



Regionale Stickstoffbilanzen

Erste Ergebnisse von MAUS (Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz)

Autorinnen und Autoren

Simon Baumgartner, Ernst Spiess, Frank Liebisch, Anina Gilgen



Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Simon Baumgartner, simon.baumgartner@agroscope.admin.ch
Titelbild	Gabriela Brändle
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2024
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as185g

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

Vorwort	4
Zusammenfassung	5
Résumé	6
Summary	7
Riassunto	8
Abkürzungen	9
1 Einführung	10
2 Datengrundlage	11
3 Berechnung	13
3.1 Einträge	14
3.1.1 Hof- und Recyclingdünger	14
3.1.2 Mineraldünger	15
3.1.3 Atmosphärische Deposition	16
3.1.4 Biologische N-Fixierung	17
3.1.5 Saatgut	18
3.2 Austräge	18
3.3 N-Bilanz des Sömmerungsgebiets	19
4 Erste Resultate	19
5 Vergleich MAUS mit nationaler OECD-Bilanz	21
5.1 Mineralischer und Organischer Dünger	22
5.2 Biologische N-Fixierung	23
5.3 Grünlanderträge	23
5.4 Weitere Erträge	23
5.5 Weitere Unterschiede	24
6 Vergleich MAUS mit der Regionalisierung des BFS	24
7 Vergleich der Methoden zur N-Fixierung	27
8 Limitationen und zukünftige Anpassungen	29
8.1 Mineraldünger	29
8.2 Kleeanteil	29
8.3 Fütterung	29
8.4 Stroh als Einstreu	29
8.5 Gemüse	30
8.6 Zwischenkulturen	30
9 Fazit	31
10 Danksagung	31
11 Anhang	32
12 Literaturverzeichnis	42

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser

Die Landwirtschaft ist für uns Menschen essentiell. In erster Linie stellt sie eine kontinuierliche Versorgung mit qualitativ hochwertigen Lebensmitteln sicher. Gleichzeitig muss dies im Einklang mit den natürlichen Ressourcen geschehen. Denn nicht nur gutes Essen, sondern auch sauberes Wasser und reine Luft sind die Grundlage für unsere Gesundheit.

Aus diesem Grund ist Agroscope vom Bundesamt für Landwirtschaft beauftragt, ein kontinuierliches Agrarumweltmonitoring durchzuführen. Dabei werden eine ganze Reihe von Indikatoren berechnet, wie zum Beispiel Treibhausgasemissionen, Einsatz und Risiken von Pflanzenschutzmitteln sowie der Phosphor- und Stickstoffeinsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben. Diese Indikatoren liefern Informationsgrundlagen für die Agrarpolitik, für die Gesellschaft und für die Forschung, um Wechselwirkungen zwischen der landwirtschaftlichen Praxis und der Umwelt besser zu verstehen und auch dementsprechend handeln zu können.

Von 2009 bis 2022 wurde das Monitoring mit Hilfe eines Netzes von gut 300 Betrieben durchgeführt, die Agroscope Daten zur Verfügung stellten (Zentrale Auswertung von Agrarumweltindikatoren, ZA-AUI). Seit 2023 heisst das Monitoring MAUS (Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz). Ganz im Sinne der Digitalisierung stützt es sich hauptsächlich auf bereits existierende Daten wie jene des Agrarpolitischen Informationssystems AGIS oder von Branchenverbänden und auf in Zukunft erschliessbare Daten von Satelliten oder Farm-Management-Informationssystemen. Ziel dieser Veränderung ist es, Betriebe bezüglich Datenerhebungen zu entlasten und gleichzeitig eine repräsentativere Datengrundlage zu schaffen.

Mit dem MAUS wird ein Monitoringsystem aufgebaut, das langfristig Nutzen generiert. Es berechnet Umweltindikatoren auf Parzellen- oder Betriebsebene für die gesamte Schweiz und aggregiert diese auf verschiedenen Ebenen wie Region oder Betriebstypen. So entsteht eine wichtige Grundlage für heutige und kommende Fragestellungen. Davon profitieren Branchenverbänden, Kantone, die Agrarpolitik und die ganze Gesellschaft.

Diese Publikation dokumentiert und diskutiert die erste Auswertung des Indikators Stickstoff-Bilanz. Die Resultate zeigen, dass mit der bestehenden Datengrundlage und der gewählten Methodik regionalisierte Bilanzen berechnet werden können, wo die Einschränkungen liegen und wie diese in Zukunft minimiert werden können.

Ich wünsche Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre.

Lutz Merbold

Leiter des Forschungsbereichs Agrarökologie und Umwelt
Mitglied der Geschäftsleitung von Agroscope

Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Methodik zur Berechnung der Stickstoffbilanz (N-Bilanz) für das «Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz – MAUS» Stand 2024 und diskutiert Stärken und Verbesserungsbedarf. Im MAUS, welches das Monitoring mit dem Betriebsnetz der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) ablöst, werden die Bilanzen auf Betriebsebene für alle Schweizer Landwirtschaftsbetriebe approximativ berechnet, um danach die Resultate auf gewünschter Ebene zu aggregieren (z.B. Regionen, landwirtschaftliche Zonen). Die hier gezeigte Berechnung basiert bisher auf Daten, die schon verfügbar sind und nicht zusätzlich auf Betriebsebene erhoben werden müssen. Als Quellen fungieren unter anderem Daten aus dem Agrarpolitischen Informationssystem (AGIS), Daten aus dem Programm zu Hofdünger- und Recyclingdüngerverschiebungen (HODUFLU), die georeferenzierten Nutzungsdaten der Kantone und Daten verschiedener Branchenorganisationen. In Zukunft wird die Berechnung mit Datenerhebungen ergänzt, um bestehende Datenlücken gezielt zu schliessen und die Berechnung zu verbessern.

Wie in der ZA-AUI, basiert die Berechnung der N-Bilanz für das MAUS auf der Oberflächenbilanzmethode nach dem OECD-Standard. Methodische Anpassungen zu früheren Berechnungen der ZA-AUI gab es bezüglich der N-Deposition (neu N-Depositionskarte mit deponiertem N nur aus Quellen ausserhalb der Landwirtschaft) und der N-Fixierung (adaptierte Methode nach Nucera et al., 2023). Die Bilanz wurde für das Jahr 2021 berechnet. Es sind grosse kantonale Unterschiede sichtbar, mit höheren Bilanzen in Kantonen mit intensiver Tierhaltung sowie mit tieferen Überschüssen in den Bergregionen. Des Weiteren nehmen die Überschüsse von der Talregion, der Hügelsonne, der Bergregion bis zum Sömmerungsgebiet ab.

Zwecks Plausibilisierung haben wir die Werte auch auf nationaler Ebene aggregiert und mit der nationalen OECD-Bilanz des Bundesamtes für Statistik (BFS) verglichen. In unserer Berechnung resultierte ein mittlerer Wert von 40 kg N ha⁻¹ über die gesamte Schweizer landwirtschaftliche Fläche (landwirtschaftliche Nutzfläche und Sömmerungsgebiet) und 57 kg N ha⁻¹, wenn nur die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) ohne Sömmerungsgebiet berücksichtigt wird. Somit sind die Resultate der MAUS-Bilanz aggregiert auf nationaler Ebene deutlich tiefer als die Resultate der nationalen Bilanzen des BFS (65 kg N ha⁻¹ pro landwirtschaftliche Fläche, 90 kg N ha⁻¹ pro landwirtschaftliche Nutzfläche). Die tiefere Bilanz in der MAUS-Berechnung ergibt sich vor allem durch unterschätzte N-Einträge durch mineralische Dünger (MAUS-Ansatz mit 27% tieferen mineralischen Düngermengen im Vergleich zu der nationalen Bilanz) und allgemein höheren Abschätzungen der Erträge.

Während die regionalisierten N-Bilanzen im MAUS generell nach einem «Bottom-Up»-Ansatz berechnet werden, hat das BFS in einer Studie für das Bundesamt für Landwirtschaft die nationale N-Bilanz mit einem «top-down»-Ansatz regionalisiert. Die Resultate dieser Regionalisierung wurden in diesem Bericht mit den MAUS-Resultaten verglichen. Die prozentuale Verteilung der Ein- und Austräge auf die Kantone stimmt zwischen beiden Ansätzen sehr gut überein. Einzig bei der Verteilung der mineralischen Düngermengen gibt es eine grössere Abweichung (zusätzlich zur Unsicherheit beim nationalen Wert). Während das BFS die eingesetzten mineralischen N-Düngermengen von den nationalen Importzahlen abschätzt und diese mit einem Verteilschlüssel auf die Kantone herunterbricht, werden im MAUS die mineralischen Düngermengen anhand kulturspezifischer Bewirtschaftungsdaten vom ZA-AUI-Betriebsnetz hochgerechnet. Welcher Ansatz auf kantonaler Ebene eher der Realität entspricht, ist momentan nicht nachweisbar und kann von Kanton zu Kanton unterschiedlich sein.

Die adaptierte Methode zur Berechnung der N-Fixierung, welche im MAUS angewendet wird, wurde mit der bisherigen Methode aus der ZA-AUI verglichen. Auf nationaler Ebene resultiert ein um 1% tieferer N-Eintrag durch die N-Fixierung mit der neuen Methode. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Änderung in der Methodik zu keinen grossen Unterschieden in den Resultaten führt. Die grösste Unsicherheit in der Abschätzung der N-Fixierung – der Kleeanteil – bleibt in beiden Methoden gleich.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass für die regionalisierte N-Bilanzierung wichtige Daten bereits heute verfügbar sind (z.B. Daten zum Hofdüngeraustausch). Gleichzeitig bestehen aber noch Datenlücken, die zu grossen Unsicherheiten führen, beispielsweise bezüglich des Einsatzes von mineralischem N-Dünger oder des Transports von Futter und Stroh. Viele dieser Datenlücken könnten in Zukunft mit der Verwendung von digitalen Instrumenten für das Nährstoffmanagement auf Betrieben und im landwirtschaftlichen Vollzug sowie zusätzlichen Erhebungen im Rahmen von MAUS geschlossen oder verringert werden.

