenschaft	Agrarvollzug auf Betriebsebene Nachweis, dass «kein überschüssiger P und N» ausgebracht wurde.
Grenzwert / Interpretation	In der Schweiz keine Grenzwerte definiert. Nur Projektspezifische Zielgrößen	Grenzwertsaldo +110% bis 2023, ab 2024: 100%
Fokus	Berichterstattung national (Agrarbericht) und international (OECD). Wird international als Nachhaltigkeitsindikator verwendet.	Vollzug, Sicherstellung der guten landwirtschaftlichen Praxis (ÖLN) Grobe, gesamtbetriebliche Düngungsplanung Für N eher «Produktivitätsfokus» durch Berechnung von N_{verf}
Umgang mit organischen Düngern	Keine Abzüge (Gesamtstickstoff wird bilanziert)	Abzüge von Verlusten bei N: Stall, Lager, Weide, Laufhof, Feld (N_{verf} wird geschätzt)
Umgang mit bilanzierten Parametern	Alle Parameter direkt bilanziert (echte Input- Output-Bilanz)	Einige Parameter direkt bilanziert , diverse indirekt über experimentell und wissenschaftlich belegte Werte (GRUD-Normen)
Berücksichtigte Nährstoffeinträge	Direkt: <ul style="list-style-type: none"> - Nährstoffausscheidungen der Tiere - Sämtliche weiteren Dünger - Atmosphärische Deposition - Symbiotische N-Fixierung - Saatgut 	Direkt: <ul style="list-style-type: none"> - Sämtliche Dünger Standardwerte: <ul style="list-style-type: none"> - Atmosphärische Deposition - Symbiotische N-Fixierung - Mineralisierung aus dem Boden
Berücksichtigte Nährstoffausträge	Direkt: <ul style="list-style-type: none"> - Nährstoffentzüge durch pflanzliche Erträge der Kulturen 	Direkt: <ul style="list-style-type: none"> - Ertragsanpassungen einiger Kulturen Standardwerte: <ul style="list-style-type: none"> - GRUD-Referenzerträge

3 Datengrundlage & -analyse

3.1 Datengrundlage

Der Vergleich der betrieblichen Bodenoberflächenbilanzen mit den Suisse-Bilanzen erfolgt mit dem Datensatz der «Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI)». Die ZA-AUI war ein Netzwerk aus Landwirtschaftsbetrieben, die zwischen 2009 und 2022 jährlich Bewirtschaftungsdaten für die Berechnung verschiedener Agrarumweltindikatoren bereitstellten. Eine detaillierte Beschreibung der ZA-AUI kann in Gilgen et al. (2023) gefunden werden. Über die Jahre haben zwischen 250 und 330 Betriebe jährlich Daten an die ZA-AUI geliefert (2009: 309 Betriebe, 2014: 254 Betriebe, 2022: 294 Betriebe). Von den Betrieben können ca. 50% der Betriebe der Talregion, 30% der Hügelregion und 20% der Bergregion zugeordnet werden. Somit sind im Vergleich zum Schweizer Durchschnitt die Tal- und Hügelbetriebe in der ZA-AUI leicht überrepräsentiert und die Bergbetriebe unterrepräsentiert. Da die Rekrutierung von teilnehmenden Betrieben über Treuhandstellen organisiert war, handelt es sich nicht um eine statistisch zufällige Stichprobe. Um betriebspezifische Bewirtschaftungsdaten für die Berechnung der Indikatoren nutzen zu können, mussten sie digital und standardisiert vorliegen, darum erfolgte die Datenlieferung für die ZA-AUI über die Software AgroTECH (Gilgen et al., 2023). Der Bezug der Daten über die Treuhandstellen stellte die Anonymität der Betriebe sicher. Die bei Agroscope eingegangenen Daten unterliefen einer Vielzahl von automatischen und manuellen Plausibilitäts- und Qualitätskontrollen und wurden gegebenenfalls von den Treuhandstellen und Betrieben nachgebessert (Gilgen et al., 2023).

3.2 Auswertung/Analyse

3.2.1 Bodenoberflächenbilanz

Durch das Gegenüberstellen der Nährstoffmengen sowohl in den Einträgen als auch in den Austrägen erhält man die Bodenoberflächenbilanz. Für die Bilanzrechnung werden die totalen N- und P-Mengen berücksichtigt. Die Nährstoffmengen (in kg N oder kg P) jeder Teilgrösse werden als Produkt seiner Menge (kg) und seines Nährstoffgehalts (kg N/kg oder kg P/kg) berechnet. Die Nährstoffkonzentrationen stammen grösstenteils aus der Schweizerischen Futtermitteldatenbank «feedbase» (Agroscope, 2020) und den Grundlagen der Düngung «GRUD» (Richner & Sinaj, 2017). Die Bilanzen werden pro Betrieb berechnet und auf die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN in ha) bezogen. Die einzelnen Ein- und Austragsparameter der Bodenoberflächenbilanz (siehe Kapitel 2.1) wurden in der ZA-AUI wie folgt berechnet:

3.2.1.1 Hofdünger

$$N_{\text{Hofdünger}} = N_{\text{tierische Ausscheidungen}} + N_{\text{Stroh}} + N_{\text{Fütterungsverluste}} + N_{\text{importierte Hofdünger}} - N_{\text{exportierte Hofdünger}}$$

Diese Berechnung erfolgt, ohne dass die Verluste durch Lagerung und Stallhaltung abgezogen werden. Sie umfasst alle Tierkategorien der landwirtschaftlichen Nutztiere, die auf dem Betrieb gehalten werden. Die Nährstoffmenge aus den tierischen Ausscheidungen wird mithilfe des Suisse-Bilanz-Tools aus AGRO-TECH ermittelt, da dabei bereits Einflussfaktoren wie die Milchleistung pro Kuh oder der Einsatz von NP-reduziertem Schweinefutter berücksichtigt wird.

Die Strohmenge ergibt sich aus der Strohproduktion auf dem Betrieb zuzüglich dem Strohkauf. Abgezogen werden die verkauften Mengen an Stroh sowie die Verfütterung von betriebseigenem Stroh.

Grundlage für die Berechnung der Grundfutter (GF)-Produktion der Futterfläche ist die GF-TS-Bilanz der Suisse-Bilanz. In dieser wird zusätzlich angenommen, dass die Fütterungsverluste 5% des auf dem Betrieb verfütterten Futters ausmachen und werden der GF-Produktion hinzugezählt. Die Fütterungsverluste werden folgendermassen berechnet:

Fütterungsverluste

$$= (GF_{Produktion\ der\ Futterfläche} + Verfüterung\ von\ betriebseigenen\ Ackerprodukten\ und\ Stroh + Zufuhr\ von\ GF - Wegfuhr\ von\ GF) * 0.05$$

Die mit den Hofdüngern importierten bzw. exportieren Nährstoffmengen werden als Summe der Produkte aller verschobenen Hofdüngerarten und ihren nach Stall- und Lagerverluste korrigierten Gehalten an Gesamtstickstoff ($N_{ges} = N_{tot} - \text{Stall- und Lagerungsverluste}$) oder Gesamtphosphor verrechnet.

3.2.1.2 Mineraldünger und Recyclingdünger

Für die Mineral- und Recyclingdünger werden die zugeführten Mengen aller Mineral- und Recyclingdünger und deren Nährstoffgehalte berücksichtigt. Die Mengen und Konzentrationen der Mineraldünger wurden mit dem Feldkalender über AgroTECH geliefert.

3.2.1.3 Atmosphärische N-Deposition

Die Berechnung der atmosphärischen N-Deposition wird anhand eines durchschnittlichen Depositionswertes durchgeführt. Dafür wird der Wert von 19.1 kg N/ha LN pro Jahr und 0.35 kg P/ha LN pro Jahr mit der LN des Betriebes multipliziert (gemäss Schätzungen von Agroscope-Experten).

3.2.1.4 Symbiotische N-Fixierung

Die SNF wird parzellenweise berechnet und für Grünland und Ackerleguminosen unterschieden. Für Wiesen wird die SNF wie folgt berechnet:

$$SNF = Fläche * \frac{Feldertrag}{0.85} * \frac{\left(\frac{GFV_{Betrieb}}{0.95} + GF_{Weg} - GF_{Zu} - GF_{ausserhalbFF} - RS \right)}{GF_{FF}} \frac{N}{ha} * 1.4$$

*Standardertrag * Leguminosenanteil * 4.15 kg N/ha*

Mit:

$GFV_{Betrieb}$ = Grundfutterverzehr auf dem Betrieb (Faktor 0.95 rechnet 5% Fütterungsverluste hinzu)

GF_{Weg} = Vom Betrieb weggeführtes Grundfutter

GF_{Zu} = Zum Betrieb zugeführtes Grundfutter

$GF_{ausserhalbFF}$ = Grundfutterproduktion ausserhalb der Futterfläche

RS = Verfüttertes Rübenblatt und Stroh

GF_{FF} = Grundfutterproduktion der Futterfläche

Standardertrag = 130 dt TS/ha (Boller und Nösberger, 1987)

Leguminosenanteil = 10% für Naturwiesen und 30% für Kunstwiesen

Der Faktor 0.85 rechnet den Feldertrag auf den Bruttoertrag. Die 4.15 kg N/ha beziehen sich auf den SNF pro % Leguminosenanteil bei einem Standardertrag von 130 dt TS/ha (Boller und Nösberger, 1987). Der Faktor 1.4 berücksichtigt den Anteil am fixierten N in den unterirdischen Pflanzenteilen (Spiess, 1999).

Die SNF durch Ackerleguminosen wird als Produkt der Anbaufläche und einer SNF-Leistung von 200 kg N/ha (Spiess, 1999) berechnet.

3.2.1.5 Saatgut

Der Nährstoffinput über das Saatgut wird als die Summe der Produkte von Saatgutmenge und N- bzw. P-Gehalt im Saatgut für die verschiedenen Saatguttypen berechnet.

3.2.1.6 Geerntete Nahrungs- und Futtermittel

Der Nährstoffoutput aller Kulturen wird als Summe der Produkte von Ertrag und Nährstoffgehalt des Ernteguts berechnet. Es werden dabei nur auf der LN angebaute Kulturen berücksichtigt.

3.2.2 Suisse-Bilanz

AgroTECH besitzt ein BLW-zertifiziertes Modul zur Berechnung der Suisse-Bilanz. Die Suisse-Bilanz-Daten für diesen Bericht wurden somit direkt aus dem AgroTECH-Export bezogen. Die Berechnung der Suisse-Bilanz wird im Detail in der «Wegleitung Suisse-Bilanz» beschrieben und wurde über die Jahre mehrmals angepasst (Agridea & BLW, 2023). Folgend erläutern wir kurz die Grundlagen und stellen die verschiedenen Abzüge (Verluste) vor. Grundsätzlich wird der N- bzw. P-Bedarf aller Kulturen auf dem Betrieb den Einträgen gegenübergestellt. Für N können verschiedene Abzüge oder Anpassungen geltend gemacht werden. Diese entsprechen Verlusten, die beim Nährstoffanfall aus der Tierhaltung entstehen oder sich durch das Anbausystem auf die potenzielle Nährstoffverfügbarkeit auswirken, wie zum Beispiel:

- Hofdüngerlagerung (es wird mit N_{ges} -Werten gerechnet, welche die unvermeidbaren Verluste berücksichtigen)
- Einsatz von nährstoffreduziertem Futter
- Laufhofhaltung
- Weidehaltung (nur für Raufutterverzehr und Freiland Schweine)
- Vollmistproduktion
- Betriebsspezifischer N-Ausnutzungsgrad (korrigierter Basis N-Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit vom Anteil offener Ackerfläche und vom Anteil Vollmist)

Die Berechnung der Suisse-Bilanz startet mit der Eingabe des Tierbestandes sowie weiterer Grössen, um den GF-Verzehr zu berechnen. Danach wird die Zu- und Wegfuhr von GF deklariert, um das auf der Futterfläche produzierte GF zu berechnen. Die Kulturflächen werden eingetragen und dadurch das Ertragsniveau der GF-Kulturen berechnet. Anschliessend wird der Nährstoffbedarf aller Kulturen berechnet (Kulturbedarf C). Im nächsten Schritt werden der Nährstoffanfall (eigenbetrieblicher Hofdünger A2) aus der Tierhaltung berechnet und mögliche Korrekturen vorgenommen. Danach werden zu- und weggeführte Dünger (Zu/Wegfuhr Hofdünger A3; Zufuhr übrige Dünger D, Zufuhr Vergärungsprodukte und Ernterückstände Gemüse E) und deren Nährstoffgehalte deklariert. Schlussendlich kann der betriebsspezifische N-Ausnutzungsgrad berechnet und die Gesamtbilanz (Saldo) erstellt werden. Da ungedüngte Wiesen durch das geerntete Futter den Parzellen Nährstoffe entziehen, welche durch den Nährstoffanfall der Tiere (sofern Produkte der ungedüngten betriebseigenen Wiesen verfüttert wurde) auf anderen Parzellen anfallen, kann dies auf den anderen Parzellen im Vergleich zum Nährstoffbedarf zu einer leichten Überdüngung führen. Somit wird in der Suisse-Bilanz ein innerbetrieblicher Nährstofftransfer (T) für das GF der ungedüngten Wiesen einberechnet. Die Datenlieferungen über AgroTECH beinhaltete alle oben genannten Posten pro Betrieb und konnten somit direkt für die Analysen verwendet werden.

3.2.3 Datenqualitätskontrollen

Da die Daten der ZA-AUI direkt von den Betriebsleitenden bzw. den Treuhandstellen erfasst werden, ist eine Plausibilitätskontrolle der Daten notwendig. Die über AgroTECH erhaltenen Daten haben eine hohe Komplexität und einen grossen Umfang, somit sind Datenqualitätskontrollen anspruchsvoll. Eine erste Kontrolle erfolgte in der Regel bei den Treuhandstellen, welche gewisse fehlerhafte und/oder unvollständige Datensätze wieder an die Betriebe zurückschicken konnten. Ab 2014 implementierte Agroscope automatische Tests (z.B. Detektieren von fehlenden Saatmassnahmen im Feldkalender), welche die Plausibilität der eingehenden Daten prüften und allenfalls Rückmeldung an die Treuhandstellen gaben. Die Einführung der automatischen Plausibilitätskontrollen verbesserte die Datenqualität über die Jahre deutlich (Gilgen et al., 2023). Gleichzeitig konnten nicht alle Fehler automatisch detektiert werden. So konnten zum Beispiel fehlende Einträge von Düngemassnahmen nicht erkannt werden. Deshalb wurden für diese Studie zusätzlich alle für die Auswertung benutzten Daten manuell geprüft und Betriebsjahre mit unplausiblen Daten entfernt (ca. 10%). Konkret wurden Ausreisser in den Bodenoberflächen- und Suisse-Bilanzen herausgefiltert. Diese Ausreissertests wurden mithilfe von Boxplots und manuellen Kontrollen durchgeführt. Es wurden für alle Ein- und Austragsparameter die extremsten Werte mit den allgemeinen Betriebsdaten auf Plausibilität geprüft, z.B. hohe tierische Ausscheidungen mit dem Tierbestand verglichen. Zusätzlich muss erwähnt werden, dass für einen Betrieb und ein Jahr nicht zwingend alle Einträge bei der Suisse-Bilanz und der Bodenoberflächenbilanz übereinstimmen. So wurden gewisse Informationen für die Berechnung der

Bodenoberflächenbilanz auf Nachfrage bei den Treuhandstellen nachgebessert, während der AgroTech-Export der Suisse-Bilanz Daten nicht mehr angepasst werden konnte. Ausserdem wurde das Suisse-Bilanz-Tool von AgroTECH nicht von allen Betrieben für das offizielle Ausfüllen der Suisse-Bilanz genutzt. Somit gab es Fälle, in denen die Suisse-Bilanz-Daten nicht vollständig ausgefüllt waren. Dies war vor allem bei den Mineraldünger-Werten ersichtlich. So waren die Mineraldüngermengen in der Suisse-Bilanz zum Teil um ein Vielfaches tiefer, als was im Feldkalender angegeben wurde. Hier wurden alle Suisse-Bilanz-Daten rausgefiltert, die 50% weniger Mineraldüngereinsatz in der Suisse-Bilanz deklariert hatten als im Feldkalender (für N wurden ca. 15% der Daten rausgefiltert und für P ca. 35%). Für die meisten Auswertungen in dieser Arbeit wurden die Daten der Jahre von 2011 (erstes Jahr der ZA-AUI mit qualitativ soliden Daten) bis zum Jahr 2022 (aktuellstes Jahr) kumuliert ausgewertet. Für die Untersuchung der zeitlichen Veränderungen wurden zusätzlich die Daten der Jahre 2009 und 2010 benutzt, jedoch ist die Datenqualität dieser beiden Jahre schlechter und somit müssen diese Daten mit Vorsicht interpretiert werden.