Résumé

Ce rapport décrit la méthode de calcul du bilan de l'azote (bilan N) pour le «Monitoring du système agro-environnemental suisse – MAUS» état 2024 et discute des points forts et des améliorations à apporter. Dans le MAUS, qui remplace le réseau d'exploitations du Dépouillement centralisé des indicateurs agro-environnementaux (DC-IAE), les bilans sont calculés de manière approximative à l'échelle des exploitations pour toutes les exploitations agricoles suisses, afin d'agréger ensuite les résultats à l'échelle souhaitée (p. ex. régions, zones agricoles). Le calcul présenté ici se base jusqu'à présent sur des données qui sont déjà disponibles et qui ne doivent pas être collectées en plus à l'échelle de l'exploitation. Les sources utilisées sont, entre autres, les données du système d'information sur la politique agricole (SIPA), les données du programme des flux d'engrais de ferme et de recyclage (HODUFLU), les données sur l'utilisation géoréférencées des cantons et les données de différentes filières. A l'avenir, le calcul sera complété par des relevés de données afin de combler de manière ciblée les lacunes existantes et d'améliorer le calcul.

Comme dans le DC-IAE, le calcul du bilan de l'azote pour le MAUS se base sur la méthode du bilan calculé à la surface du sol selon la norme de l'OCDE. Des adaptations méthodologiques ont été apportées aux calculs précédents du DC-IAE en ce qui concerne la déposition d'azote (nouvelle carte de déposition d'azote issues uniquement de sources non agricoles) et la fixation de l'azote (méthode adaptée selon Nucera et al., 2023). Le bilan a été calculé pour l'année 2021. On constate de grandes différences entre les cantons, avec des bilans plus élevés dans les cantons ayant de nombreux élevages intensifs et des excédents plus faibles dans les régions de montagne. En outre, les excédents diminuent de la région de plaine à la région des collines, de montagne et d'estivage.

Pour des raisons de plausibilité, nous avons également agrégé les valeurs au niveau national et les avons comparées au bilan national de l'OCDE établi par l'Office fédéral de la statistique (OFS). Notre calcul a abouti à une valeur moyenne de 40 kg N ha⁻¹ pour l'ensemble de la surface agricole suisse (surface agricole utile et pâturages d'estivage) et de 57 kg N ha⁻¹ si l'on ne considère que la surface agricole utile (SAU) sans les pâturages d'estivage. Ainsi, les résultats du bilan MAUS agrégés au niveau national sont nettement plus bas que les résultats des bilans nationaux de l'OFS (65 kg N ha⁻¹ par surface agricole, 90 kg N ha⁻¹ par surface agricole utile). Le bilan plus bas dans le calcul MAUS résulte principalement de la sous-estimation des apports d'azote par les engrais minéraux (approche MAUS avec des quantités d'engrais minéraux inférieures de 27 % par rapport au bilan national) et des estimations généralement plus élevées des rendements.

Alors que les bilans d'azote à l'échelle régionale dans le MAUS sont généralement calculés selon une approche «bottom-up», l'OFS a calculé le bilan azoté national à l'échelle régionale selon une approche «top-down» dans une étude réalisée pour l'Office fédéral de l'agriculture. Les résultats de cette régionalisation ont été comparés dans ce rapport avec les résultats MAUS. La répartition en pourcentage des entrées et des sorties par canton correspond très bien quelle que soit l'approche. Seule la répartition des quantités d'engrais minéraux présente un écart plus important (en plus de l'incertitude liée à la valeur nationale). Alors que l'OFS estime les quantités d'engrais minéraux azotés utilisées à partir des chiffres d'importation nationaux et les répartit entre les cantons à l'aide d'une clé de répartition, le MAUS extrapole les quantités d'engrais minéraux à partir des données d'exploitation spécifiques aux cultures du réseau d'exploitations DC-IAE. Il n'est pas possible pour l'instant de déterminer quelle approche correspond le mieux à la réalité au niveau cantonal. Cela peut d'ailleurs varier d'un canton à l'autre.

La méthode adaptée pour le calcul de la fixation de l'azote, utilisée dans le MAUS, a été comparée à la méthode utilisée jusqu'à présent dans le DC-IAE. Au niveau national, il en résulte une entrée d'azote inférieure de 1 % grâce à la fixation de l'azote avec la nouvelle méthode. Ce résultat montre que le changement de méthode n'entraîne pas de grandes différences dans les résultats. La plus grande incertitude dans l'estimation de la fixation de l'azote – la part de trèfle – reste la même dans les deux méthodes.

En conclusion, on peut dire que des données importantes pour le bilan de l'azote à l'échelle régionale sont déjà disponibles aujourd'hui (p. ex. données sur les échanges d'engrais de ferme). En même temps, il existe encore des lacunes dans les données, ce qui entraîne de grandes incertitudes, par exemple en ce qui concerne l'utilisation d'engrais minéraux azotés ou le transport de fourrage et de paille. Nombre de ces lacunes dans les données pourraient être comblées ou réduites à l'avenir grâce à l'utilisation d'instruments numériques pour la gestion des éléments nutritifs dans les exploitations et pour la législation agricole ainsi qu'à des relevés supplémentaires dans le cadre du MAUS.

Summary

This report describes the methodology used to calculate the nitrogen balance (N balance) for the 'Monitoring of the Swiss Agri-Environmental System – MAUS' in 2024 and discusses its strengths and areas in need of improvement. MAUS is the successor solution to the Swiss Agri-Environmental Data Network (SAEDN) for monitoring purposes. MAUS calculates the balances approximately at farm level for all Swiss farms and then aggregates the results to the required levels (e.g. regions, agricultural zones). The calculation shown here is based on existing data, so no additional data was collected at farm level. Data sources include the Swiss Confederation's Agricultural Policy Information System (AGIS) and its platform for the transfer and recycling of farmyard manure (HODUFLU), the cantons' georeferenced usage data, and data from various industry organisations. Additional data collections will be incorporated into the calculations in future to fill existing gaps and improve the results.

As with the SAEDN, in MAUS the N balance is calculated using the surface balancing method in accordance with the OECD standard. Methodological adjustments were made to previous SAEDN calculations relating to N deposition (new N deposition map showing only N deposited from sources outside agriculture) and N fixation (method adapted from Nucera et al., 2023). The balance was calculated for the year 2021. Major differences can be seen at cantonal level, with higher balances in cantons with intensive livestock farming and lower surpluses in mountainous regions. Furthermore, surpluses decrease in the transition from valleys to hill regions, mountainous regions and alpine summer pastures.

For the purposes of plausibility, we also aggregated the values to national level and compared them with the national OECD balance obtained by the Swiss Federal Statistical Office (FSO). Our calculation resulted in a mean value of 40 kg N ha⁻¹ across the entire Swiss agricultural area (utilised agricultural area and alpine summer pastures) and 57 kg N ha⁻¹ if the utilised agricultural area (UAA) alone is considered and summer pastures are discounted. Thus the results of the MAUS balance aggregated to national level are significantly lower than the FSO's national balances (65 kg N ha⁻¹ per entire agricultural area compared with 90 kg N ha⁻¹ per utilised agricultural area). The lower balance in the MAUS calculation is mainly due to the underestimation of N inputs through mineral fertiliser (MAUS approach results in 27% less mineral fertiliser compared with the national balance) and generally higher estimations of yields.

While MAUS generally uses a bottom-up approach to calculate the regionalised N balances, the FSO regionalised the national N-balance using a top-down approach in a study conducted for the Federal Office for Agriculture. In this report, we compared the results of the FSO's regionalisation with the MAUS results. The percentage distribution of inputs and outputs across the cantons correlate very closely between the two approaches. Significant variation occurs only in the distribution of mineral fertiliser quantities (in addition to the uncertainty regarding the national value). While the FSO estimates the quantities of mineral N fertiliser used from the national import figures and uses a distribution formula to break it down to cantonal level, MAUS extrapolates the mineral fertiliser quantities using crop-specific farm data from the SAEDN network. Currently, it is not possible to determine which approach best reflects reality at cantonal level, and it may vary from canton to canton.

The adapted method used in MAUS to calculate N fixation was compared with the SAEDN method previously used. At national level, the new method results in a 1% lower N input through N fixing. These findings show that the change in method does not significantly alter the results. The greatest uncertainty in estimating N fixation – the proportion of clover – is the same for both methods.

In conclusion, we can report that key data are already available for regionalised N balancing (e.g. data from the transfer of farmyard manure). At the same time, the remaining data gaps lead to major uncertainties, for example relating to the use of mineral N fertiliser or the transport of feed and straw. In future, many of these data gaps could be filled or reduced using digital nutrient management tools on farms or for agricultural enforcement and through additional MAUS surveys.

Riassunto

Il presente rapporto descrive il metodo per calcolare il bilancio dell'azoto (bilancio N) per il «Monitoraggio del sistema agroambientale Svizzera – MAUS» con stato al 2024 e ne esamina i punti di forza e le esigenze di miglioramento. Nel MAUS, che sostituisce il monitoraggio con la rete di aziende dell'Analisi centralizzata degli indicatori agro-ambientali (AC-IAA), i bilanci sono calcolati approssimativamente a livello aziendale per tutte le aziende agricole svizzere, per poi aggregare i risultati al livello desiderato (p.es. regioni, zone agricole). Il calcolo illustrato nel presente rapporto si basa su dati già disponibili che non devono essere rilevati in aggiunta a livello di azienda. Le fonti includono i dati del Sistema d'informazione sulla politica agricola (AGIS), i dati del programma sui trasferimenti di concimi aziendali e ottenuti dal riciclaggio (HODUFLU), i dati di utilizzo georeferenziati dei Cantoni e i dati di varie organizzazioni del settore. In futuro, il calcolo sarà integrato con rilevazioni sui dati per colmare le lacune esistenti e migliorare il calcolo.

Così come nell'AC-IAA, il calcolo del bilancio di N per il MAUS si attiene al metodo del bilancio di superficie secondo lo standard OCSE. Sono stati apportati adeguamenti metodologici ai calcoli precedenti dell'AC-IAA per quanto riguarda la deposizione di N (d'ora in poi: carta della deposizione di N con N depositato solo da fonti esterne all'agricoltura) e la fissazione di N (metodo adattato secondo Nucera et al., 2023). Il bilancio è stato calcolato per il 2021. Si registravano notevoli differenze cantonali, con saldi maggiori nei Cantoni con allevamenti intensivi ed eccedenze minori nelle regioni di montagna. Inoltre, le eccedenze diminuiscono dalla regione di pianura, di collina e di montagna fino alla zona di estivazione.

Al fine di verificare la plausibilità, abbiamo aggregato i valori anche a livello nazionale e li abbiamo confrontati con il bilancio nazionale OCSE dell'Ufficio federale di statistica (UST). Dal nostro calcolo risulta un valore medio di 40 kg N ha⁻¹ per le superfici agricole svizzere complessive (superfici agricole utili e pascoli d'estivazione) e di 57 kg N ha⁻¹ se si considerano solo le superfici agricole utili (SAU) senza i pascoli d'estivazione. I risultati del bilancio del MAUS aggregati a livello nazionale sono quindi nettamente inferiori rispetto a quelli dei bilanci nazionali dell'UST (65 kg N ha⁻¹ per superficie agricola, 90 kg N ha⁻¹ per SAU). Il bilancio inferiore nel calcolo del MAUS è riconducibile principalmente a una sottostima degli apporti di N provenienti dai concimi minerali (il metodo MAUS prevede quantità di concimi minerali inferiori del 27 % rispetto al bilancio nazionale) e a stime delle rese generalmente più elevate.

Mentre in genere i bilanci di N regionalizzati nel MAUS sono calcolati secondo un metodo «bottom-up», in uno studio per l'Ufficio federale dell'agricoltura, l'UST ha regionalizzato il bilancio nazionale di N con un metodo «top-down». Nel presente rapporto i risultati di questa regionalizzazione sono stati confrontati con i risultati del MAUS. La distribuzione percentuale degli input e degli output tra i Cantoni presenta un'ottima corrispondenza tra i due metodi. Solo la ripartizione dei quantitativi di concimi minerali denota uno scarto maggiore (oltre all'incertezza per il valore nazionale). Mentre l'UST stima le quantità di concime minerale N utilizzate a partire dai dati delle importazioni nazionali e le ripartisce tra i Cantoni utilizzando una chiave di ripartizione, il MAUS estrapola le quantità di concime minerale utilizzando i dati di gestione specifici delle colture della rete di aziende dell'AC-IAA. Per il momento è impossibile verificare quale metodo rispecchi meglio la realtà a livello cantonale e possono presentarsi differenze tra Cantone e Cantone.

Il metodo adattato per il calcolo della fissazione di N, utilizzato nel MAUS, è stato confrontato con quello precedente dell'AC-IAA. A livello nazionale, il nuovo metodo determina una riduzione dell'1 per cento dell'apporto di N dovuto alla fissazione di N. Il risultato dimostra che il diverso metodo non comporta discrepanze sostanziali in termini di risultati. L'incertezza maggiore nella stima della fissazione di N – la percentuale di trifoglio – rimane la stessa per entrambi i metodi.

In conclusione, si può affermare che già attualmente sono disponibili dati importanti per il bilancio di N regionalizzato (p.es. i dati sullo scambio di concimi aziendali). Sussistono però al contempo ancora lacune nei dati che comportano notevoli incertezze, per esempio in merito all'utilizzo di concimi minerali N o al trasporto di alimenti per animali e di paglia. In futuro molte di queste lacune nei dati potrebbero essere colmate o ridotte con l'ausilio di strumenti digitali per la gestione delle sostanze nutritive nelle aziende e nell'esecuzione a livello di agricoltura nonché con rilevazioni aggiuntive nell'ambito del MAUS.

Abkürzungen

AGIS	Agrarpolitisches Informationssystem
BFS	Bundesamt für Statistik
BGTNF	Unterirdischer und Transfer-Stickstoff-Faktor
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
DZV	Direktzahlungsverordnung
FMIS	Farm-Management Informationssysteme
GRUD	Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz
HAFL	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften
KF	Korrekturfaktor
Leg _{RA}	Leguminosen-Anteil
LF	Landwirtschaftliche Fläche (inkl. Sömmerung)
LN	Landwirtschaftliche Nutzungsfläche
MAUS	Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz
N	Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
NH ₃	Ammoniak
N _{tot}	Gesamtstickstoff
N _{verf}	Pflanzenverfügbare Stickstoff
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OSPAR	Oslo-Paris Kommission für die Nordsee
PSM	Pflanzenschutzmittel
SOV	Schweizer Obstverband
SZA	Schweizer Zucker AG
SZG	Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen
TS	Trockensubstanz
TVD	Tierverkehrsdatenbank
ZA-AUI	Zentrale Auswertung von Agrarumweltindikatoren
ZA-BH	Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten

1 Einführung

Agroscope führt im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) das Agrarumweltmonitoring mit der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) durch. Anhand von Management-Daten von rund 300 Betrieben wurden seit dem Jahr 2009 verschiedene Umweltindikatoren auf Ebene Region (Tal, Hügel, Berg) und Betriebstypen (Ackerbau, Tierhaltung, kombiniert, Spezialkulturen) berechnet (Gilgen et al. 2023). Die ZA-AUI in ihrer jetzigen Form wurde im Jahr 2023 eingestellt und durch ein neues Agrarumweltmonitoring namens MAUS (Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz) ersetzt. Im MAUS werden die Umweltindikatoren auf Parzellen- oder Betriebsebene für die gesamte Schweiz berechnet, damit diese dann auf höherer Ebene (Region, Betriebstypen) aggregiert werden können (Bottom-Up-Ansatz). Dabei sollen bestehende Datenquellen (z.B. AGIS-Daten, Daten von Branchenverbänden) sowie zukünftig verfügbare Datenquellen (z.B. Daten aus Farm-Management Informationssystemen, Satellitendaten) besser einbezogen werden, damit Mehrfacherfassungen von Daten aufseiten der Landwirte und Landwirtinnen vermieden werden können.

Einer der Umweltindikatoren, der in der ZA-AUI und nun auch im MAUS berechnet wird, ist die Nährstoffbilanz für Stickstoff (N). Dieser wird unter anderem zur Quantifizierung von Nährstoffüberschüssen in der Landwirtschaft benutzt. Nährstoffüberschüsse führen zu Verlusten der Nährstoffe in die Umwelt, was negative Auswirkungen auf die Umwelt (Überdüngung von Ökosystemen, Treibhauseffekt) und die Gesundheit der Bevölkerung (Nitratgehalt im Trinkwasser, Bildung von Feinstaub, Abbau der Ozonschicht) haben kann. Zusätzlich wird bei der Denitrifikation von Nitrat Lachgas (N_2O), ein potentes Treibhausgas, gebildet, welches auch den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre fördert (Ravishankara et al., 2009).

Nährstoffbilanzen lassen sich durch verschiedene Bilanzierungsmethoden berechnen. Grundsätzlich lassen sich die gängigsten Methoden in Hoftorbilanzen (z.B. OSPAR-Bilanz), Boden(oberflächen)bilanzen (z.B. OECD-Bilanz) und Anfall-Bedarfs-Bilanz (z.B. Suisse-Bilanz) einteilen (Richner et al., 2015; Oenema et al., 2003). Bei der von der OSPAR (Oslo-Paris-Kommission für die Nordsee; 1995) beschriebenen Methode handelt es sich um eine Hoftorbilanz, welche die Nährstoffflüsse erfasst, die in einen landwirtschaftlichen Betrieb gelangen (importierte Futtermittel, Mineral-, Hof- und Recyclingdünger, importiertes Saatgut, biologische N-Fixierung und atmosphärische Deposition) und diesen verlassen (tierische und pflanzliche Nahrungs- und Futtermittel sowie andere Produkte) (Abbildung 1a). Für die Berechnung nach der OSPAR-Methode waren in der ZA-AUI nicht genügend detaillierte Daten zur Fütterung (z.B. Zusammensetzung von zugeführtem Kraftfutter) vorhanden, so dass ein Oberflächenbilanzierungsansatz verwendet wurde. Die OSPAR-Methode wird aber seit 1993 auf nationaler Ebene berechnet (Braun et al. 1994; Spiess und Liebisch 2022). Nebst dem internationalen Vergleich dient sie auch als Grundlage für die Überprüfung der Verminderung der Nährstoffverluste (Absenkpfad, Parlamentarische Initiative 19.475).

Bei der Bodenbilanz wird nur der Pflanzenbau bilanziert, wobei der Input (sämtliche Dünger, biologische N-Fixierung, Saatgut und atmosphärische Deposition) dem Output (Nährstoffentzug durch pflanzliche Nahrungs-/Futtermittel und weitere pflanzliche Produkte) gegenübergestellt wird (Abbildung 1b). Durch den Oberflächenbezug kann die Bilanz auf allen Ebenen von landwirtschaftlicher Parzelle bis Gesamtschweiz angewendet werden. Eine Bodenbilanzierungsmethode wird von der OECD verwendet, damit der Vergleich zwischen den verschiedenen Ländern leichter möglich ist, denn im Vergleich zu der OSPAR-Methode sind die benötigten Daten zur Berechnung der OECD-Bilanz leichter verfügbar (Eurostat, 2013). Für die Berechnung der nationalen OECD-Bilanz ist in der Schweiz das Bundesamt für Statistik (BFS) zuständig. Die OECD-Methode wurde zudem in der ZA-AUI verwendet für die Berechnung von Umweltindikatoren auf Betriebsebene.