3.2.4 Statistik

Die Analysen der Zeitreihen wurden anhand eines Mann-Kendall-Tests durchgeführt, um statistische Trends über die Zeit in den Daten zu erkennen. Für den Vergleich der Bilanzen wurden Theil-Senn-Regressionen angewendet und die Korrelation mit dem Spearman-Rank-Test bestimmt. Zusätzlich wurde der Standardfehler mit Hilfe der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Squared Error – RMSE) bestimmt. Die Unterschiede in den Bilanzen zwischen den Regionen wurden mit Hilfe eines linearen gemischten Modells bestimmt. Somit kann der Einfluss der Regionen (als feste Effekte) auf die Bilanzen unabhängig von den verschiedenen Jahren und den einzelnen Betrieben (zufällige Effekte) untersucht werden. Die Modelle wurden mit der Maximum-Likelihood-Methode über das «lmerTest»-Paket in R (Kuznetsova et al., 2017) und die P-Werte mit der Sattertwaite-Approximation berechnet. Zusätzlich wurden die marginalen (m) und konditionellen (c) R^2 mit dem «MuMIn»-Paket in R berechnet. Diese zwei R^2 -Werte definieren die Variation, die durch die festen Effekte (c), bzw. durch die zufälligen und festen Effekte zusammen (m), erklärt werden können.

4 Resultate & Diskussion

4.1 Bilanzresultate & -vergleich

4.1.1 Stickstoff

4.1.1.1 Bodenoberflächenbilanz – Ein-/Austräge und Saldi

Die N-Bodenoberflächenbilanz war in allen Monitoringjahren im Median stets positiv (zwischen 58 und 83 kg N_{tot} ha⁻¹ LN). Im Vergleich zu den Medianwerten waren die jährlichen Mittelwerte der Bodenoberflächenbilanzen leicht höher (zwischen 71 und 89 kg N_{tot} ha⁻¹ LN, Abbildung 2). Der N-Input (Median zwischen 210 und 255 kg N ha⁻¹ LN) war somit im Schnitt grösser als der N-Entzug durch die Ernte (Median zwischen 148 und 173 kg ha⁻¹ LN) und dementsprechend gab es einen N-Überschuss. Nur sehr wenige Betriebe hatten einen negativen Saldo (Abbildung 2). Der mengenmässig bedeutendste N-Eintrag erfolgte über Hofdünger (I1) (im Median zwischen 111 und 148 kg N_{tot} ha⁻¹ LN) gefolgt von der SNF (I7) (im Median zwischen 41 und 46 kg N ha⁻¹), den Mineraldüngern (I2) (im Median zwischen 19 und 33 kg N ha⁻¹) und der atmosphärischen Deposition (I6) (konstant 19 kg N ha⁻¹). Der Median der restlichen N-Quellen (d.h. Recyclingdünger (I3) und Saatgut (I8)) lag bei 0 (Abbildung 2). Der Vergleich der N-Bilanzen über die Zeit zeigte eine geringe Abnahme von -16.3 kg N ha⁻¹ (von 2009 bis 2022) des mittleren N-Überschusses (p-Wert des Mann-Kendal Test = 0.006, Abbildung A 2).

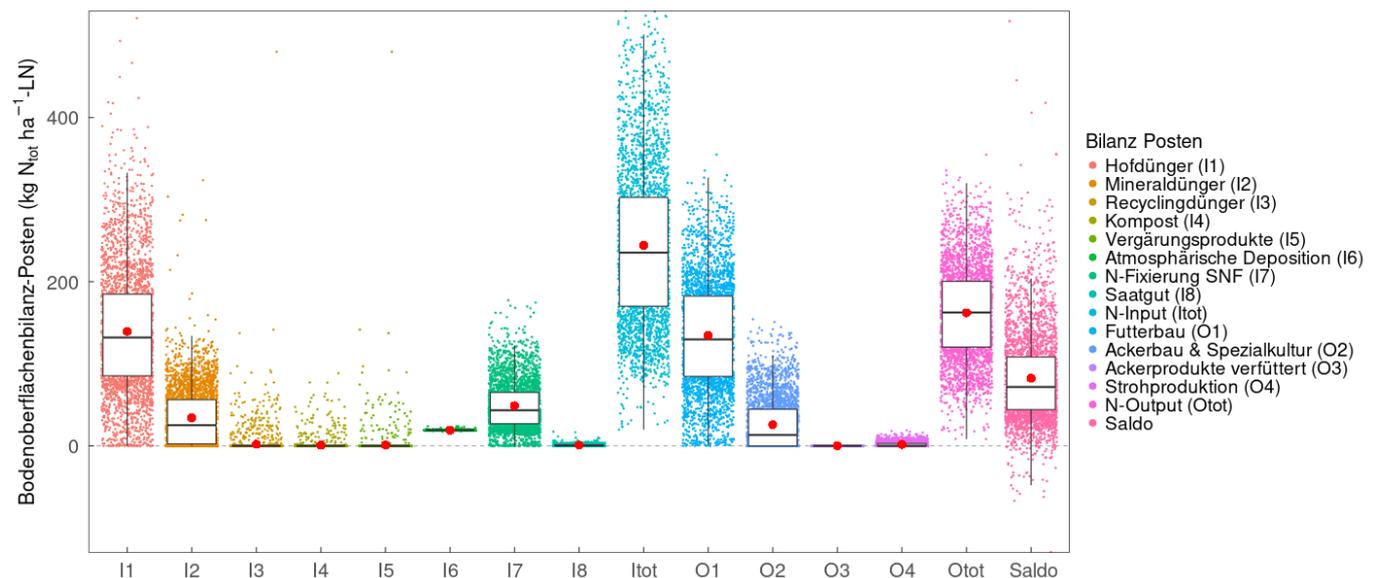


Abbildung 2: Bodenoberflächenbilanzen für Stickstoff für alle Jahre zwischen 2011 und 2022. Die einzelnen N-Einträge (I1 – I8) und Austräge (O1 – O8) sind in der Legende benannt und im Methodenteil (Kapitel 3.2.1) erklärt. Rote Punkte in den Boxen zeigen die Mittelwerte. Ein Punkt entspricht einem Betrieb pro Jahr.

4.1.1.2 Suisse-Bilanz

Saldi und Beschreibung einzelner Komponenten

Die N-Bilanzen basierend auf der Suisse-Bilanz waren im Median leicht negativ (zwischen -14 und -2 kg N_{verf} ha⁻¹ LN), während die Mittelwerte sogar noch tiefer ausfielen (zwischen -15 und -4 kg N_{verf} ha⁻¹ LN; Abbildung 3). Somit sind die deklarierten N-Einträge im Durchschnitt tiefer als der errechnete Bedarf der Kulturen. Die meisten Betriebe (zwischen 89 und 96%) hatten einen N-Saldo von ≤ 110% und zwischen 57 bis 82 % einen N-Saldo von ≤ 100%, was einer ausgeglichenen Suisse-Bilanz im Sinne der Direktzahlungsverordnung entspricht. Der Kulturbedarf (Posten C der Wegleitung) belief sich im Median auf 90 bis 103 kg N ha⁻¹ LN. Der eigenbetriebliche Hofdüngeranfall (Posten A2) war im Median zwischen 32 und 48 kg N_{verf} ha⁻¹ LN. Der Zwischensaldo (A2-C) war somit deutlich tiefer (zwischen -46 und -37 kg N_{verf} ha⁻¹ LN) als der Endsaldo, der zusätzlich die N-Düngerimporte und -exporte einbezieht. Die Zu- und Wegfuhr von Hofdünger (Posten A3) war im Median bei 0 kg N_{verf} ha⁻¹ LN, im

Mittel wurden zwischen -2 und $1 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1} \text{ LN}$ Hofdünger verschoben. Jedoch zeigten die zu- und weggeführten Mengen an Hofdüngern eine Streuung von bis zu $100 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1} \text{ LN}$. Die maximal weggeführte Menge lag bei $-160 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1} \text{ LN}$, die maximal zugeführte Menge bei $+75 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1} \text{ LN}$. Die mit den übrigen Düngern (inkl. Mineraldünger, Posten D) zugeführte N-Menge lag im Median zwischen 22 und $35 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1} \text{ LN}$. Der Median der Vergärungsprodukte und Ernterückstände Gemüse (Posten E) sowie der innerbetriebliche Nährstoffbedarf für Futter von ungedüngten Wiesen (Posten T) lag bei 0 . Wie die Bodenoberflächenbilanz zeigte auch die Suisse-Bilanz einen leicht abnehmenden Trend mit der Zeit (p -Wert des Mann-Kendall Test = 0.0001 , Abbildung A 3) und einen um $-9.5 \text{ kg N}_{\text{verf}} \text{ ha}^{-1}$ tieferen Saldo im Jahr 2022 im Vergleich zum Jahr 2009.

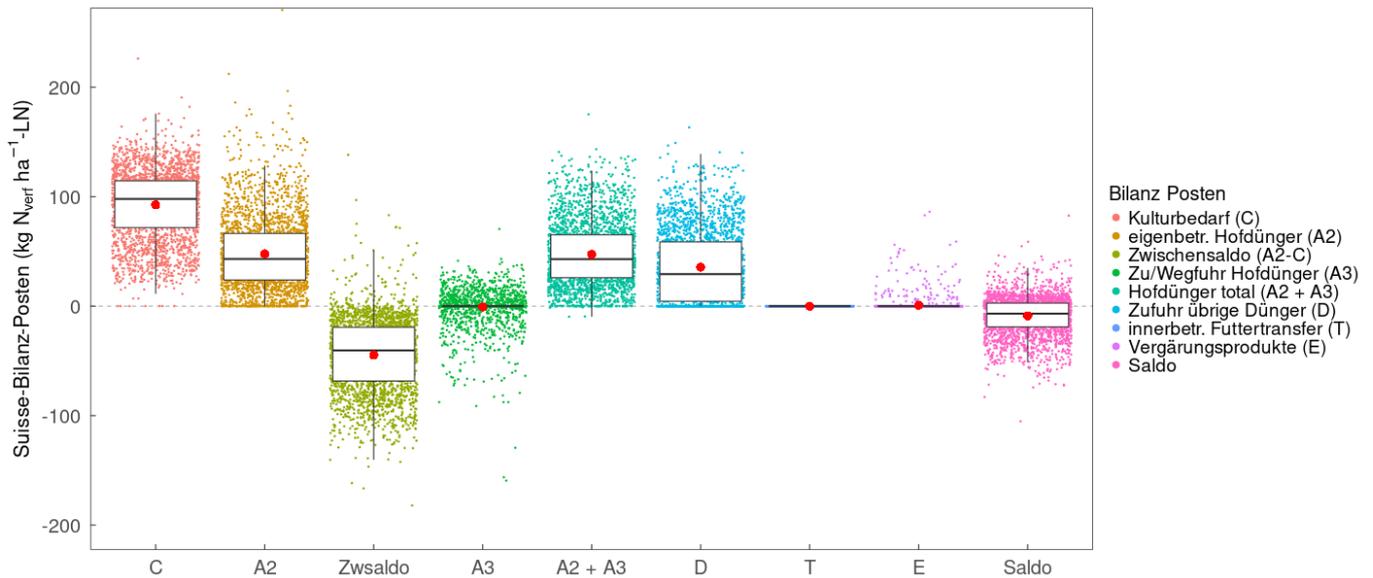


Abbildung 3: Suisse-Bilanz für Stickstoff für alle Jahre zwischen 2011 und 2022. Die einzelnen Posten der Bilanz (x-Achse) sind in der Legende beschrieben und im Methodenteil (Kapitel 3.2.2) erklärt. Rote Punkte in den Boxen zeigen die Mittelwerte der einzelnen Posten. Ein Punkt entspricht einem Betrieb pro Jahr.

Bilanzierte N-Abzüge

Die in der Suisse-Bilanz berücksichtigten unvermeidbaren N-Verluste waren im Zeitraum 2011-2022 im Median zwischen 74 und $91 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ LN}$, mit Gesamtabzügen, die bis über 400 kg N ha^{-1} reichten (Abbildung 4). Die Mittelwerte der Abzüge waren leicht höher als die Medianwerte (zwischen 80 und 95 kg N ha^{-1}). Die gesamten N-Abzüge setzten sich zusammen aus Stall-Lagerungsverlusten (im Median zwischen 25 und $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ LN}$), Laufhofverlusten (ca. $1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ LN}$), Weideverlusten (im Median zwischen 12 und $16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ LN}$) und den Feld-Verlusten (berechnet als Differenz N_{ges} und N_{verf} der Posten A2 und A3; im Median zwischen 30 und $41 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ LN}$; Abbildung 4). Bei Mineraldüngern sind in der Suisse-Bilanz keine Abzüge möglich.