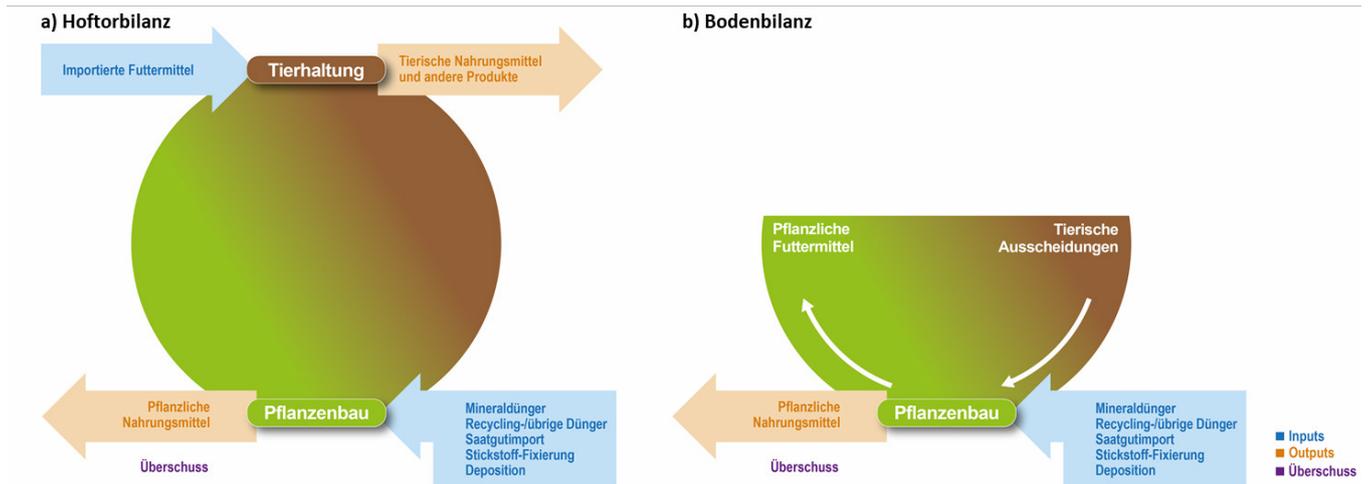


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Hoftorbilanz (a) und einer Bodenbilanz (b).

Eine abgeänderte Form der Bodenbilanz stellt die Suisse-Bilanz dar. Bei der Suisse-Bilanz werden die jährlich pflanzenverfügbaren Nährstoffe dem Bedarf der Kulturen gegenübergestellt. Sie ist somit nicht für die Quantifizierung von Nährstoffverlusten geeignet, sondern wurde als Planungsinstrument konzipiert, um die auf Betriebsebene notwendigen Düngermengen abzuschätzen. Heute wird sie auch im Vollzug verwendet, um Nährstoffüberschüsse und allenfalls Nutzungseffizienz auszuweisen. Aus fachlicher Sicht weist die Suisse-Bilanz in ihrer heutigen Ausgestaltung für die Quantifizierung von Nährstoffüberschüssen jedoch Mängel auf.

Wie oben erwähnt werden im MAUS die N-Bilanzen – wie auch alle anderen MAUS-Indikatoren – vorwiegend mit einem Bottom-Up-Ansatz berechnet. Der Bottom-Up-Ansatz hat den Vorteil, dass die Resultate auf verschiedenen Ebenen aggregiert werden können (z.B. Kanton, Betriebstyp). Des Weiteren können räumlich hoch aufgelöste Daten (z.B. Satellitendaten) in Zukunft einfach in diese Berechnungsmethodik integriert werden. Parallel zu dem von Agroscope verfolgten Bottom-Up-Ansatz hat das BFS im Auftrag des BLWs in einem Projekt die nationalen Nährstoffbilanzen mit einem Top-Down-Ansatz regionalisiert (OFS, 2023). Der Top-Down-Ansatz hat den Vorteil, per Definition an den nationalen Werten ausgerichtet und somit kohärent mit diesen zu sein. Ausserdem ist dieser Ansatz weniger rechenaufwändig und kann ältere, räumlich weniger aufgelöste Datenquellen einfacher einbeziehen, um längere Zeitreihen zu generieren. In diesem Bericht werden die verschiedenen methodischen Ansätze und Datenquellen einander gegengestellt und dadurch auch Unsicherheiten in den Berechnungen aufgezeigt. Agroscope und BFS waren dabei in engem Kontakt. Die Zusammenarbeit umfasste den Austausch von Daten, koordinierte Datenanfragen an Dritte sowie einen methodischen Austausch.

In diesem Bericht werden die Datengrundlagen für die MAUS N-Bilanz beschrieben (Kapitel 2), deren Berechnung erläutert (Kapitel 3), die ersten Resultate für das Jahr 2021 präsentiert (Kapitel 4), die MAUS-Resultate mit den nationalen Werten verglichen (Kapitel 5) und die kantonalen MAUS-Resultate mit der BFS-Regionalisierung verglichen (Kapitel 6). Am Schluss dieses Berichtes werden die zwei Methoden zur Berechnung der N-Fixierung miteinander verglichen (Kapitel 7) und danach die Limitationen in der Berechnung der MAUS-Nährstoffbilanzen aufgezeigt und den Verbesserungsbedarf bei der Berechnung beschrieben (Kapitel 8).

2 Datengrundlage

Das neue Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz hat zum Ziel, so weit wie möglich bestehende Datensätze als Grundlage für die Berechnung der Agrarumweltindikatoren zu verwenden und die restlichen Datenlücken mit zusätzlichen Erhebungen zu schliessen. Dadurch wird die Doppelerfassung für die Landwirte und Landwirtinnen möglichst klein gehalten. Die verwendeten Daten wurden vom BLW, den Kantonen, verschiedenen Branchenorganisationen und Verbänden sowie Agroscope bereitgestellt. Die Datenquellen, die für die Berechnung der Nährstoffbilanzen fürs MAUS benutzt wurden, sind:

- **AGIS-Daten:** Für die Kontrolle im Bereich der Direktzahlungen führt das BLW ein zentrales Agrarpolitisches Informationssystem (AGIS), welches auch zur Evaluation und Weiterentwicklung der Agrarpolitik dient. Die Daten werden von den Kantonen erhoben und ans BLW übertragen. Die Daten in der BLW-Datenbank decken praktisch alle Betriebe in der Schweiz ab, auch solche, die keine Direktzahlungen erhalten. In dieser Studie wurden nur Betriebe berücksichtigt, die die BFS-Definition¹ eines landwirtschaftlichen Betriebs erfüllen. Für die Nährstoffbilanzen sind vor allem die Informationen aus den Strukturdaten wichtig, genauer die jahresdurchschnittlichen Tierbestände jedes landwirtschaftlichen Betriebs in der Schweiz aufgeteilt nach Ganzjahresbetrieben und Sömmerung. Zusätzlich sind Informationen über die Bio-Produktion (Produktionssystembeitrag), über die Phasenfütterung von Schweinen (Ressourceneffizienzbeitrag) sowie über die in Verkehr gebrachte Milch für die Berechnung der Nährstoffbilanzen wichtig und in der AGIS-Datenbank enthalten. Die Betriebe in der AGIS-Datenbank sind mit einer eindeutigen kantonalen Betriebs-ID identifizierbar und lassen sich somit mit anderen betriebspezifischen Datensätzen verknüpfen.
- **HODUFLU:** Per 1. Januar 2014 ist das Erfassen aller Verschiebungen von Hof- und Recyclingdüngern über das HODUFLU-System verbindlich. In der HODUFLU-Datenbank sind die Mengen an verschobenem Produkt (z.B. Gülle, Mist oder Gärgut), die Art des Produkts (z.B. die Tierkategorie der Gülle oder des Mists) sowie die Nährstoffgehalte im Produkt deklariert (Möhring, 2023). Die Abgeber- und Aufnehmerbetriebe sind auch mit kantonalen Betriebs-ID versehen, somit lassen sich die HODUFLU-Daten einfach mit den AGIS-Strukturdaten verknüpfen.
- **Georeferenzierte Nutzungsdaten:** Die Kantone sind gemäss Art. 113 der Direktzahlungsverordnung (DZV) verpflichtet, alle landwirtschaftlichen Flächen georeferenziert im kantonalen System zu erfassen. Diese georeferenzierten Flächen müssen Informationen zum Betrieb und der Nutzung (d.h. die angebaute Hauptkultur) enthalten. Diese Daten stehen erstmals für das Jahr 2021 für alle Kantone vollständig zur Verfügung. Für die Erfassung der Sömmerungsflächen besteht keine Pflicht, was zu einer lückenhaften Datengrundlage für die Sömmerungsflächen der Kantone führt. Aus diesem Grund wurde für die Bestimmung der Sömmerungsflächen zusätzlich die Arealstatistik des BFS hingezogen (siehe Kapitel 3.3).
- **Arealstatistik:** Mit der seit den 1980er-Jahren produzierten Arealstatistik zeigt das BFS die Entwicklung der Bodennutzung in der Schweiz auf. Die Erhebungen finden neu alle 6 Jahre statt. Die Arealstatistik bildet die Bodennutzung auf einem 100 m × 100 m-Raster ab. Für die Kantone mit fehlenden Sömmerungsflächen in den georeferenzierten Nutzungsdaten (UR, SG, SZ) wurde die Sömmerungsfläche aus der Arealstatistik (Erhebung 2013-2018) extrahiert. Folgende Kategorien in der Arealstatistik wurden berücksichtigt: Alpweiden, günstige Alp- & Juraweiden, verbuschte Alp- & Juraweiden, versteinte Alp- & Juraweiden und Schafalpen.
- **Tierdaten von Qualitas:** Die Qualitas AG betreibt die Datenschnittstelle Rindvieh, in welcher Daten vom Braunvieh-Zuchtverband, swissherdbook-Zuchtverband, Holstein-Zuchtverband, der Tierverkehrsdatenbank und Organisationen für künstliche Besamung vereint werden. Für die Nährstoffbilanz-Berechnung sind die Milchdaten von Kühen von Bedeutung. Für die Berechnungen wurden die Milchleistungen zur Korrektur der Nährstoffausscheidungen der Milchkühe verwendet.
- **Ertragsdaten verschiedener Verbände:** Da die Nährstoffentzüge in den Nährstoffbilanzen über die Erträge (inklusive Nebenerträge) der Kulturen berechnet werden, sind Ertragsdaten unabdingbare Informationen zur Berechnung der Bilanzen. Je mehr einzelbetriebliche Ertragsdaten vorhanden sind, desto besser kann eine räumliche Auflösung der kulturspezifischen Erträge gemacht werden. Gewisse Branchenorganisationen ermitteln parzellenscharfe Ernteerträge ihrer Mitgliederbetriebe. Diese Daten wurden anonymisiert (d.h. betriebspezifische Erträge werden mit der PLZ versehen) für das Agrarumweltmonitoring an Agroscope gesendet. Die verwendeten Daten stammen von Swisspatat (Kartoffeln), der Schweizer Zucker AG (Zuckerrüben) und vom statistischen Dienst des Schweizer Bauernverbands Agristat (Getreide, Ölsaaten und Körnerleguminosen). Der Umfang der Daten von Agristat variiert zwischen den Kulturen und ist vor allem für seltene Kulturen bisher nicht repräsentativ, da die Teilnahme für die Betriebe freiwillig ist. Vom Schweizer