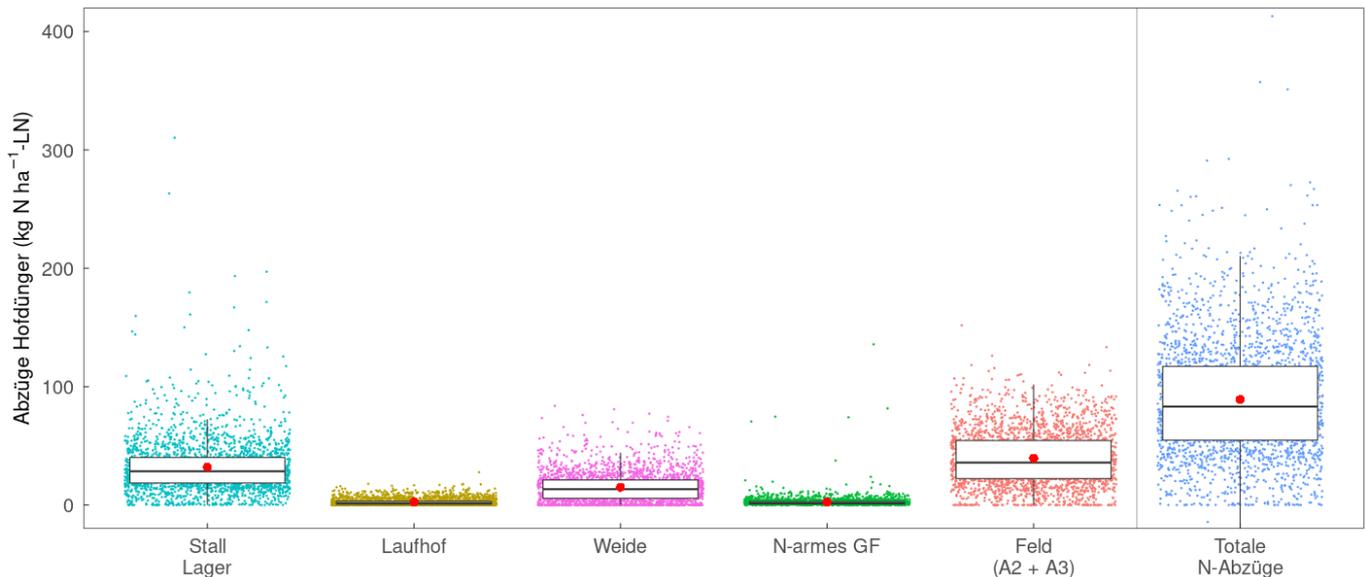


Abbildung 4: N-Abzüge der Hofdünger in der Suisse-Bilanz aller Jahre zwischen 2011 und 2022. Die N-Abzüge setzen sich aus Stall- & Lagerungsverlusten, Laufhof-, Weide- und Feldverlusten zusammen. Zusätzlich ist die Korrektur aufgrund des N-armen Grundfutters (GF) aufgeführt. Die Stall- & Lagerungsverluste sind via die Differenz von N_{tot} (aus der Bodenoberflächenbilanz) und N_{ges} geschätzt. Die restlichen Verluste sind direkt aus den Suisse-Bilanzen im AgroTECH entnommen. Rote Punkte in den Boxen zeigen die Mittelwerte der einzelnen Verluste. Ein Punkt entspricht einem Betrieb pro Jahr.

4.1.1.3 Vergleich der N-Bilanzen

Je nach Bilanzierungsmodell fielen die N-Bilanzen unterschiedlich aus, was klar methodisch begründet ist. Die Korrelation zwischen den Bodenoberflächenbilanzen und Suisse-Bilanzen ist schwach (Spearman-Rank $\rho = 0.38$) und weist eine hohe Varianz über die prozentualen Suisse-Bilanz-Saldi auf (Abbildung 5 links). So hatten Betriebe, die eine ausgeglichene Suisse-Bilanz aufwiesen (Saldo zwischen -1 und $1 \text{ kg N}_{ver} \text{ kg}^{-1} \text{ ha LN}$), Bodenoberflächenbilanzen zwischen -60 und 300 kg N/ha LN (Abbildung 5 links). Je mehr organischer Dünger ein Betrieb einsetzte, desto grösser waren die Abzüge, die in der Suisse-Bilanz geltend gemacht wurden. Da diese Abzüge in der Bodenoberflächenbilanz jedoch nicht berücksichtigt wurden, fielen die Überschüsse dementsprechend höher aus. Es gibt ganz wenige Betriebe, welche höhere Suisse-Bilanzen als Bodenoberflächenbilanzen aufwiesen (Abbildung 5 links). Dies waren in den meisten Fällen Betriebe mit Spezialkulturen, die wenig bis keinen Hofdünger einsetzten und deren Erträge in der Suisse-Bilanz deutlich tiefer geschätzt wurden als tatsächlich geerntet wurde. Werden jedoch die berücksichtigten N-Verluste der Suisse-Bilanz in den Saldo eingerechnet, zeigt der Vergleich der beiden Bilanzen eine hohe Korrelation (Spearman-Rank $\rho = 0.82$), die Gruppierung nach prozentualem Suisse-Bilanz-Saldo verschwimmt und die Varianz wird kleiner (Abbildung 5 rechts). Dies zeigt, dass der prozentuale Suisse-Bilanz Saldo für N nicht für die Bestimmung von Verlusten an die Umwelt geeignet ist. Es wird aber auch deutlich, dass durch die Anrechnung der Suisse-Bilanz-Verluste ein quantitativer, umweltorientierter Indikator berechnet werden kann, der ähnlich der Bodenoberflächenbilanz ist.

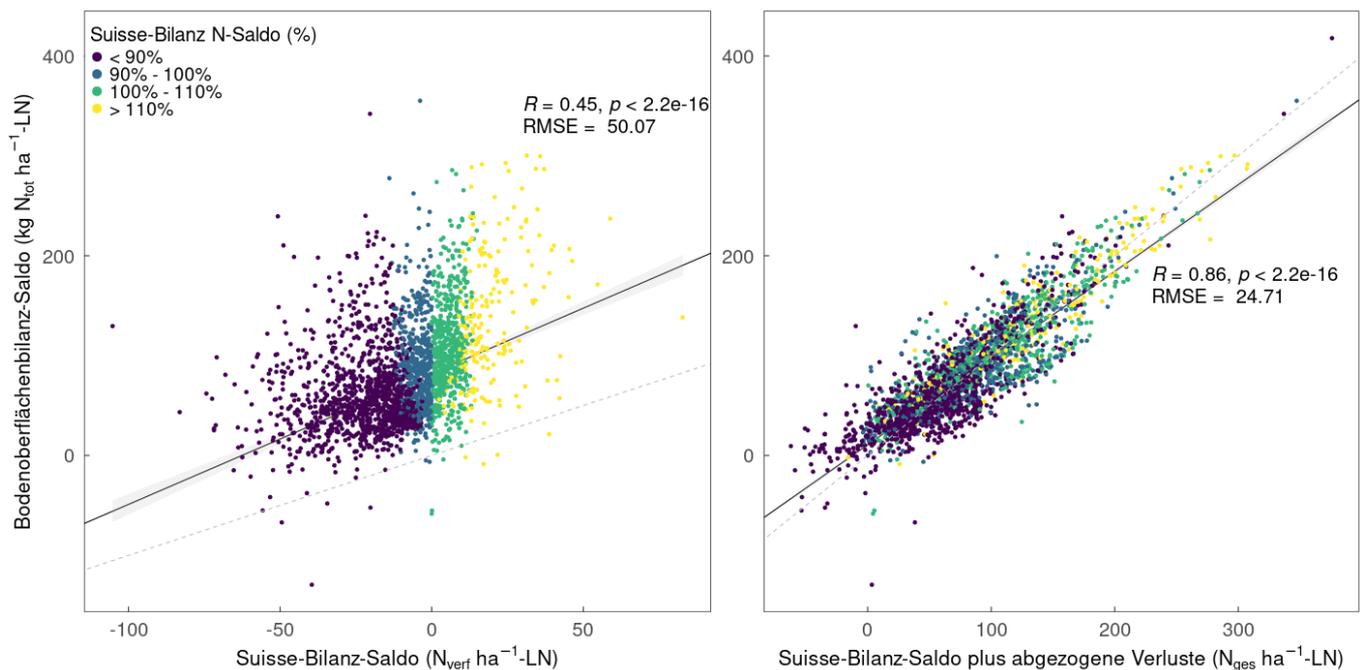


Abbildung 5: Links: Vergleich zwischen den berechneten N-Bodenoberflächenbilanzen und den gelieferten Suisse-Bilanzen der Jahre 2011 bis 2022. Rechts: Vergleich zwischen den berechneten N-Bodenoberflächenbilanzen und den Suisse-Bilanzen inklusive der abgezogenen N-Verluste der Jahre 2011 bis 2022. Das heisst, den Suisse-Bilanz-Saldi wurden die sonst abgezogenen N-Verluste hinzugefügt. Jeder Punkt entspricht einem Betrieb und die Farbe entspricht dem Suisse-Bilanz-Saldo (siehe Legende). Die schwarzen Linien zeigen die Theil-Senn-Regressionslinien und die Korrelationskoeffizienten zeigen die Ergebnisse der Spearman-Rank-Korrelation. Die gestrichelte graue Linie zeigt die 1:1-Linie.

4.1.2 Phosphor

4.1.2.1 Bodenoberflächenbilanz – Input / Output und Saldi

Der P-Saldo der Bodenoberflächenbilanz war im Median über die Jahre stets sehr ausgeglichen (Median zwischen -2 und 0 kg P ha⁻¹ LN), während die Mittelwerte leicht darunter lagen (zwischen -3 und 0 kg P ha⁻¹ LN). Der totale P-Eintrag (Median zwischen 22 und 28 kg P ha⁻¹ LN) war somit nur gering kleiner als der P-Entzug über die Ernte (Median zwischen 25 und 28 kg P ha⁻¹ LN). Im Vergleich zur N-Bilanz hatten deutlich mehr Betriebe einen negativen Saldo (Abbildung 6). Der bedeutendste P-Eintrag (pro ha LN) waren die Hofdünger (I1) mit Medianwerten zwischen 16 und 23 kg P ha⁻¹ LN, gefolgt von den P-Einträgen mit den Mineraldüngern (Medianwerte zwischen 0 und 1 kg P ha⁻¹ LN, die Mittelwerte waren höher und zwischen 2 und 3 kg P ha⁻¹ LN) und der atmosphärischen Deposition (0.35 kg P ha⁻¹ LN Standardwert über alle Jahre). Die P-Einträge über die Saat und über Recyclingdünger waren im Mittel vernachlässigbar, wobei letztere auf Einzelbetrieben relevant sein konnten (Abbildung 6). Zwischen den Jahren 2009 – 2017 waren die P-Oberflächenbilanzen im Median relativ konstant und nahmen danach kontinuierlich ab (p-Wert des Mann-Kendal Test = 0.05, Abbildung A 4).

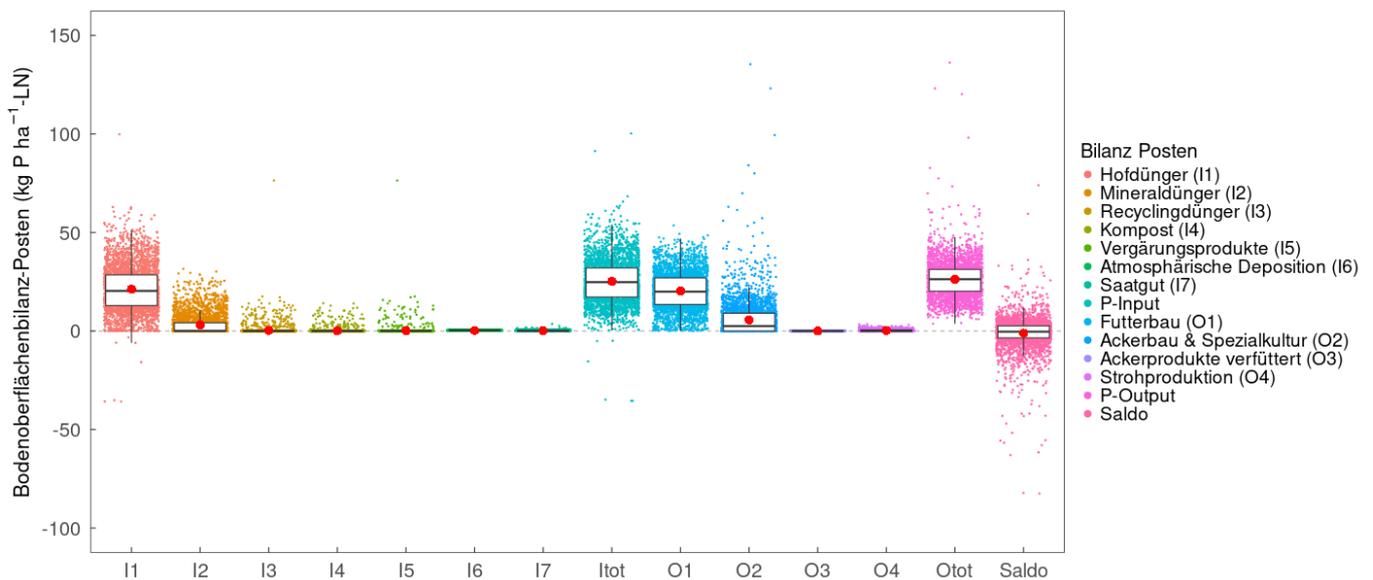


Abbildung 6: Bodenoberflächenbilanzen für Phosphor für alle Jahre zwischen 2011 und 2022. Die einzelnen Phosphor-Einträge (I1 – I7) und Phosphor-Austräge (O1 – O4) sind in der Legende beschrieben und im Methodenteil erklärt (Kapitel 3.2.1). Die roten Punkte in den Boxen zeigen die Mittelwerte. Ein Punkt entspricht einem Betrieb pro Jahr.

4.1.2.2 Suisse-Bilanz

Die P-Saldi der Suisse-Bilanz waren im Median leicht negativ (zwischen -3 und -1 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$). Die Mittelwerte der Suisse-Bilanzen fielen noch tiefer aus (zwischen -4 und -2 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$; Abbildung 7). Die meisten (zwischen 88 und 97 %) der Betriebe hielten den Suisse-Bilanz-Grenzwert ein (d.h. Saldo unter 110% - hier in kg P gezeigt) und zwischen 60% und 76% wiesen einen Saldo von unter 100% aus. Der Kulturbedarf (Posten C) belief sich auf Werte zwischen 23 und 27 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$. Der eigenbetriebliche Hofdüngeranfall (Posten A2) war zwischen 11 und 18 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$. Der Zwischensaldo (A2-C) resultierte somit in tieferen Werten (zwischen -11 und -7 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$) als der Endsaldo. Die Hofdünger-Zu- und Wegfuhr (Posten A3) war über alle Jahre im Median bei 0 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$, im Mittel wurden zwischen 0 und 1 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$ verschoben. Die zu- und weggeführten Mengen einzelner Betriebe waren zum Teil jedoch beträchtlich, mit Mengen von bis zu 37 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$, die zugeführt wurden und bis zu 81 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$, die abgeführt wurden (Abbildung 7). Die mit übrigen Düngern (Posten D) zugeführte Menge an P lag im Median zwischen 3 und 4 $\text{kg ha}^{-1} \text{LN}$, jedoch führten einzelne Betriebe beträchtliche Mengen bis zu 35 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$ durch übrige Dünger zu. Dagegen waren die Mengen an Vergärungsprodukten und Ernterückständen bei Gemüse (Posten E) und der innerbetriebliche Nährstoffbedarf für Futter von ungedüngten Wiesen (Posten T) vernachlässigbar mit Medianwerten von 0 $\text{kg P ha}^{-1} \text{LN}$ (Abbildung 7). Genau wie die Oberflächenbilanzen für Phosphor zeigten die Suisse-Bilanzen über die Zeit den gleichen Trend mit den höchsten Bilanzen in der Mitte der Zeitreihe und einer kontinuierlichen Abnahme der Saldi gegen Ende der Zeitreihe (Abbildung A 5). Über die gesamte Zeitreihe war der Trend statistisch jedoch nicht signifikant (p -Wert des Mann-Kendall Tests = 0.16).