¹ «Ein Betrieb muss mindestens eine der folgenden Mindestnormen erfüllen: 1 Hektare landwirtschaftliche Nutzfläche oder 30 Aren Spezialkulturen oder 10 Aren in geschütztem Anbau oder 8 Mutterschweine oder 80 Mastschweine oder 80 Mastschweinplätze oder 300 Stück Geflügel» (BFS, 2023)

Obstverband stehen auf Melderegionen aggregierte Daten der Angebotsmengen und Anbauflächen für den Obstbau zur Verfügung. Von den Kantonen gibt es Angaben zu den Erntemengen und Anbauflächen von Reben auf Kantonebene. Die Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG) stellt die aggregierten Daten auf der Ebene Kanton zu den Gesamtflächen der Gemüseproduktion (Frisch-, Lager- und Verarbeitungsgemüse) sowie die Angebotsmengen von Frischgemüse, Verarbeitungsgemüse und Lagergemüse bereit. Aus diesen Daten lassen sich Erträge abschätzen, jedoch sind Angebotsmengen nicht direkt mit Erntemengen gleichzusetzen, da überschüssige Produkte von einer Woche wieder in den Angebotsmengen der folgenden Woche geführt werden können, was in einer grossen Unsicherheit in der Ertragschätzung führt.

- **Buchhaltungsdaten der Zentralen Auswertung:** In der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten (ZA-BH) werden von Agroscope jährlich die Buchhaltungsdaten von über 4000 Betrieben gesammelt, um die wirtschaftliche Situation in der Landwirtschaft zu analysieren. Darin enthalten sind rund 2300 Betriebe der Stichprobe Betriebsführung. Mit dieser Stichprobe haben wir Zugang zu den Ertragsdaten von verschiedenen Kulturen, welche eine gute Ergänzung zu den Ertragsdaten der Branchenorganisationen darstellen. Die Daten enthalten den mittleren Ertrag jeder Kultur eines Betriebes. Die Daten wurden aus Datenschutzgründen anonymisiert an Agroscope geliefert, jedoch wurde zu jedem Betrieb die Gemeindenummer des BFS angegeben.
- **Feldkalenderdaten der ZA-AUI:** Durch die ZA-AUI verfügt Agroscope über Feldkalenderdaten von jährlich etwa 300 Betrieben zwischen 2009-2022. Diese Daten sind wertvoll für das Ableiten von kulturspezifischen Werten, um Datenlücken zu schliessen. Die Feldkalenderdaten wurden beispielsweise verwendet, um die Menge von mineralischen Düngern pro Kultur abzuschätzen.
- **Karte N-Deposition:** Um die N-Eintragsmenge durch atmosphärische Deposition abzuschätzen, wurde eine Karte der N-Deposition aus Quellen ausserhalb der Landwirtschaft im 1 km × 1 km Raster verwendet (Rihm & Künzle, 2023; Meteotest, 2023).
- **Ammoniakumfrage HAFL:** Die Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) führt repräsentative Erhebungen von landwirtschaftlichen Betriebsparametern durch, um die Emissionen von Ammoniak (NH₃) für die Schweizer Landwirtschaft zu berechnen. Die aggregierten Daten aus der Erhebung aus dem Jahre 2019 (Kupper et al., 2022) wurden dem MAUS zur Verfügung gestellt und dazu benutzt, um den durchschnittlichen Rohproteingehalt im Futter der Schweine in der Schweiz zu evaluieren. Dadurch kann der Rohproteingehalt des Futters der Betriebe ohne Phasenfütterung von Betrieben mit Phasenfütterung unterschieden werden.
- **Untersuchung Suisse-Bilanzen Kanton St. Gallen:** Im Auftrag von Agroscope wurde der Nährstoffanfall von Mastschweinen und Mastpoulets von Bio-Betrieben mit den Ausscheidungen von konventionellen Betrieben verglichen. Die Datengrundlage dafür waren Suisse Bilanzen von landwirtschaftlichen Betrieben im Kanton St. Gallen aus dem Jahr 2022 (293 Mastschwein-Betriebe und 63 Mastpoulets-Betriebe). Die Resultate für den N-Anfall bei den Mastpoulets wurden für die MAUS-Berechnung schweizweit verwendet.

3 Berechnung

Die Methode zur Nährstoffbilanzierung im MAUS orientiert sich an der Methode in der ZA-AUI. Die Bilanzen werden mithilfe von Betriebsdaten anhand der OECD-Methode (Bodenbilanz, Abbildung 1) berechnet. Die Bilanz ergibt sich aus den verschiedenen Einträgen von Nährstoffen minus den Austrägen, wobei die Nährstoffverluste in dieser Methode nicht zum Austrag gezählt werden, sondern im Saldo abgebildet sind (OECD, 2001). Für Stickstoff wird eine möglichst kleine positive Bilanz angestrebt, um die Nährstoffverluste an die Umwelt zu minimieren (keine zu hohe Bilanz) und den Böden nicht zu viele Nährstoffe zu entziehen (keine zu tiefe Bilanz).

Das Ziel von MAUS ist es, die Bilanzen für jeden landwirtschaftlichen Betrieb der Schweiz approximativ zu berechnen, damit danach eine Aggregation auf die gewünschte Ebene (landwirtschaftliche Zone, Kanton, Betriebstypen etc.) möglich ist. Somit handelt es sich primär um einen Bottom-Up-Ansatz. Während einige Daten für alle Betriebe zur Verfügung standen (z.B. Tierbestand), mussten aus anderen Daten bestmögliche Schätzungen für

jeden Betrieb getroffen werden (z.B. Ertragsdaten in Abhängigkeit von Kultur, Region und Produktionstyp). Als Datengrundlagen für die einzelbetriebliche Berechnung dienen uns die in Kapitel 2 beschriebenen Daten.

Die Stickstoff-Bilanz wird mit Einträgen über Dünger (v.a. Hofdünger, Mineraldünger, Recyclingdünger) atmosphärische Deposition, biologische N-Fixierung und Saatgut berechnet. Die Austräge erfolgen ausschliesslich über die Ernteerträge und die abgeführten Ernterückstände. Die Bilanz wird pro Betrieb berechnet und nicht parzellenspezifisch.

3.1 Einträge

3.1.1 Hof- und Recyclingdünger

Der Anfall von Hofdünger pro Betrieb wird in erster Linie anhand des Tierbestandes aus den AGIS-Daten und den N-Ausscheidungen pro Tierkategorie gemäss GRUD-Standardwerten («Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz»; Richner und Sinaj 2017) berechnet und in einem zweiten Schritt mit weiteren Daten korrigiert. Dabei werden die Ausscheidungen der Tiere nach der Aufenthaltsdauer zwischen Ganzjahresbetrieben und Sömmerungsflächen aufgeteilt. Die Tierkategorien in der GRUD unterscheiden sich leicht von den Kategorien in der AGIS-Datenbank (TVD-Kategorien), weswegen man eine Zuordnung (Mapping) der AGIS-Tierkategorien auf die GRUD-Kategorien benötigt (Tabelle A1). Dieses Mapping ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Beispielsweise wurde der AGIS-Kategorie «Rindergattung und Wasserbüffel, Andere Kühe» die GRUD-Kategorie «Mutterkuh mittelschwere Rassen (600-700 kg)» zugeordnet unter der Annahme, dass es sich bei den meisten Tieren dieser AGIS-Kategorie um Mutterkühe handelt. Des Weiteren liegen keine betriebsspezifischen Angaben über das Gewicht von Mutterkühen vor. Als weiteres Beispiel konnte bei den AGIS-Tierkategorien für Rinder und Kälber nicht zwischen Aufzucht und Mast unterschieden werden; als erste Näherung wurden deswegen Werte für die Aufzucht eingesetzt, da die Alterskategorien zwischen AGIS und GRUD hier besser übereinstimmen.

Die Standardwerte zum N-Anfall gemäss GRUD geben einen Mittelwert der zu erwartenden N-Ausscheidungen an, was für die meisten Tierkategorien als eine gute Annäherung für den tatsächlichen Anfall gesehen wird (Richner et al., 2017). Für folgende Tierkategorien haben wir die Abschätzung der Nährstoffausscheidungen mit weiteren Datenquellen verfeinert: 1) Milchkühe, wo der N-Anfall von der Milchleistung abhängt; 2) Schweine, wo die Phasenfütterung Einfluss auf den Nährstoffanfall hat; 3) Mastpoulets, wo sich die Nährstoffausscheidungen zwischen konventionellen und biologischen Zuchten stark unterscheiden.

Für die Korrektur des N-Anfalls der Milchkühe werden – falls vorhanden – die Angaben zu den durchschnittlichen Milchleistungen aus den Qualitas-Daten verwendet. Für Betriebe, für die keine Daten in der Qualitas-Datenbank vorhanden sind, werden die Milchleistungen basierend auf der in den Verkauf gebrachten Milch aus der AGIS-Datenbank abgeschätzt (mit einem Faktor von 1.1 multipliziert, um produzierte, aber nicht verkaufte Milch zu berücksichtigen). Sind diese Daten ebenfalls nicht verfügbar, wird der Standard-GRUD N-Anfall für die Berechnung benutzt. Anhand der Milchleistung (ML in kg Milch pro Jahr) wird ein Korrekturfaktor (KF) berechnet und mit dem Standard-N-Anfall der Milchkühe multipliziert:

$$KF = 1.05 * \frac{ML - 7500kg}{1000} \text{ für } ML > 7500 \text{ kg a}^{-1} \quad \text{Gleichung (1)}$$

$$KF = 0.95 * \frac{7500kg - ML}{1000} \text{ für } ML < 7500 \text{ kg a}^{-1} \quad \text{Gleichung (2)}$$

Des Weiteren haben weitere Faktoren wie die Fütterung der Milchkühe einen Einfluss auf den Nährstoff-Anfall. Leider sind im Moment keine regional aufgelösten, tierspezifischen Informationen dazu verfügbar.

Auch bei den Schweinen hat der Proteingehalt im Futter einen grossen Einfluss auf den N-Gehalt in den Ausscheidungen (Agridea, 2023). Durch Phasenfütterung wird der Rohproteingehalt im Futter an den Rohproteinbedarf der Schweine entsprechend deren Wachstumsphase angepasst. Die Phasenfütterung von Schweinen wird mit einem Ressourceneffizienzbeitrag durch das BLW vergütet. Somit ist in den AGIS-Daten ersichtlich, welcher Betrieb die proteinangepasste Phasenfütterung bei den Schweinen durchführt. Anhand der Resultate der Ammoniakumfrage lässt sich der durchschnittliche Rohprotein- und Energiegehalt im Futter von

Betrieben mit und ohne Phasenfütterung berechnen. Diese Gehalte werden genutzt, um die Standard-N-Ausscheidung gemäss GRUD für Mastschweine zu korrigieren. Die Korrektur erfolgt gemäss Anhang 7.5 in Kupper et al. (2018) mit einer Reduktion der N-Ausscheidung um 0.9% pro 1 g weniger Rohproteingehalt (skaliert auf den Standard-Energiegehalt vom Futter) im Vergleich zum Basis-Gehalt (170 g pro kg Futter).

Der Nährstoffanfall von Mastpoulets unterscheidet sich stark zwischen konventionellen und Bio-Betrieben. Ein Vergleich von 63 Mastpoulet-Betrieben (Anteil Bio = 14%) im Kanton St. Gallen zeigte, dass Bio-Mastpoulets einen um 63% höheren N-Anfall als konventionelle Mastpoulets haben (Tabelle 1); der Standardanfall nach GRUD liegt dazwischen (Tabelle 1). Die Unterschiede sind auf die verschiedenen Nährstoffgehalte im Futter und die unterschiedlichen Leistungen zwischen den zwei Produktionssystemen zurückzuführen. Für den Nährstoffanfall bei Mastpoulets haben wir statt des Standardanfalls aus der GRUD die produktionsspezifischen Werte (bio/konventionell) aus Tabelle 1 verwendet.

Tabelle 1: Unterschied des Nährstoffanfalls (in kg pro 100 Mastpouletplätze) bei Mastpoulets zwischen Bio- und konventionellen Betrieben und der Vergleich mit dem Standardanfall gemäss GRUD. Datengrundlage: Suisse-Bilanzen von 63 Betrieben im Kanton St. Gallen (9 davon Bio).

Produktion	N Anfall (kg pro 100 MPP)
Bio	44.3
Konventionell	27.2
Standardanfall GRUD 2017	36.0

Für die Nährstoffverschiebungen durch Hof- und Recyclingdünger werden die HODUFLU-Daten verwendet. Einzelne Verschiebungen von Hofdünger in HODUFLU sind unrealistisch gross (z.B. > 50'000 m³ Laufstallmist für einen einzelnen Betriebstransfer). Jedoch gibt es Eingaben in HODUFLU über alle Grössenordnungen; somit ist es schwer zu bestimmen, ab welcher Menge an Hofdünger die Einträge falsch sind. Die Abgrenzung wird zusätzlich durch Einträge Ende Jahr erschwert, in denen offensichtlich verschiedene Lieferungen aufsummiert wurden. Aus diesem Grund werden in unserer HODUFLU-Datenaufbereitung die abgegebenen Mengen an Hofdünger pro Betrieb mit dem voraussichtlichen produzierten Hofdünger gemäss AGIS-Tierbestand und den aufgenommenen Mengen an Hofdüngern gemäss HODUFLU verglichen (Input-Output-Vergleich). Sollten die abgegebenen Mengen die produzierten und aufgenommenen Mengen übersteigen, werden alle Verschiebungen in der HODUFLU-Datenbank abgehend von diesem Betrieb mit einem Faktor ($KF_{Hoduflu}$) korrigiert:

$$KF_{Hoduflu} = \frac{Q_{Ab}}{P + Q_{Auf}} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Wobei Q_{Auf} die aufgenommene Menge an Hofdünger gemäss HODUFLU, Q_{Ab} die abgegebene Menge an Hofdünger gemäss HODUFLU und P die Menge produzierter Hofdünger gemäss Tierbestand bezeichnen.

3.1.2 Mineraldünger

Betriebspezifische Angaben zum Einsatz von Mineraldünger sind rar. Aus diesem Grund haben wir für die N-Bilanz im MAUS Annahmen getroffen, die den Mineraldüngereinsatz grob abschätzen. Dafür wurde der kulturspezifische mittlere Mineraldüngereinsatz von allen ZA-AUI-Betrieben über alle Beobachtungsjahre berechnet (Abbildung 2). Unterschiede zwischen einzelnen Betrieben können somit nicht abgebildet werden. Einzig die Bio-Betriebe werden von den konventionellen Betrieben unterschieden, da diese keine leicht löslichen Mineraldünger einsetzen dürfen. In der Berechnung wurden bei Bio-Betrieben deswegen die Mineraldüngereinträge auf null gesetzt, dafür die Einträge von organischen Handelsdüngern (z.B. Federmehl) berücksichtigt.

Die ZA-AUI-Mittelwerte in Abbildung 2 sind für Grünland sowie die wichtigen Ackerkulturen plausibel. Bei den Spezialkulturen wie Gemüse und Obst, für die die Repräsentativität im ZA-AUI-Datensatz schlecht ist (siehe Gilgen et al. 2023), sind die Werte hingegen (zu) tief, vor allem wenn angenommen wird, dass gerade im Gemüsebau viel

mineralische Dünger eingesetzt werden. Nach Rücksprache mit verschiedenen Agroscope-Experten wurde aus diesem Grund für den Gemüse- und Obstbau die Mineraldüngermengen anhand der GRUD-Empfehlungen abgeschätzt, in dem Bewusstsein, dass diese Mengen zwischen einzelnen Betrieben stark variieren können, jedoch im Mittel ungefähr der Realität entsprechen dürften. Die Düngungsnormen (in kg N pro Hektar) einzelner Gemüsekulturen unterscheiden sich sehr stark. In den georeferenzierten Nutzungsdaten sind die Gemüsekulturen jedoch nicht genauer spezifiziert (Unterscheidung zwischen «einjährige Freilandgemüse, ohne Konservengemüse», «Freiland-Konservengemüse», «Einjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen», «Mehrjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen», «Spargel», «Rhabarber» und «Wurzeln der Treibichorie») und somit die meisten unter der Gruppe «Freilandgemüse» zusammengefasst. Darum wird anhand der schweizweiten Anbauflächen der verschiedenen Gemüsekulturen (Daten der SZG) ein totaler Mineraldüngereinsatz nach GRUD abgeschätzt und dieser Wert auf alle Freilandgemüseflächen in den georeferenzierten Nutzungsdaten gleichmässig verteilt. Dadurch kann berücksichtigt werden, dass pro Jahr oft mehrere Gemüse nacheinander auf einem Schlag angebaut werden.

Beim Stein- und Kernobst ist die GRUD-Düngungsnorm abhängig von den Erträgen. Die Abschätzung der Düngemenge anhand der jährlich variierenden Erträge ist trotzdem nicht empfehlenswert, da die Obsterträge auch stark durch die Jahreswitterung beeinflusst werden. Deswegen wird der mittlere GRUD-Standard-Mineraldüngereinsatz für die Obstflächen verwendet.