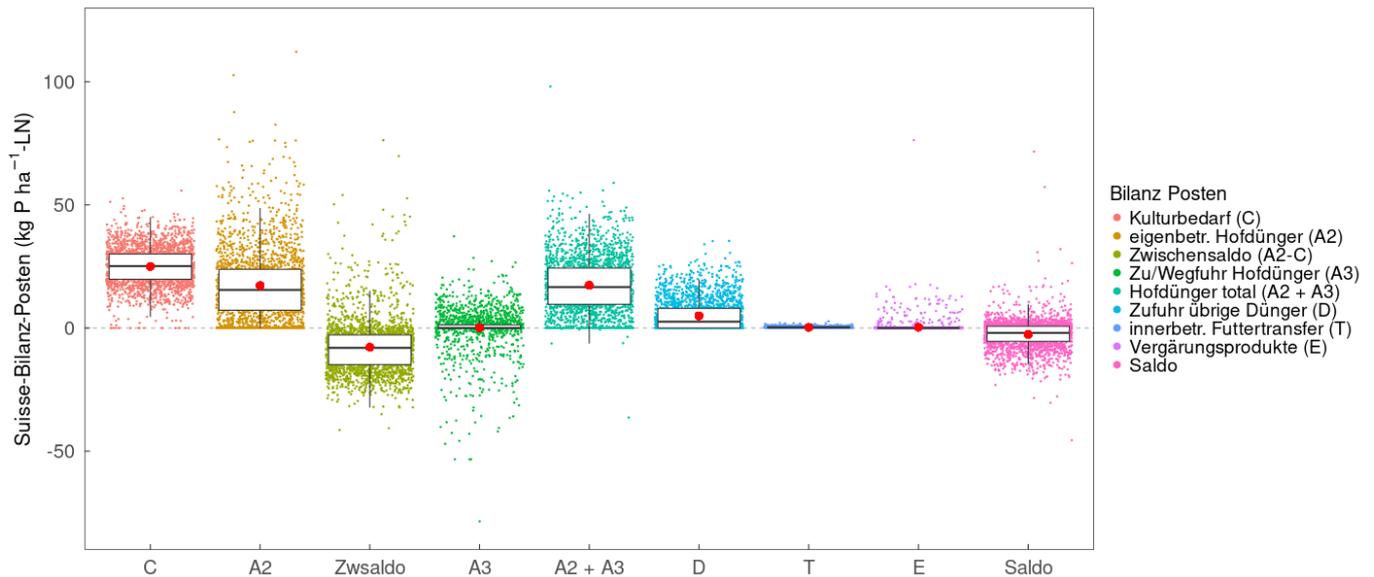


Abbildung 7: Die einzelnen Posten und die Saldi für die Suisse-Bilanzen von Phosphor (in kg P pro Hektar LN) für alle Jahre zwischen 2011 und 2022. Die einzelnen Posten der Bilanz (x-Achse) sind in der Legende beschreiben und im Methodenteil erklärt (Kapitel 3.2.2). Die roten Punkte in den Boxen zeigen die Mittelwerte der einzelnen Posten. Ein Punkt entspricht einem Betrieb pro Jahr.

4.1.2.3 Vergleich der P-Bilanzen

Für P waren die Ergebnisse der Bilanzsaldi im Unterschied zu N wesentlich ähnlicher zwischen den beiden Methoden, da in der Suisse-Bilanz für P keine Abzüge gemacht werden, primär aufgrund der geringeren Volatilität des Phosphors im Vergleich zu Stickstoff. Die Streuung ist kleiner und die Korrelation höher (Spearman $\rho = 0.77$) und die Theil-Senn-Regressionslinie fällt praktisch auf die 1:1 Linie (Achsenabschnitt = 1.55, Steigung = 0.98; Abbildung 8). Jedoch gab es wenige Betriebe, die eine um einiges tiefere Oberflächenbilanz im Vergleich zur Suisse-Bilanz aufweisen, insbesondere im ausgeglichenen Bereich (90% - 110%) der Suisse-Bilanz. Auch hier ist der Grund, dass der Pflanzenbedarf in der Suisse-Bilanz tiefer abgeschätzt wurde, als durch den tatsächlichen Ertrag der Kulturen schlussendlich an P entzogen wurde. Zusammengefasst eignen sich Suisse-Bilanz-Saldi für P besser für die Verwendung als Umweltindikator als für N.

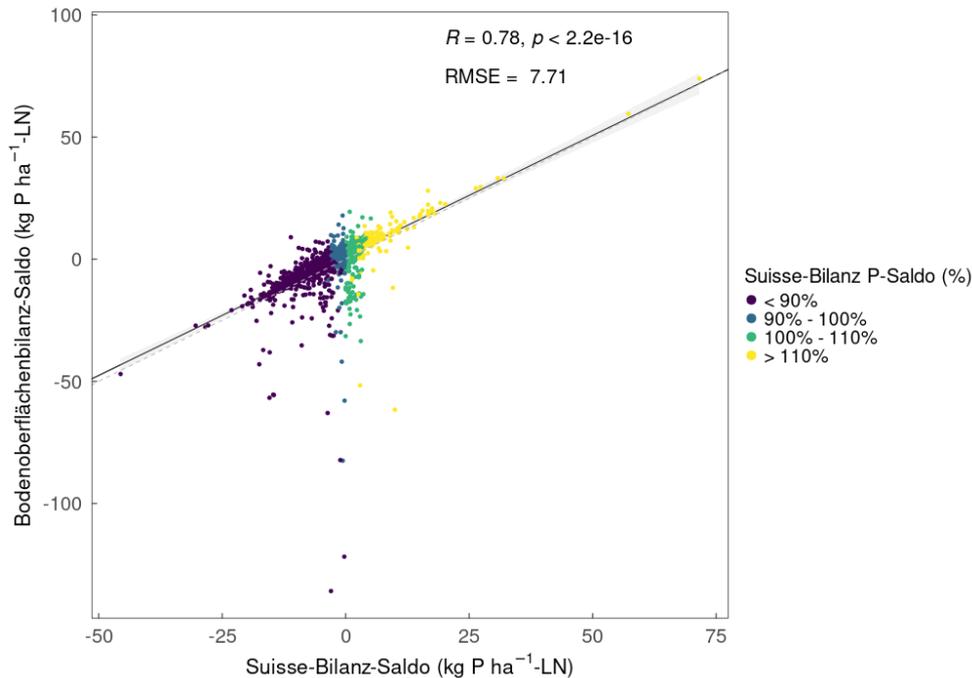


Abbildung 8: Vergleich zwischen den in der ZA-AUI berechneten P-Bodenoberflächenbilanzen und den gelieferten Suisse-Bilanzen der ZA-AUI-Betriebe der Jahre 2011 bis 2021. Jeder Punkt entspricht einem Betrieb und die Farbe entspricht dem Suisse-Bilanz-Saldo (siehe Legende). Die schwarze Linie zeigt die Theil-Senn-Regressionslinie und die Korrelationskoeffizienten zeigen die Ergebnisse der Spearman-Rank-Korrelation. Die gestrichelte graue Linie zeigt die 1:1-Linie im Plot.

4.2 Unterschiede nach Betriebstypen und -management

Für ein besseres Verständnis der beobachteten Variabilität bei den Bodenoberflächen- und Suisse-Bilanzen werden in diesem Kapitel der Einfluss von verschiedenen Betriebs- und Managementfaktoren auf die Bilanzen untersucht und diskutiert. Dazu gehören die Produktionsregionen, die eingesetzten Düngermengen und -typen sowie der Tierbestand eines Betriebs. Einen nachweislichen Einfluss dieser Faktoren auf die Bilanz kann genutzt werden, um gezielte Massnahmen zur Förderung in der Schweizer Landwirtschaft zu ergreifen.

Die N-Bodenoberflächenbilanzen der Bergbetriebe waren über die Jahre signifikant tiefer als die Bodenoberflächenbilanzen der Hügel- und Talbetriebe (Tabelle 2). Dies kann dadurch erklärt werden, dass im Berggebiet generell weniger intensiv bewirtschaftet wird als in tieferen Lagen, somit ergeben sich auch tiefere Nährstoffeinsätze und -verluste. Zwischen den Hügel- und Talbetrieben konnte kein signifikanter Unterschied identifiziert werden. Im Gegensatz dazu sind die regionalen Unterschiede bei den Suisse-Bilanzen gering und bilden keine signifikanten Unterschiede ab.

Etwas anders sieht es bei den P-Bilanzen aus: Hier hatten die Talbetriebe generell tiefere Bodenoberflächenbilanzen als die Berg- und Hügelbetriebe, jedoch ist dieser Effekt nur zwischen den Berg- und Talbetrieben statistisch signifikant (Tabelle 2). Das gleiche Bild ergab sich auch bei den Suisse-Bilanzen für P, wo Talbetriebe signifikant tiefere Bilanzen aufweisen als die Berg- und Hügelbetriebe. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung könnte sein, dass die Talbetriebe mehr Ackerbau betreiben und somit im Verhältnis weniger Hofdünger einsetzen, als Hügel- und Bergbetriebe und gleichzeitig im Verhältnis weniger P-Mineraldünger als N-Mineraldünger zukaufen. Der Blick auf die marginalen und konditionalen R^2 -Werte zeigt jedoch, dass für alle Bilanzen nur ein geringer Teil der Varianzen durch die Regionen erklärt werden kann, der grösste Teil wird durch die zufälligen Effekte (Betrieb und Jahr) erklärt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Einfluss der Regionen auf die Bodenoberflächenbilanzen und Suisse-Bilanzen von Stickstoff und Phosphor. Die Tabelle zeigt die Resultate der linearen gemischten Modelle, mit den Regionen als feste Effekte und den Betrieben und Jahr als zufällige Effekte. Die Schätzwerte zeigen die Schätzungen der Koeffizienten für die festen Effekte. Diese Werte geben an, wie stark sich die Bilanzen zwischen den Regionen verändern im Vergleich zum Achsenabschnitt (Bergregion). SE zeigt den Standardfehler der Schätzwerte. Zusätzlich werden die marginalen R^2 - (R^2_m) und die konditionellen R^2 - (R^2_c) Werte präsentiert. Der R^2_m zeigt die Varianz, welche durch die Region (fester Effekt) erklärt werden kann, und der R^2_c zeigt die Varianz, die durch die Region, Betrieb und Jahr (feste und zufällige Effekte) erklärt werden kann.

		Schätzwert	SE	P-Wert		R^2_m	R^2_c
Bodenoberflächenbilanz N_{tot}	Achsenabschnitt (Berg)	56.06	4.13			0.05	0.68
	Hügel	30.99	4.94	< 0.01	***		
	Tal	27.06	4.73	< 0.01	***		
Suisse Bilanz N_{verf}	Achsenabschnitt (Berg)	-9.26	1.54			< 0.01	0.60
	Hügel	-1.83	1.68	0.28			
	Tal	1.03	1.59	0.52			
Bodenoberflächenbilanz P	Achsenabschnitt (Berg)	-0.80	0.96			< 0.01	0.79
	Hügel	-0.69	1.13	0.54			
	Tal	-2.76	1.11	0.01	*		
Suisse Bilanz P	Achsenabschnitt (Berg)	-1.35	0.55			0.01	0.45
	Hügel	-0.68	0.64	0.29			
	Tal	-1.76	0.60	< 0.01	***		

Die nährstoffliche Bewirtschaftungsintensität kann als Gesamtdüngerinput pro Jahr im Verhältnis zur landwirtschaftlichen Nutzfläche dargestellt werden. So zeigt sich zum Beispiel, dass weniger intensive Bewirtschaftung zu tieferen Bilanzen führt (Abbildung 9). Beim N hat die eingesetzte Düngermenge einen stärkeren Einfluss auf die Bodenoberflächenbilanz als auf die Suisse-Bilanz, da bei letzterer nur der pflanzenverfügbare N berücksichtigt wird und der abgezogene N nicht im Saldo enthalten ist. Da beim P keine Abzüge in der Suisse-Bilanz geltend gemacht werden, hat die P-Suisse-Bilanz auch eine stärkere positive Korrelation mit der totalen P-Düngemenge und unterscheidet sich kaum in der Steigung der P-Bodenoberflächenbilanz (Abbildung 9).

Durch die Bilanzierung von N_{tot} bei der Bodenoberflächenbilanz (im Gegensatz zu N_{verf} in der Suisse-Bilanz) wird die Differenz zwischen Bodenoberflächenbilanz und Suisse-Bilanz vor allem für Betriebe gross, die verhältnismässig hohe Mengen organische Dünger einsetzen (Abbildung 10). Da bei organischem Phosphor keine Abzüge gemacht werden, ist dort der Effekt kaum sichtbar (Abbildung A 6).

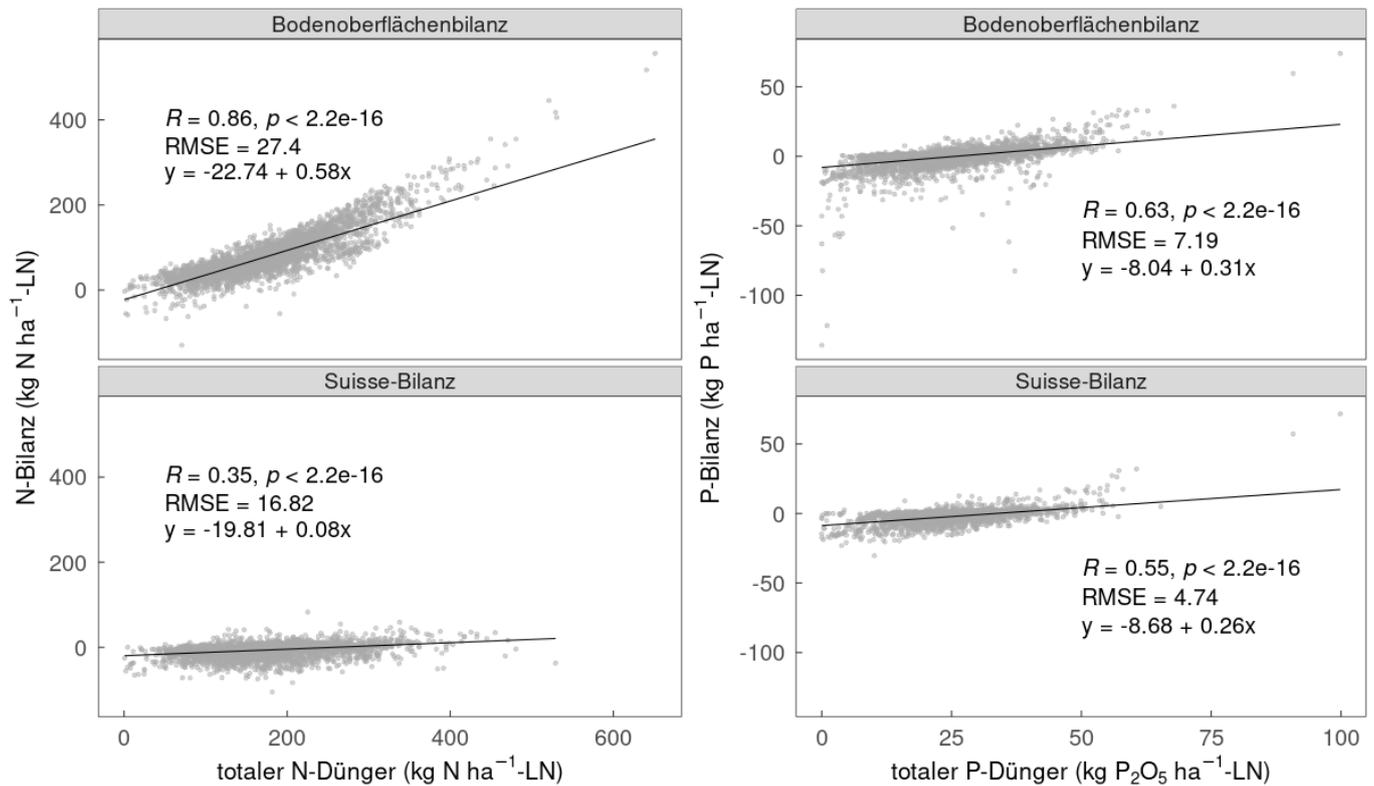


Abbildung 9: Bodenoberflächenbilanzen (oben) und Suisse-Bilanzen (unten) in Abhängigkeit vom totalen Düngereinsatz auf den Betrieben für Stickstoff (links) und Phosphor (rechts) über alle Jahre zwischen 2011 – 2022. Die Einheit der N-Bilanzen ist für die Bodenoberflächenbilanz in N_{tot} und für die Suisse-Bilanzen in N_{verf} . Die schwarze Linie zeigt die Theil-Senn-Regression und die Korrelationskoeffizienten zeigen die Ergebnisse der Spearman-Rank-Korrelation.

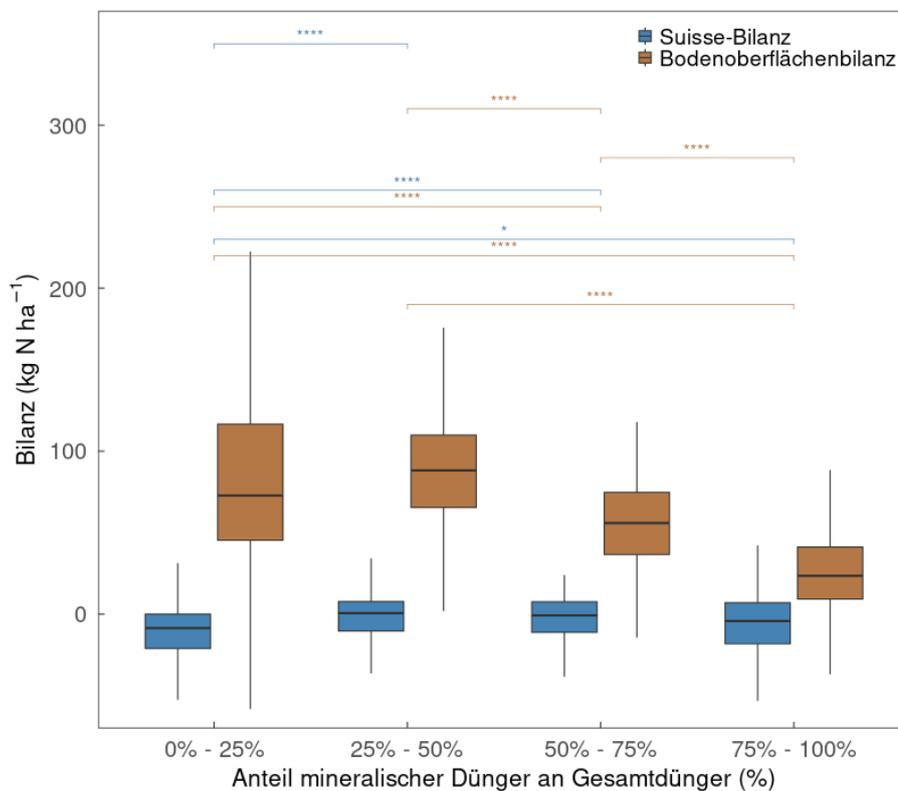


Abbildung 10: Bodenoberflächenbilanz (braun) und Suisse-Bilanz-Saldo (blau) von Stickstoff in Abhängigkeit des Anteils von eingesetztem mineralischem Dünger am Gesamtdüngereinsatz für alle Jahre zwischen 2011 - 2021. Die Einheit für die Bodenoberflächenbilanz ist in N_{tot} und die Einheit für die Suisse-Bilanz in N_{verf} . Die statistischen Resultate zeigen die Unterschiede (t-Test) zwischen den Gruppen auf der x-Achse innerhalb der Suisse-Bilanzen (blaue Balken) und innerhalb der Bodenoberflächenbilanzen (braune Balken).

Der gleiche Trend wie für die totale Düngermenge (Abbildung 9) war auch für den Tierbestand (in GVE pro Hektare LN) eines Betriebes sichtbar (Abbildung 11). Die Bodenoberflächenbilanzen für N und P korrelierten mit dem Tierbestand, d.h. Betriebe mit grösserem Tierbestand hatten in der Regel auch höhere Nährstoff-Bodenoberflächenbilanzen. Dies stimmte auch für die Suisse-Bilanz von P, jedoch nicht für die Suisse-Bilanz von N. Bei der letzteren waren die Bilanzen für alle Betriebe auf gleichem Niveau, unabhängig vom Tierbestand. Dies ist wieder methodisch bedingt, da Betriebe mit grossem Tierbestand mehr organische Dünger einsetzen, welche in der Suisse-Bilanz durch die Abzüge weniger stark berücksichtigt werden (Abbildung 10). Im Gegensatz zum Tierbestand eines Betriebes hatte die Grösse eines Betriebes bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzungsfläche (LN) keinen Einfluss auf die N- und P-Bilanzen, weder auf die Bodenoberflächenbilanzen noch auf die Suisse-Bilanzen (Abbildung A 7). Betriebe mit grösseren LN hatten tendenziell höheren Nährstoffinput, jedoch waren durch die höheren Erträge auch die Nährstoffausträge höher. Durch den Flächenbezug der Bilanzen (pro Hektar LN) hatte die LN keinen direkten Einfluss auf die Bilanzen. Daraus kann man schliessen das der Tierbestand pro Betriebsfläche ein wichtiger Indikator für die Bewirtschaftungsintensität ist.

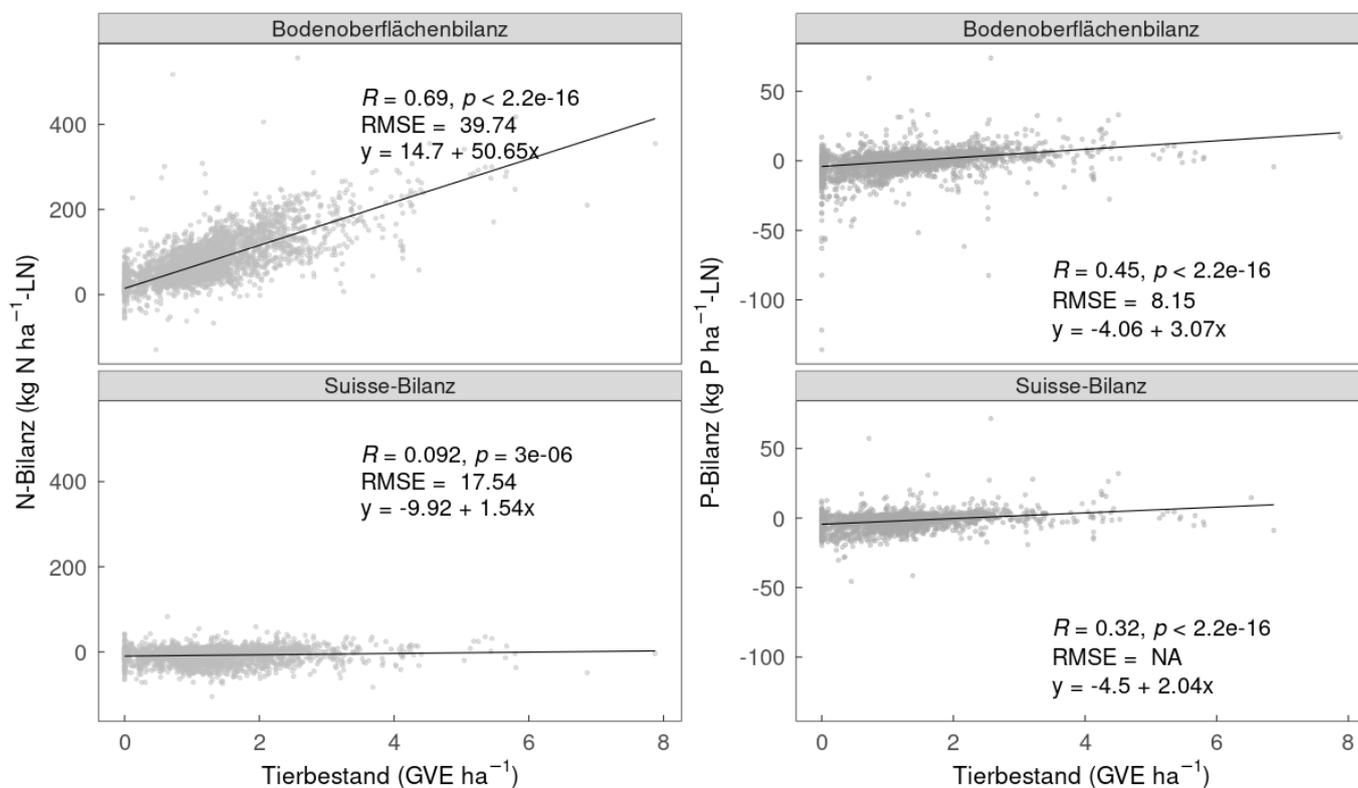


Abbildung 11: Oberflächenbilanzen (oben) und Suisse-Bilanzen (unten) in Abhängigkeit vom Tierbestand eines Betriebes (in GVE pro Hektar LN) für Stickstoff (links) und Phosphor (rechts) über alle Jahre zwischen 2011 – 2022. Die Einheit der N-Bilanzen ist für die Oberflächenbilanz in N_{tot} und für die Suisse-Bilanzen in N_{verf} . Die schwarze Linie zeigt die Teil-Senn-Regression und die Korrelationskoeffizienten zeigen die Ergebnisse der Spearman-Rank-Korrelation.

4.3 Plausibilität und Nutzbarkeit der Daten

4.3.1 Quantitative Einordnung und Plausibilität

Obwohl die Daten der ZA-AUI verschiedene Plausibilitätstest durchliefen und gegebenenfalls nachkorrigiert wurden (Gilgen et al., 2023), basieren die Resultate der Bilanzen auf selbstdeklarierten Daten der Betriebe und eine absolute Korrektheit ist schwer nachzuweisen. Um die Resultate der berechneten Indikatoren weiter auf ihre Plausibilität zu prüfen, wurden die Bodenoberflächenbilanzen mit den nationalen Bilanzen verglichen, welche durch das Bundesamt für Statistik berechnet werden (auch nach OECD-Methode; Abbildung A 2). Der Vergleich für die N-Bodenoberflächenbilanz zeigt, dass die nationalen Werte gut mit den Mittelwerten der hier bewerteten ZA-AUI-Betriebe übereinstimmen. Somit ist ersichtlich, dass die Bilanzen der ZA-AUI-Betriebe im Mittel dem nationalen Durchschnitt entsprechen, obwohl die Stichprobe in der ZA-AUI nicht gänzlich zufällig ist (Gilgen et al., 2023).

Für die Suisse-Bilanz gibt es keine jährliche nationale Erhebung analog zu der Bodenoberflächenbilanz, es ist nur die Erfüllung für den ÖLN auf jährlicher Ebene bekannt. Diese wird mit einer angestrebten Kontrollfrequenz von ca. 4 Jahre überprüft. Um die aktuelle Umsetzung des Nährstoffmanagements und den damit verbundenen durchschnittlichen Suisse-Bilanzsaldi trotzdem bewerten zu können, führten Suter und Reidy (2021) eine Studie durch, in deren Suisse-Bilanzen auf Basis nationaler Daten für die Jahre 2002, 2010, 2015 und 2019 berechnet wurden. Die Stickstoffsaldi dieser nationalen Suisse-Bilanzen lagen für diese Jahre zwischen 114-119% und somit immer über dem Toleranzbereich der 110%. Im Vergleich zu den Bodenoberflächenbilanzen sind die von den ZA-AUI-Betrieben gelieferten Suisse-Bilanzen deutlich tiefer als die abgeschätzten nationalen Suisse-Bilanzen (Abbildung A 3). In der Studie von Sutter & Reidy (2021) wird beschrieben, dass die Diskrepanz zwischen dem grossmehrheitlichen Erfüllen der Suisse-Bilanz auf Betriebsebene und dem Überschreiten des maximalen Fehlerbereichs von 110% auf nationaler Ebene dadurch zustande kommen könnte, dass Betriebe durch das Ausnützen des legalen Spielraums den Suisse-Bilanz-Saldo um ganze 10% reduzieren können. Die grössten Hebel haben die Betriebe beim Ausnützen der 5%-Fehlerbereiche in der Grundfutterbilanz und bei den Krippen- und Lagerverlusten (Sutter & Reidy, 2021). Hier stellt sich also die Frage der Vergleichbarkeit der selbstdeklarierten Grundlagen für die Suisse-Bilanz.

4.3.2 Einsatz der Bilanzierungsansätze zur Bewertung nationaler Zielgrössen

Die aktuelle Form der Suisse-Bilanz ist aus mehreren Gründen ungeeignet als verlässlicher Indikator für Nährstoffverluste und zur Bewertung nationaler Zielgrössen. Dies wird unterstrichen durch den Fakt, dass, obwohl die Suisse-Bilanz seit 2002 im Einsatz ist und jeder ÖLN-Betrieb seit diesem Jahr eine ausgeglichene Bilanz vorweisen muss, die nationalen Nährstoffüberschüsse seit Jahren nur geringfügig abgenommen haben (Spiess & Liebisch, 2023). Erstens verhindern die Pauschalabzüge auf Stufe Stall und Lager eine betriebspezifische Abbildung der realen N-Verluste. Die Abzüge und Verluste sind oft nicht zweckmässig, da sie auf den grösstmöglichen Annahmen basieren und nicht pauschal abgezogen werden sollten, um Verluste oder die Nährstoffnutzungseffizienz bewerten zu können. Zudem wird nicht die vollständige Kaskade der N-Verluste berücksichtigt. So werden zum Beispiel wichtige N-Pfade, wie Ausbringungsverluste, kaum bzw. nur indirekt berücksichtigt. Des Weiteren wird die Suisse-Bilanz nur auf Gesamtbetriebsebene berechnet und gibt keine Auskunft über die Nährstoffnutzung auf Parzellenebene, weswegen man auch keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Düngeeffizienz ziehen kann.