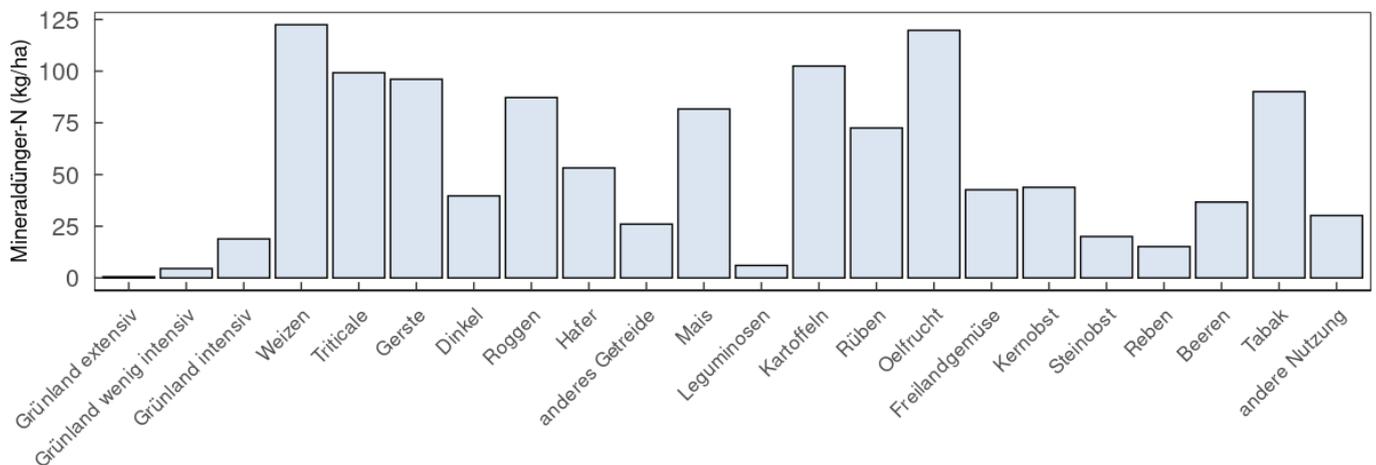


Abbildung 2: Kultur(typen)spezifische Mittelwerte für mineralische N-Düngung gemäss allen ZA-AUI Betrieben zwischen 2009 – 2021. Die Zuweisung der verschiedenen Kulturen vom ZA-AUI auf die Kulturgruppen im MAUS wird in Tabelle A2 gezeigt.

3.1.3 Atmosphärische Deposition

Während in der ZA-AUI eine einheitliche atmosphärische N-Deposition über ganze Schweiz angenommen wurde, wird die N-Deposition neu anhand einer Depositionskarte von Meteotest parzellenspezifisch abgeschätzt (Rihm & Künzle, 2023; Meteotest, 2023). Die Depositionskarte von Meteotest enthält im Unterschied zum ZA-AUI-Standardwert nur die N-Depositionen aus Quellen ausserhalb der Landwirtschaft. Somit werden «interne» Flüsse (z.B. Ammoniakemissionen der Landwirtschaft, die wiederum N-Depositionen verursachen) in MAUS nicht mehr einberechnet. Der Grund für diese Entscheidung war folgender: Würden Depositionen aus Quellen innerhalb der Landwirtschaft berücksichtigt, gäbe es in der OECD-Bilanz eine zweifache Bilanzierung dieser Einträge. Die Depositionen resultieren nämlich hauptsächlich aus Ammoniakemissionen, die im Stall (inkl. Laufhof), auf der Weide sowie bei der Lagerung und der Ausbringung von Hofdünger entstehen. Da in der OECD-Bilanz die Nährstoffe aber als totaler ausgeschiedener N bilanziert werden, sind diese Verluste bereits ein Teil des Eintrages und werden im Überschuss der Bilanz quantifiziert. Aus diesem Grund zählen wir die Depositionen, die aus diesen Verlusten resultieren, nicht noch einmal als Eintrag in die Bilanz. Der Transport von landwirtschaftlichem Ammoniak in der Atmosphäre und daraus resultierende regionale Verschiebungen in der N-Deposition können mit diesem Berechnungsansatz nicht berücksichtigt werden. Die georeferenzierten Nutzungsdaten wurden über das 1km x 1km Raster der N-Depositionskarte (Abbildung 3) gelegt und die mittlere N-Deposition pro Parzelle extrahiert.

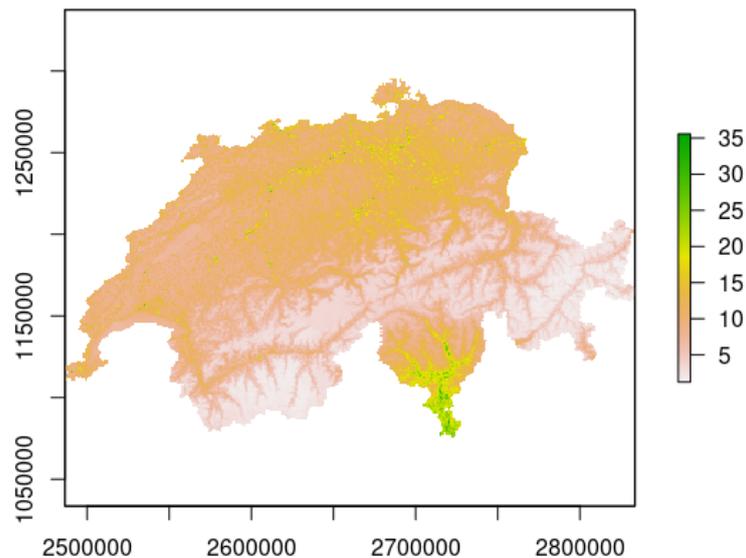


Abbildung 3: Karte der N-Deposition von Quellen ausserhalb der Landwirtschaft in kg pro Hektare.

3.1.4 Biologische N-Fixierung

Im Vergleich zur ZA-AUI wurde die Methodik für die Berechnung der Stickstofffixierung weiterentwickelt. Nucera et al. (2023) überarbeiteten die Grundlagen für die Abschätzung der Stickstoff-Fixierung in Natur- und Kunstwiesen sowie für Körnerleguminosen. In dieser adaptierten Methode wurden gewisse Parameter im Vergleich zur bisherigen Methode angepasst. Neu wird die symbiotische (als Teil der biologischen Fixierung) N-Fixierung (N_{Fix}) im Grünland folgendermassen berechnet:

$$N_{Fix} = Y_{DM} * Leg_{RA} * N_{con} * \left(0.73 - 0.001 * N_{fert} + 0.2(1 - e^{3.34(Leg_{RA}-1)}) \right) * BGTNF \quad \text{Gleichung (4)}$$

Mit:

Y_{DM} = Ertrag der Trockensubstanz ($dt \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

Leg_{RA} = Leguminosen-Anteil

N_{con} = N-Gehalt in den Leguminosen ($kg \text{ N } dt^{-1} \text{ TS}$)

N_{fert} = Stickstoffdüngung ($kg \text{ N}_{verf} \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

BGTNF = Unterirdischer und Transfer-Stickstoff-Faktor

In der ZA-AUI wurde die N-Fixierung bisher wie in Spiess & Liebisch (2022) berechnet, vereinfacht für die Datengrundlage im MAUS sieht die Methode folgendermassen aus:

$$N_{Fix} = \frac{Y_{DM}}{130 \text{ dt } ha^{-1}} * Leg_{RA}(\text{in Prozent}) * 4.15 \text{ kg N } ha^{-1} * 1.4 \quad \text{Gleichung (5)}$$

Während der Ertrag und der Leguminosen-Anteil auch in der bisherigen Berechnung wichtige Faktoren sind (Spiess & Liebisch, 2022), fliessen in der adaptierten Methode auch der N-Gehalt in den Leguminosen, die Stickstoffdüngung und der BGTNF explizit in die berechnete N-Fixierung ein. Der N-Gehalt in den Leguminosen ist abhängig von der Art des Grünlandes (Wiese oder Weide) und der Intensität der Bewirtschaftung (Nucera et al., 2023). Der BGTNF hängt vom Leguminosen-Anteil ab, jedoch ist der Wert bei $Leg_{RA} \leq 0.5$ immer 1.6 (Nucera et al., 2023). Der Leguminosen-Anteil wird aufgrund fehlender parzellenspezifischer Informationen auf 10% für Naturwiesen und 30% für Kunstwiesen gesetzt, die gleichen Werte, welche schon für die Berechnung in der ZA-AUI verwendet wurden (Spiess & Liebisch, 2022). Die Grünlanderträge werden anhand des Grundfutterverzehr des Betriebs abgeschätzt (siehe Kapitel 3.2). Die Stickstoffdüngung muss als verfügbarer N in die Gleichung eingesetzt werden, jedoch wird der Hofdünger in der Berechnung der N-Bilanz als totaler N angegeben. Für die Berechnung der N-Fixierung wird

ein Umrechnungsfaktor (N_{tot}^2 zu N_{verf}) von 0.5 für die organische Düngermenge verwendet (Richner und Sinaj 2017). Für diesen Bericht wurde die MAUS-N-Bilanz mit der neuen N-Fixierungs-Methode (Gleichung 4) berechnet. In Kapitel 0 werden die zwei Ansätze miteinander verglichen und deren Einfluss auf die Bilanzen diskutiert.

In der ZA-AUI wurde für die N-Fixierung durch die Körnerleguminosen einen Standard-Wert von 200 kg pro Hektare angenommen. Für das MAUS wird nun die N-Fixierung durch die Körnerleguminosen nach der Methode berechnet, welche in Nucera et al. (2023) vorgestellt wurde:

$$N_{\text{Fix}} = (\alpha_{\text{crop}} * Y_{\text{DM}} * N_{\text{con}} * \text{NHI}^{-1} + \beta_{\text{crop}}) * \text{BGNF} \quad \text{Gleichung (6)}$$

Mit:

α_{crop} und β_{crop} = kulturspezifische Regressionskoeffizienten

Y_{DM} = Ertrag der Trockensubstanz ($\text{dt ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

N_{con} = N-Gehalt in den Körnerleguminosen ($\text{kg N dt}^{-1} \text{ TS}$)

NHI = Stickstoff-Ernte-Index

BGNF = Unterirdischer Stickstoff-Faktor

Die verwendeten kulturspezifischen Koeffizienten sind in Nucera et al. (2023) in Tabelle 12 zusammengefasst.