Alle oben genannten Gründe führen zu einem verzerrten Bild der betrieblichen N-Flüsse. Somit können keine verlässlichen Aussagen zur N-Effizienz oder -Verlusten getroffen werden. Obwohl die Suisse-Bilanz im ÖLN genutzt wird und als Beweis dafür dienen soll, dass keine Überdüngung erfolgt, liegt der Fokus klar auf der Deckung des Stickstoffbedarfs der Kulturen und nicht den Umweltauswirkungen der Düngung. Unsere Analysen zeigen jedoch, dass die Suisse-Bilanz nicht per se ungeeignet für die Nachhaltigkeitsbewertung ist. Die eingeschränkte Nutzbarkeit ist heute massgeblich durch den prozentualen Saldo und den Abzügen und somit dem gelieferten Output basierend auf dem nicht überprüfaren Datenhintergrund begründet. Durch die vollständige Berücksichtigung der zugrundeliegenden Daten und dem aktuellen Wissen kann aus dem für die Suisse-Bilanz erhobenen Daten ein verlässlicher Umweltindikator generiert werden. Somit könnte durch das Anrechnen der Abzüge approximativ eine Bodenoberflächenbilanz pro Betrieb abgeschätzt werden (Abbildung 5). Dadurch können zum Beispiel die betriebspezifische Effizienz und Verbesserungspotentiale im Nährstoffmanagement aufgezeigt werden.

Die Bodenoberflächenbilanz hingegen kann als verlässlicher Indikator der Nährstoffüberschüsse interpretiert werden (Oenema et al., 2003). Der Flächenbezug erlaubt zusätzlich die Aggregation über mehrere Betriebe auf verschiedenen Ebenen und wird in der Schweiz schon auf verschiedenen Stufen angewendet. In der ZA-AUI wurden Bodenoberflächenbilanzen auf Betriebsebene für ca. 300 Betriebe berechnet. Auf nationaler Ebene führt das Bundesamt für Statistik eine Bilanz mit nationalen Statistiken durch. Mit dem Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) werden nun Bilanzen für die gesamte Schweiz approximativ auf Betriebsebene berechnet, damit die Resultate danach auf höherer Ebene aggregiert und ausgewertet werden können (z.B. Kanton). Somit können regionale Unterschiede in den Nährstoffüberschüssen aufgezeigt werden (Baumgartner et al., 2024). Dies ist hilfreich für das Monitoring der nationalen Umweltziele, und infolgedessen können bessere regionale Ziele und Massnahmen getroffen werden.

Obwohl die Bodenoberflächenbilanzen aktuell nicht zur Überprüfung des Absenkpades und der UZL verwendet werden, können diese Resultate trotzdem zur Einordnung der Nährstoffeffizienz von Betrieben verwendet werden. In Abbildung 12 werden die N-Einträge den N-Austrägen der Bodenoberflächenbilanzen einzelner Betriebe gegenübergestellt. In die Abbildung sind die Bereiche für die Zielerreichung des Absenkpades und der UZL abgebildet. Da der Absenkpfad Nährstoffe anhand der Hoftorbilanz überprüft wird, sind diese Zielbereiche in der Abbildung nur Abschätzungen, die durch das Umrechnen von Hoftorbilanz zur OECD-Bilanz (anhand beider nationalen Bilanzen) durchgeführt wurden. Zusätzlich werden in der Abbildung Effizienzlinien (Austrag/Eintrag) dargestellt. Diese Effizienzlinien können auch nicht direkt mit den Effizienzen aus der Hoftorbilanz verglichen werden, da die Ein- und Austräge der beiden Bilanzen unterschiedlich sind. Trotzdem kann diese Abbildung als visuelles Hilfsmittel dienen, in dem die N-Effizienz jedes einzelnen Betriebes einfach dargestellt werden kann.

Die Abbildung 12 zeigt, dass viele Betriebe der ZA-AUI im Jahr 2022 eine relativ hohe N-Effizienz aufweisen und die Zielbilanzen des Absenkpades und sogar des UZL teilweise erreichen. Die Mittelwerte aller Betriebe über die Jahre zeigen, wie sich die N-Effizienz verändert hat (Abbildung 12 rechts). So wurden die ZA-AUI Betriebe zwischen dem Jahr 2017 und 2019 effizienter in der N-Nutzung, in dem vor allem der Eintrag reduziert wurde und der Austrag in etwa gleich blieb. Zwischen den Jahren 2019 und 2022 blieben die Betriebe in etwa gleich effizient, jedoch gingen die N-Ein- und Austräge im gleichen Masse zurück (Abbildung 12 rechts), das heisst die Produktion nahm ab.

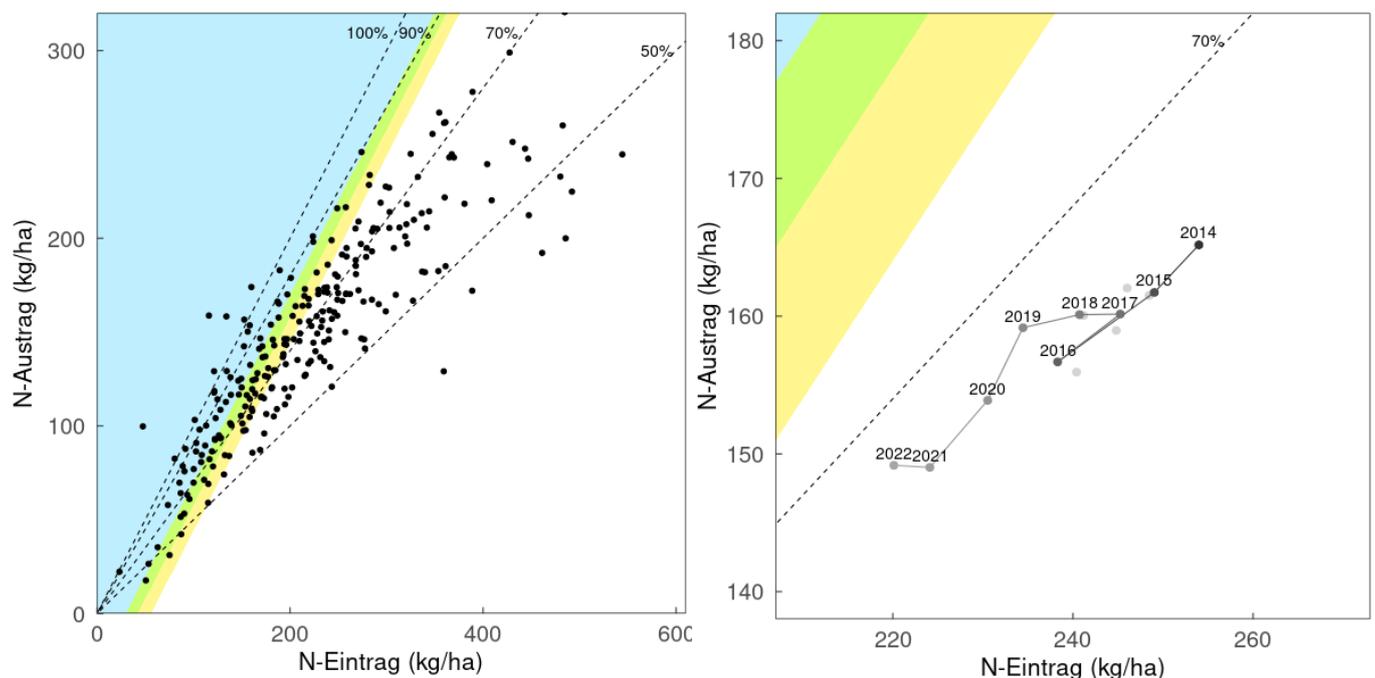


Abbildung 12: Gegenüberstellung von den N-Einträgen und N-Austrägen gemäss der Bodenoberflächenbilanz. Links: Alle Betriebe aus dem Jahr 2022. Rechts: Veränderung der mittleren N-Effizienz aller ZA-AUI-Betriebe über die Jahre (2014-2022, Jahre als Gradient von Schwarz nach Hellgrau). Die hellgrauen Punkte ohne Linie zeigen die mittleren Werte der Jahre 2009-2013. Die gestrichelten Linien in den Plots zeigen verschiedene N-Effizienzen. Der hellblaue Bereich zeigt die Bilanzen an, welche unter 30 kg N ha^{-1} liegen. Der grüne Bereich zeigt den ungefähren Zielbereich für die Umweltziele der Landwirtschaft an (unter 42 kg N ha^{-1} ; eigene Abschätzung) und der orange Bereich zeigt den ungefähren Zielbereich für den Absenkpfad Nährstoffe (unter 56 kg N ha^{-1} ; eigene Abschätzung).

Um den Absenkpfad und die UZL zu erreichen, müssen die Effizienzen auf vielen Betrieben erhöht werden. Dies kann, neben anderen Aspekten, vor allem durch eine parzellenspezifische Düngeplanung und Anwendung erfolgen und nachgewiesen werden. Weder die heutige Suisse-Bilanz noch die Bodenoberflächenbilanz eignen sich als Düngeplanungs-Tool, da beide Bilanztypen standortspezifische Faktoren nicht vollständig berücksichtigen. So fehlen z.B. Angaben zu N- und P-Pools im Boden (Klages et al., 2020), welche für eine nachhaltige Nährstoffnutzung wichtig sind und durch eine standortspezifische Düngeplanung besser berücksichtigt werden. Die Nichtberücksichtigung der ÖLN-Bodenuntersuchungen (P) in der Suisse-Bilanz widerspricht der guten fachlichen Praxis in der standortangepassten Düngung und wurde auch schon früher kritisiert (Bosshard et al., 2012). Eine Berücksichtigung der Bodenuntersuchungen in der Suisse-Bilanz bräuchte ebenfalls eine parzellenbasierte Erweiterung der Suisse-Bilanz im Sinne eines Düngeplans.

Hier liegt noch viel Potential für Verbesserung, z.B. mit detaillierter Planung standortangepasster Düngung (Grossrieder et al., 2022; Tanner et al., 2024). Das standortangepasste und parzellenspezifische Düngemanagement wichtig ist, ist in der Abbildung 13 ersichtlich: Obwohl der Grossteil der ZA-AUI-Betriebe ausgeglichene Suisse-Bilanzen (Abbildung A 3) und relativ effiziente Bodenoberflächenbilanzen (Abbildung 12) aufweisen, kommen auf Parzellenebene teils deutliche Überschüsse vor. Die GRUD-Düngungsnormen pro Kultur wurden zwar grösstenteils im Mittel eingehalten (Abbildung 13). Jedoch gibt es für viele Kulturen Parzellen, die eine Düngermenge erhielten, die auch durch Ertragskorrekturen nach oben nicht erklärt werden können. Hier müssten parzellenspezifische Düngungspläne ansetzen, um übermässigen Nährstoffeinsatz zu vermeiden. Mit der standortangepassten Düngung wird ortsspezifisch der Nährstoffbedarf einer Parzelle bestimmt und die GRUD-Düngungsnorm situationsbedingt angepasst. Dieser Nährstoffbedarf kann, insbesondere auf intensiv wirtschaftenden Betrieben, in der Suisse-Bilanz zugrunde gelegt werden um ein nachhaltiges Nährstoffmanagement einzufordern und abzubilden.

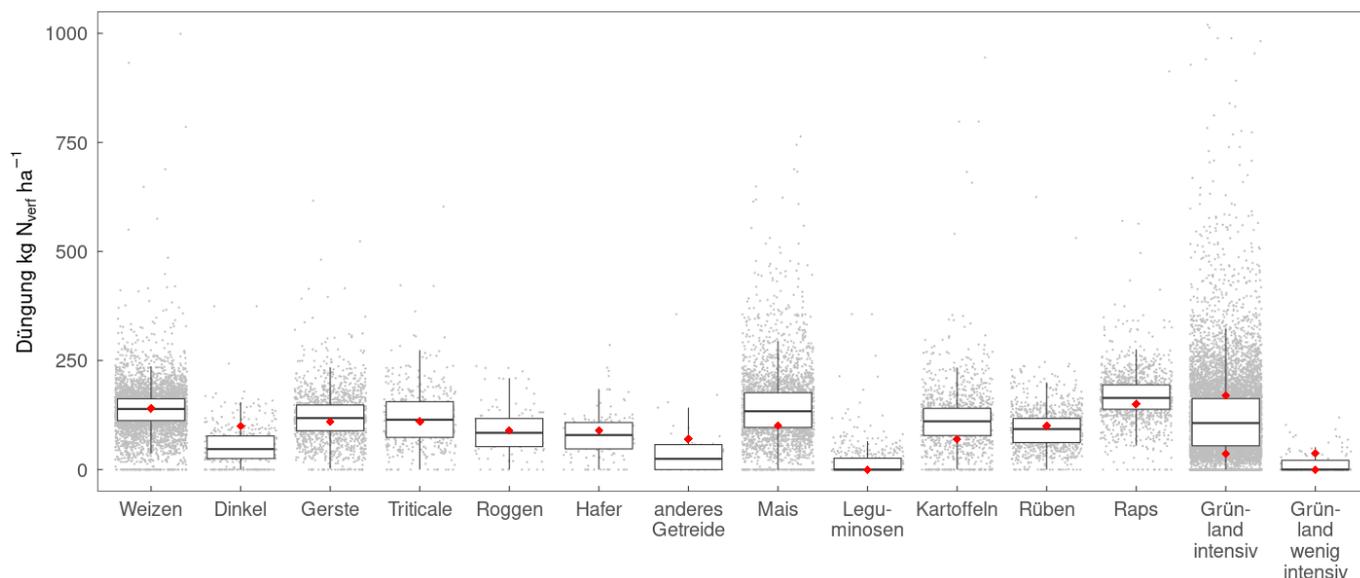


Abbildung 13: Eingesetzte Düngermengen (in kg N_{vert} pro Hektar) pro Kulturgruppe aller ZA-AUI-Betriebe zwischen 2011 und 2022. Die roten Punkte zeigen die Düngungsnorm gemäss GRUD für die entsprechenden Kulturen. Für Grünland intensiv und Grünland wenig intensiv gibt es zwei Punkte für die Düngeempfehlung: einmal den höchsten Wert (höchste Intensität für Wiesen) und einmal den tiefsten Wert (niedrigste Intensität für Weiden).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Für N zeigen unsere Analysen, dass die Suisse-Bilanz in ihrer heutigen Form als Indikator für eine nachhaltige Nutzung nicht geeignet ist, da sie primär die produktionsorientierte Praxis im Fokus hat. Eine umweltorientierte Bilanzierungsmethode ist jedoch notwendig, um verschiedene Ziele, wie den Absenkpfad Nährstoffe und die Umweltziele Landwirtschaft, sowie die betriebliche Nutzungseffizienz abzubilden. Der prozentuale Bilanzsaldo ist kein verlässlicher Indikator für die zielorientierte Betriebsplanung oder ein vergleichendes Umweltmonitoring. Es wäre zielführend, in der Suisse-Bilanz zusätzlich zum N_{verf} auch den N_{tot} zu bilanzieren; somit wäre ein Bezug zu Verlusten direkt möglich. Mit einer einfachen Transformation, zum Beispiel durch das Anrechnen der Abzüge, kann eine genauere Abschätzung der Umweltverluste erreicht werden. Zudem könnte eine stärkere Verpflichtung und bessere Überprüfung in Bezug auf erhöhte Salden und den zugrunde liegenden Faktoren in Betracht gezogen werden (z.B. ein Dünge- und Fütterungsplan oder die quantitative Erfassung von Nährstoffströmen für Betriebe mit einem grossen Tierbestand oder besonders intensiver Kulturführung). Im Gegenzug könnte man bei Betrieben, die die Nachhaltigkeitsgrenzwerte einhalten, auf detaillierte Prüfungen und bestimmte Planungsgrundlagen verzichten, um den Aufwand für diese Betriebe zu minimieren.

Für Phosphor hingegen ist die Nutzbarkeit der Suisse-Bilanz als Umweltindikator gegeben, da der Zusammenhang zwischen Suisse-Bilanz und Bodenoberflächenbilanz stark ist. Jedoch ist die Aussagekraft des P-Bilanzüberschusses für tatsächliche Verluste aufgrund der starken Speicherwirkung der Böden begrenzt. Hier stellt sich die Frage, ob zukünftig die ÖLN-Bodenanalysen in den Bilanzierungsansatz integriert werden können und somit das tatsächliche Umweltrisiko von P-Überschüssen besser dargestellt werden kann. Da diese Bodenanalysen bereits im Rahmen des ÖLN durchgeführt werden, könnten sie mit geringem Aufwand in die Bilanzierung integriert werden. Dies geht mit einer standortangepassten Düngeplanung und Anwendung von N einher.

Unser Bericht zeigt, dass aus den Suisse-Bilanz-Daten ohne grossen Mehraufwand eine grobe Abschätzung einer Bodenoberflächenbilanz gemacht werden kann. Für eine noch detailliertere Abschätzung wären zusätzliche Daten wertvoll, wie zum Beispiel die tatsächlichen Ertragsdaten oder der Kleeanteil auf dem Grasland für die SNF-Berechnung. Für einen Ausbau zur Hoftorbilanz werden die Outputs der Tierproduktion zusätzlich benötigt. Die bedeutendste Hürde, die Suisse-Bilanz-Daten für ein Agrarumweltmonitoring zu nutzen, ist die Datenverfügbarkeit beziehungsweise die Datennutzbarkeit. Ein robustes, gut abgestütztes Bilanzierungsinstrument, das sowohl der guten Düngepraxis, den betriebsspezifischen Gegebenheiten als auch den Regeln der Nachvollziehbarkeit entspricht, kann ein zentrales Element zwischen einer effizienten Landwirtschaft und ambitionierten Umweltzielen sein.

6 Literaturverzeichnis

- Agridea & BLW. (2023). Wegleitung Suisse-Bilanz. Version 1.18, August 2023.
- Anwander Phan-huy, S. (2000). Ökologisierung der Agrarpolitik in der Schweiz. Historische Entwicklung und erste Beurteilung. *Schriftenreihe ETH Zürich, Institut für Agrarwirtschaft 2000(1)*.
- BAFU & BLW. (2008). Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. *Umwelt-Wissen Nr. 0820*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU & BLW. (2016). Umweltziele Landwirtschaft – Statusbericht. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Baumgartner, S., Spiess E., Liebisch, F., & Gilgen, A. (2024). Regionale Stickstoffbilanzen – Erste Ergebnisse von MAUS (Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz). *Agroscope Science, 185*.
- Boller, B.C., & Nösberger J. (1987). Symbiotically fixed nitrogen from field-grown white and red clover mixed with ryegrasses at low levels of ¹⁵N-fertilisation. *Plant Soil, 104*. 219-226.
- Bosshard, C., Spiess, E., & Richner, W. (2012). Überprüfung der Methode Suisse Bilanz: Schlussbericht.
- Bosshard, C., & Richner, W. (2013). Bestimmungsfaktoren des Stickstoff-Überschusses auf Betriebsebene. Teil 2: Analyse auf Kulturbene. Abschlussbericht zuhanden des Bundesamtes für Landwirtschaft BLW. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich. S. 83-105.
- Bünemann-König, E., Wey, H., Hunkeler, D., Frick, H., & Bischoff, W. (2022). N-Effizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitrateintrages ins Grundwasser (Projekt NitroGäu). Abschlussbericht zuhanden des Amtes für Umwelt des Kantons Solothurn. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW. (2023). 30 Jahre Direktzahlungen. *Agrarbericht 2023*.
- Dalgaard, T., Bienkowski, J. F., Bleeker, A., Dragosits, U., Drouet, J. L., Durand, P., ... & Cellier, P. (2012). Farm nitrogen balances in six European landscapes as an indicator for nitrogen losses and basis for improved management. *Biogeosciences 9*. 5303-5321.
- Erisman, J.W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N. B., Petrescu, A. R., ... & de Vries, W. (2013). Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 368(1621)*. 20130116.
- Gilgen, A., Blaser, S., Schneuwly, J., Liebisch, F., & Merbold, L. (2023). The Swiss agri-environmental data network (SAEDN): Description and critical review of the dataset. *Agricultural Systems 205*. 103576.
- Gross, T., Keller, A., Müller, M., & Gubler, A. (2021). Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und schwermetalle 1985 – 2017. *Agroscope Science, 123*.
- Grossrieder, J., Ringger, C., Argento, F., Grandgirard, R., Anken, T., & Liebisch, F. (2022). Standortangepasste Stickstoffdüngung: aktuelle Methoden und Erfahrungen. *Agrarforschung Schweiz 13*. 103-113.
- Gubler, A., Gross, T., Hug, A.-S., Moll-Mielewicz, J., Müller, M., ..., & Meuli, R. G. (2022). Die Nationale Bodenbeobachtung 2021. *Agroscope Science, 128*.
- IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1999). Übereinkommen zum Schutz des Rheins.
- Jordan-Meile, L., Denoroy, P., Dittert, K., Cugnon, T., Quemada, M., Wall, D., ..., & Higgins, S. (2023). Comparison of nitrogen fertilization recommendations of West European Countries. *European Journal of Soil Science 74(6)*. E13436.
- Klages, S., Heidecke, C., Osterburg, B., Bailey, J., Calciu, I., Casey, C., ... & Velthof, G. (2020). Nitrogen Surplus – A unified Indicator for water pollution in Europe? *Water 12*. 1197.
- Kupper, T. (2022). Dokumentation Technische Parameter Modell Agrammon, Version 08.06.2022. Berner Fachhochschule.

- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., & Christensen, R.H.B. (2017). ImerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* 82(13). 1-26.
- Löw, P., Osterburg, B., & Klages, S. (2021). Comparison of regulatory approaches for determining application limits for nitrogen fertilizer use in Germany. *Environmental Research Letters* 16. 055009.
- Oenema, O., Kros, H., & de Vries, W. (2003). Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 20. 3-16.
- Osterburg, B. (2005). Cross Compliance (CC) in der EU und Ökologischer Leistungsnachweis (ÖLN) in der Schweiz – eine vergleichende Analyse. *Arbeitsberichte des Bereichs Agrarökonomie*, No. 07/2005.
- Richner, W., Flisch, R., Sinaj, S., & Charles, R. (2010). Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen. *Agrarforschung Schweiz* 1 (11-12). 410-415.
- Richner, W., & Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz, Spezialpublikation* 276 S.
- Spiess, E. (1999). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 1995. *Schriftenreihe der FAL Nr. 28*. 46 pp.
- Spiess, E. (2011). Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 91, 351-365.
- Spiess, E., & Liebisch, F. (2020). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. *Agroscope Science*, 100.
- Spiess, E., & Liebisch, F. (2023). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2021. *Agroscope Science*, 170.
- Sutter, M., & Reidy, B. (2021). Teilevaluation «Nationale Suisse-Bilanz – Fokus Selbstdokumentation» mit ergänzenden Validierungsarbeiten für die Erträge Futterbau. Schlussbericht. Berner Fachhochschule.
- Tanner, E., Liebisch, F., Bretscher, D. (2024). N-Düngereinsparungen mittels der korrigierten Normen: Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO₂concept. *Agrarforschung Schweiz* 15: 304-312.
- Übersax, A., & Schüpbach, H. (2004). Nutrient balancing at the farm level: The Swiss experience. *Grassland Science in Europe* 9, 1193-1195.
- Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft vom 7. Dezember 1998 (Stand am 1. Januar 2025). SR 919.118, Abschnitt 3a, Art. 10a&b.

7 Anhang

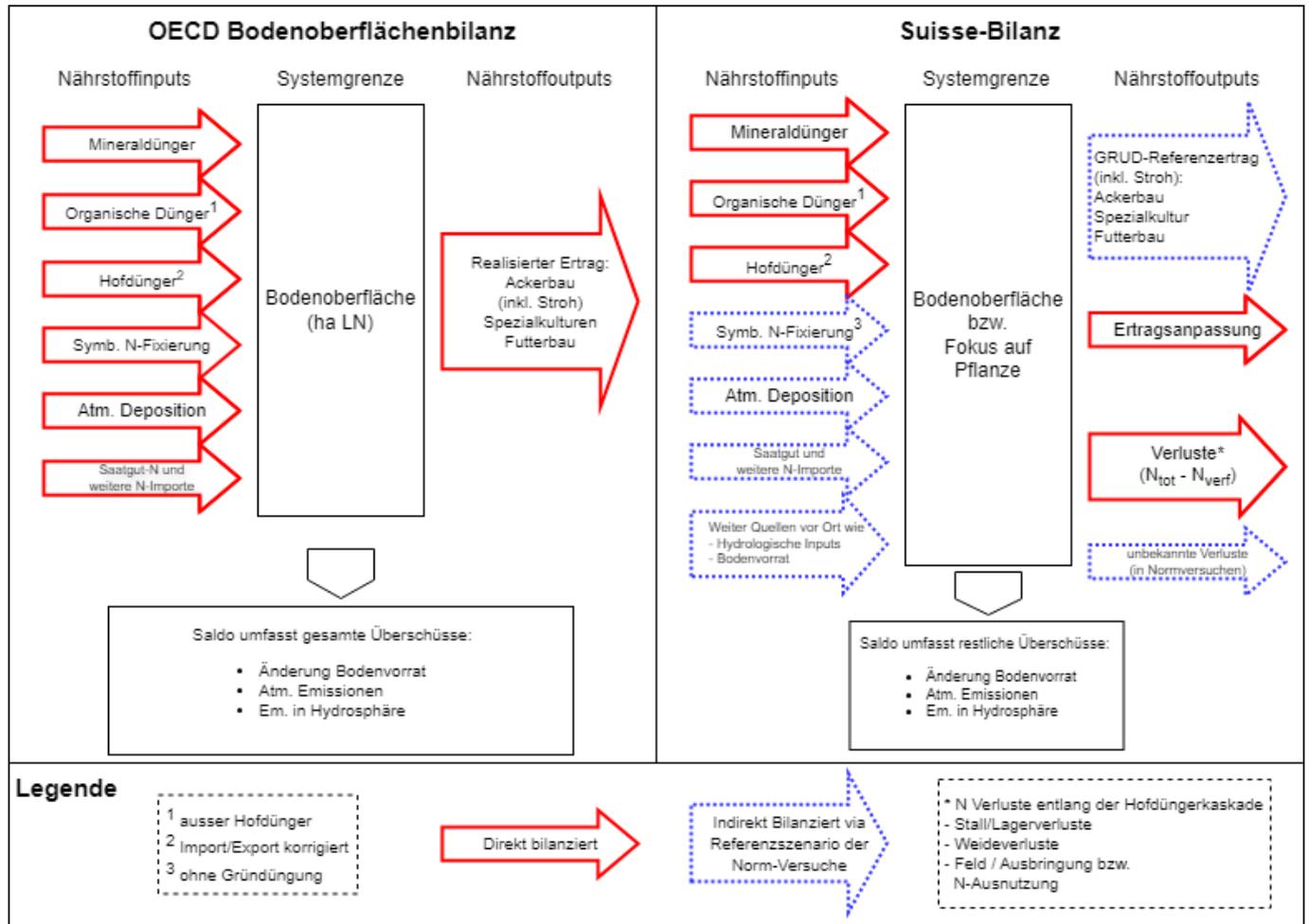


Abbildung A 1: Schematische Darstellung Bodenoberflächenbilanz (links) und Suisse-Bilanz mit indirekt bilanzierten Flüssen via Referenzszenario (rechts). Direkte bilanzierte Flüsse sind rot, indirekt bilanzierte Flüsse blau gepunktet.

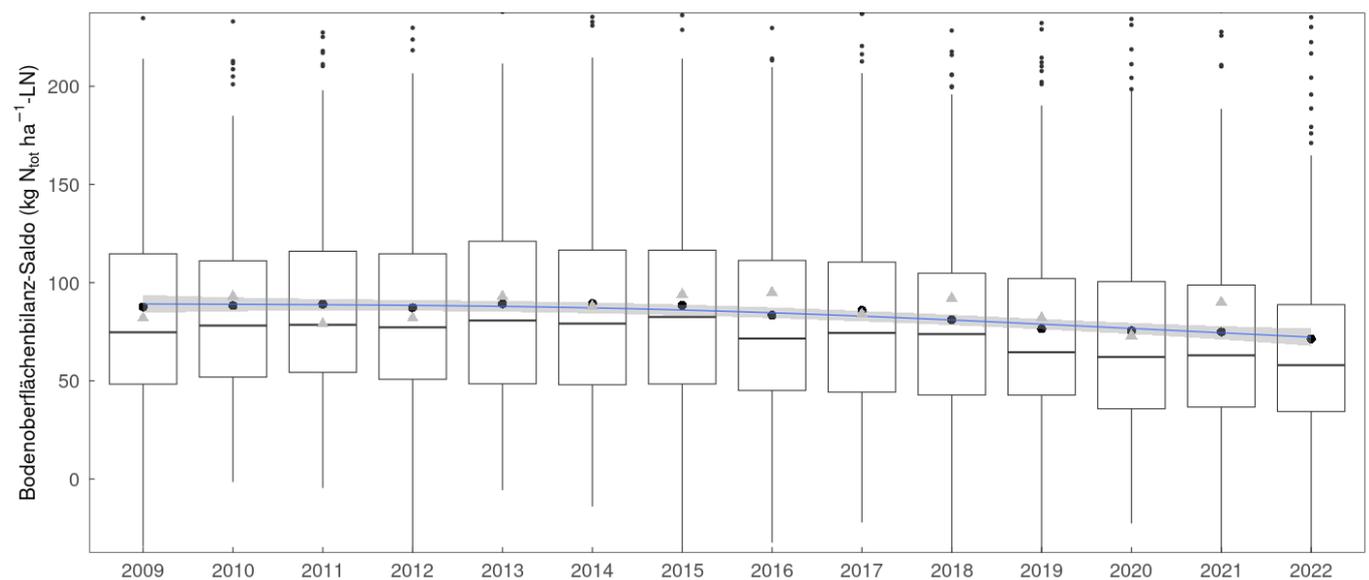


Abbildung A 2: Zeitreihe der Bodenoberflächen N-Bilanz. Trendlinie zeigt den Trend der Mittelwerte. Schwarze Punkte in den Boxen zeigen den Mittelwert der Bodenoberflächenbilanzen. Graue Dreiecke zeigen den Wert der nationalen OECD-Bodenoberflächen-N-Bilanz berechnet durch das Bundesamt für Statistik (BFS). Die Werte werden vom BFS in $\text{kg } N_{tot}$ pro Hektare landwirtschaftliche Fläche (LN + Sömmerung) publiziert. Für diesen Vergleich wurden diese Werte auf $\text{kg } N_{tot}$ pro Hektare LN berechnet.

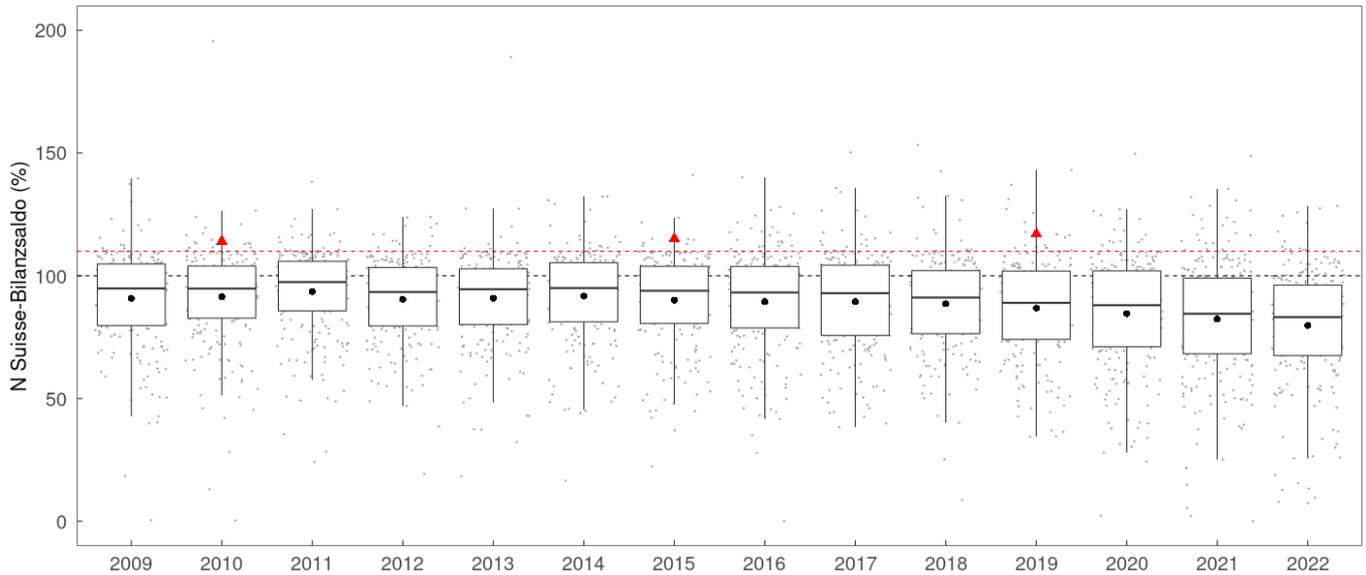


Abbildung A 3: Zeitreihe der Suisse-Bilanzen (als Prozentsaldo, d.h. wie viel Prozent vom Kulturbedarf wurde durch die N-Inputs gedeckt) für Stickstoff. Schwarze Punkte in den Boxen zeigen die jährlichen Mittelwerte. Die rote gestrichelte Linie zeigt den 110% Toleranzbereich. Die roten Dreiecke sind national berechnete Werte aus Sutter & Reidy (2021).

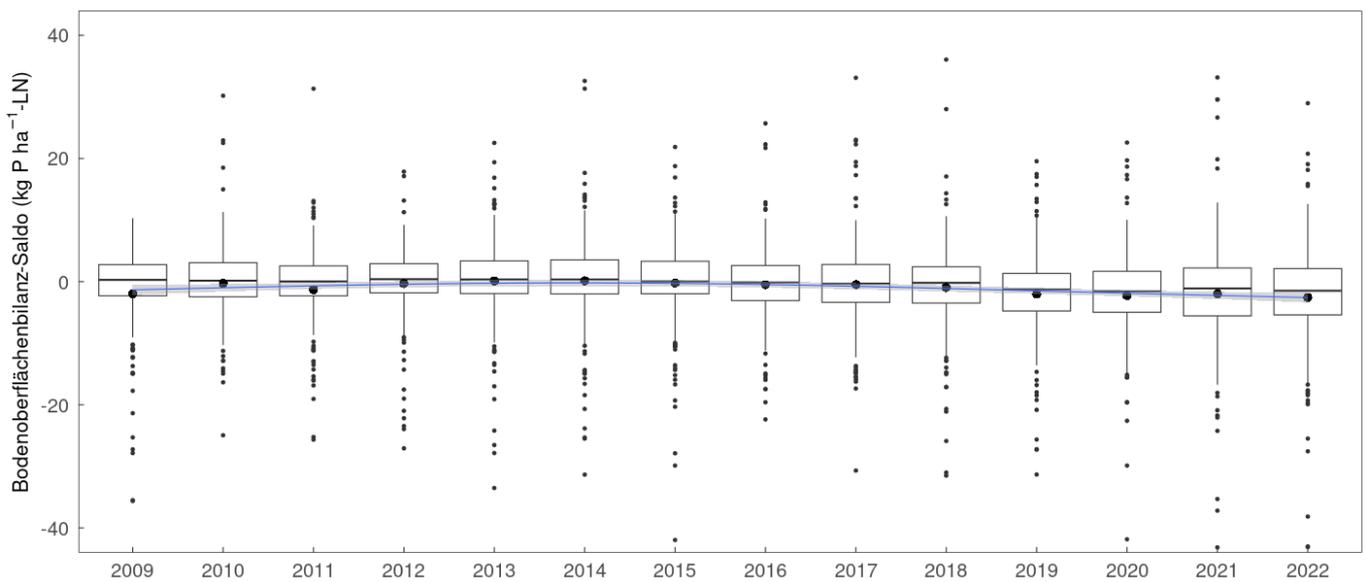


Abbildung A 4: Zeitreihe der Bodenoberflächen-P-Bilanz. Trendlinie zeigt den Trend der Boxplots. Schwarze Punkte in den Boxen zeigen den Mittelwert der Bodenoberflächenbilanzen.

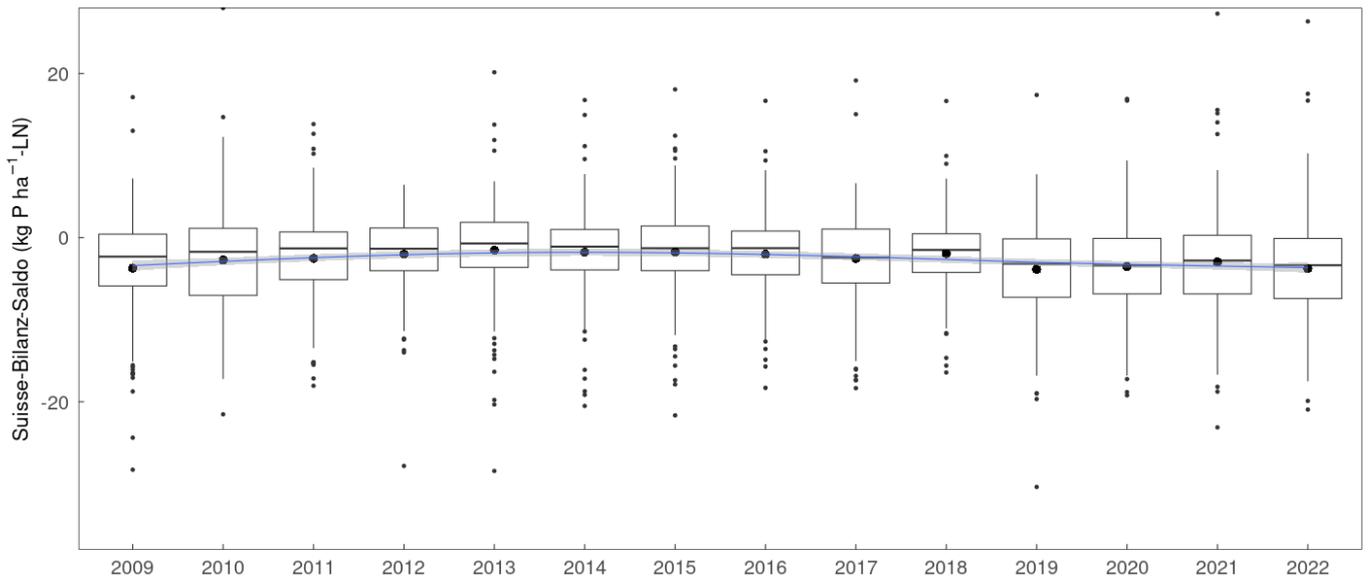


Abbildung A 5: Zeitreihe der Suisse-Bilanzen für Phosphor. Die schwarzen Punkte in den Boxen zeigen die jährlichen Mittelwerte. Die Trendline zeigt den Trend der Boxplots.

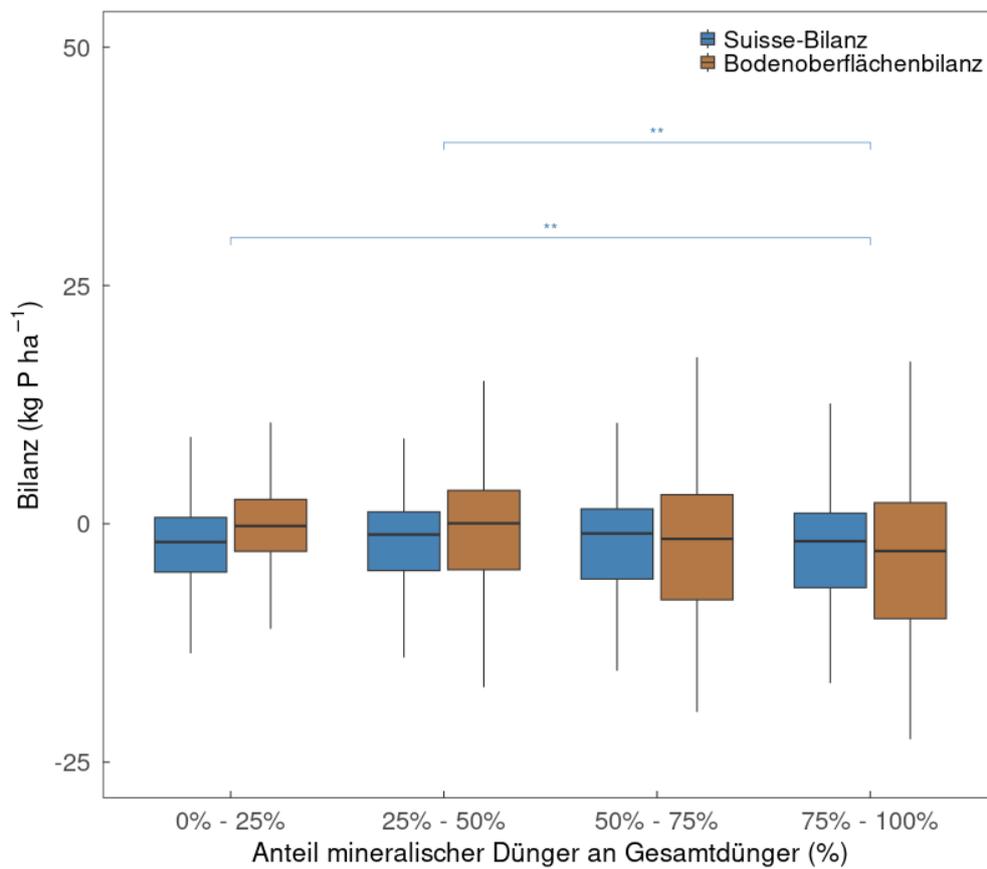


Abbildung A 6: OECD-Oberflächenbilanz (braun) und Suisse-Bilanz Saldo (blau) von Phosphor in Abhängigkeit des Anteils von eingesetztem mineralischem Dünger am Gesamtdüngereinsatz für alle Jahre zwischen 2009 - 2019.

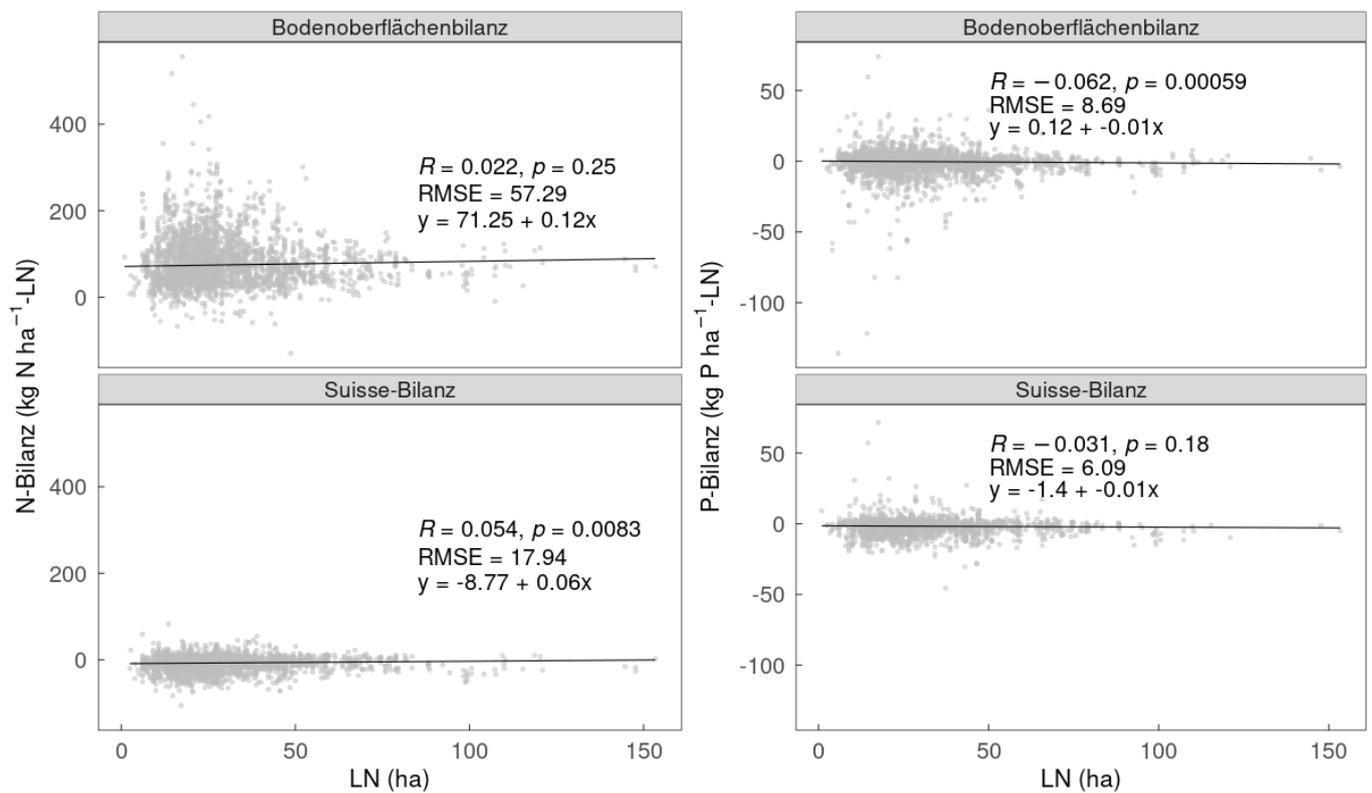


Abbildung A 7: Oberflächenbilanzen (oben) und Suisse-Bilanzen (unten) in Abhängigkeit von der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) eines Betriebes (in Hektar) für Stickstoff (links) und Phosphor (rechts) über alle Jahre zwischen 2011 – 2022. Die Einheit der N-Bilanzen sind für die Oberflächenbilanz in N_{tot} und für die Suisse-Bilanzen in N_{verf} . Die schwarze Linie zeigt die Theil-Senn-Regression und die Korrelationskoeffizienten zeigen die Ergebnisse der Spearman-Rank-Korrelation.