3.1.5 Saatgut

Schweizweite betriebsspezifische Daten zur Menge an eingesetztem Saatgut sind nicht vorhanden. Somit werden auch für die Nährstoffeinträge über das Saatgut kulturspezifische Mittelwerte von den ZA-AUI-Daten abgeleitet. Der mögliche Fehler auf die gesamte Bilanz ist sehr klein, da der Nährstoffeintrag über das Saatgut mit Abstand der kleinste Faktor aller Nährstoffeinträge in der gesamten Bilanz ist.

3.2 Austräge

Die Austräge werden ausschliesslich über die Ernteprodukte (pflanzliche Nahrungs- und Futtermittel) berechnet. Nährstoffverluste werden indirekt im Saldo abgebildet. Die Erträge für die Ackerkulturen pro Betrieb werden grösstenteils durch die Ertragsdaten der verschiedenen Branchenorganisationen, Kantonsdaten und der ZA-BH abgeschätzt (siehe Kapitel 2). Um regionale Unterschiede zu berücksichtigen, wurden pro Kultur die verfügbaren Daten auf Bezirksebene aggregiert und der Median des Ertrags daraus ermittelt (Abbildung 4a am Beispiel Winterweizen). Für Regionen ohne Ertragsdaten wurde eine räumliche Interpolation mit dem R-Package *automap* (Hiemstra et al., 2008) durchgeführt (Abbildung 4b). Es sei darauf hingewiesen, dass in Bezirken mit fehlenden Ertragsdaten die Kultur in vielen Fällen kaum oder nicht vorkommt (Bezirke mit wenig/ohne schwarze Punkte in Abbildung 4b) und das Ergebnis der räumlichen Interpolation somit nicht immer verwendet wird. Die Nährstoffkonzentrationen in den verschiedenen Ernteprodukten wurden aus der ZA-AUI-Datenbank genommen. Die Einträge in dieser Datenbank stammen aus der GRUD, der Futtermittel-Datenbank (Agroscope, 2016) und der Schweizer Nährwertdatenbank.

Gemüseerträge sind schwer abzuschätzen, da in den Nutzungs(flächen)daten nicht genau ersichtlich ist, i) welche Gemüsekultur angebaut wird, und ii) die Ertragsabschätzung nur auf den Angebotsmengen der SZA basiert. Der nationale mittlere N-Ertrag für alle Gemüseflächen wurde berechnet, indem die Menge der produzierten Gemüse (schweizweite Angebotsmengen der SZG) mal die N-Konzentrationen der jeweiligen Arten gerechnet und danach durch die totale Anbaufläche von Gemüse (aus den georeferenzierten Nutzungsdaten) dividiert wurde.

Die Erträge der Grünlandflächen sind generell nicht einfach zu quantifizieren. Ein Ansatz ist es, die Erträge über den Grundfutterverzehr des raufutterverzehrenden Tierbestandes eines Betriebes abzuschätzen. Es wurde angenommen, dass das Grundfutter durch betriebseigene Grün- & Silomais- sowie Graslandflächen gedeckt wird und kein Grundfutter zu- oder verkauft wird (keine Daten zu Grundfuttertransporten). Der Grundfutterverzehr pro

² N_{tot} gemäss GRUD: totaler ausgeschiedener N ohne Verluste im Stall und bei der Lagerung; N_{ges} gemäss Suisse-Bilanz: ausgeschiedener N minus der nicht vermeidbaren Verluste im Stall und bei der Lagerung

Tierkategorie wurde aus der GRUD abgeleitet (Richner et al., 2017) und anhand des Tierbestandes für den Betrieb berechnet (in dt TS pro Jahr). Der GRUD-Wert für den Grundfutterverzehr wurde für die Milchkühe anhand der Milchleistung angepasst (gemäss Suisse-Bilanz Tabelle 2b). Vom betriebsspezifischen Grundfutterbedarf wurde danach der angepflanzte und geerntete Grün- und Silomais abgezogen, um die Menge des Graslandertrages abzuschätzen. Auf diesen Netto-Grundfutterbedarf wurden noch 5% Fütterungsverluste hinzugerechnet, um den Grünlandertrag des Betriebs abzuschätzen. Dieser Ansatz funktioniert nicht bei Betrieben, die Grünflächen in der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) haben, jedoch ohne Tierbestand wirtschaften. Für diese Betriebe wurde der Grünlandertrag pro Fläche in Abhängigkeit der Intensität der Bewirtschaftung und der Höhenlage gemäss GRUD berechnet (Huguenin-Elie et al., 2017).

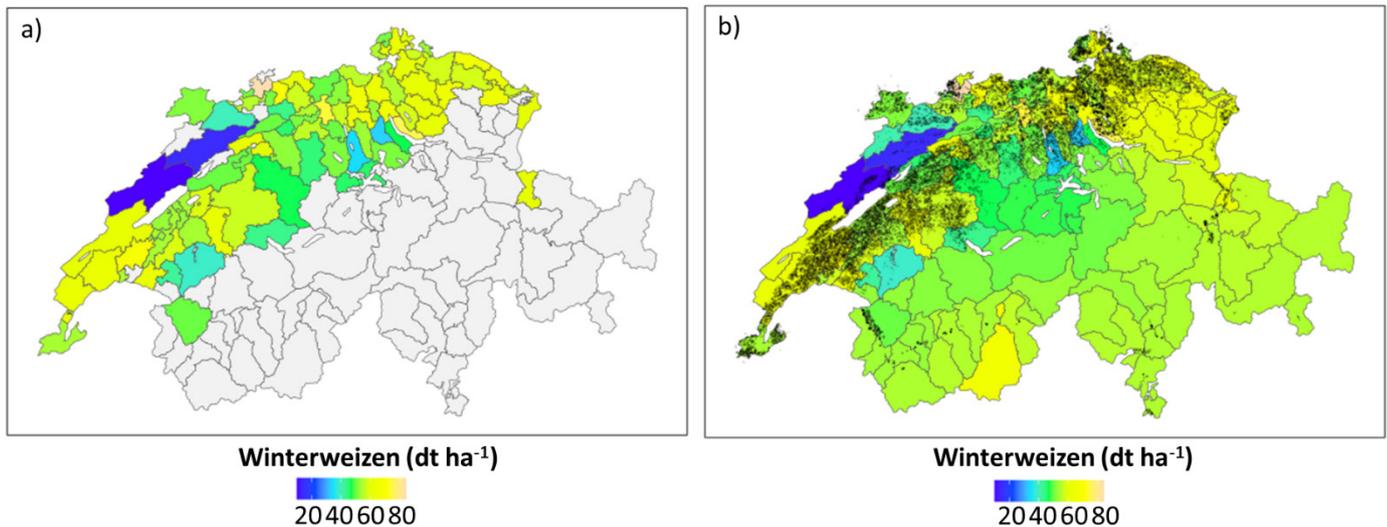


Abbildung 4: a) Regionale Medianwerte der Winterweizenerträge (Körner) des Jahres 2021 in dt ha⁻¹ erhalten von Agristat und ZA-BH. b) Resultate der räumlichen Interpolation auf Bezirksebene anhand der Median-Erträge in a). Schwarze Punkte zeigen die Parzellen mit der Hauptkultur Winterweizen im Jahr 2021.

3.3 N-Bilanz des Sömmerungsgebiets

Die N-Bilanz kann entweder auf der gesamten LN oder der gesamten landwirtschaftlichen Fläche inkl. Sömmerung berechnet werden (LF). Zu den Sömmerungsbetrieben sind Informationen zu den gesömmerten Tieren verfügbar, jedoch können die Flächen des Sömmerungsgebietes, falls in den georeferenzierten Nutzungsdaten vorhanden, nicht mit den Sömmerungsbetrieben verknüpft werden. Darum wurden die Sömmerungsbetriebe (Sömmerungsflächen sowie gesömmerte Tiere) auf Kantonsebene aggregiert, d.h. pro Kanton wird ein mittlerer Wert für die Sömmerung berechnet. Für die Bilanz werden der Nährstoffanfall der gesömmerten Tiere, die atmosphärische Deposition und die biologische N-Fixierung als Einträge berücksichtigt. Mineralische Stickstoffdünger dürfen in den Sömmerungsgebieten nicht eingesetzt werden und der Einsatz von Saatgut dürfte im Sömmerungsgebiet vernachlässigbar sein. Der Austrag in Form von Grünlanderträgen wird über den Grundfutterverzehr der gesömmerten Tiere abgeschätzt (Kapitel 3.2). Die totale Sömmerungsfläche pro Kanton wurde aus der Sömmerungs-Ebene der georeferenzierten Nutzungsdaten ausgelesen. Für Kantone ohne Fläche in dieser Ebene wurden die Flächen aus der Arealstatistik verwendet. Die Sömmerungs-Ebene wurde folgend mit der LN-Ebene überlagert und Flächen, die in beiden Ebenen vorkamen, wurden aus der Sömmerungs-Ebene entfernt.

4 Erste Resultate

In diesem Kapitel werden die Resultate der ersten Berechnung der MAUS-N-Bilanz für das Jahr 2021 präsentiert. Die Berechnung wird über die nächsten Jahre weiterentwickelt, indem neue Datenquellen und verbesserte Rechenwege miteinbezogen werden, was die Resultate über die Zeit robuster machen sollte.

Über die gesamte LN der Schweiz beträgt die N-Bilanz in der MAUS-Berechnung 57 kg ha^{-1} für das Jahr 2021. Die kantonalen Resultate zeigen grosse regionale Unterschiede (Abbildung 5). Der Kanton Luzern hat den grössten N-Überschuss ($100 \text{ kg N ha}^{-1}\text{-LN}$) aller Kantone. Die tiefste N-Bilanz weist der Kanton Wallis auf mit $17 \text{ kg N ha}^{-1}\text{-LN}$. Die kantonalen Resultate der N-Bilanzen der gesamten landwirtschaftlichen Fläche (inkl. Sömmerung) wird in Abbildung 5b präsentiert. Die Kantone mit viel Sömmerungsflächen weisen deutlich kleinere Bilanzen auf als mit der Bezugsgrösse LN.

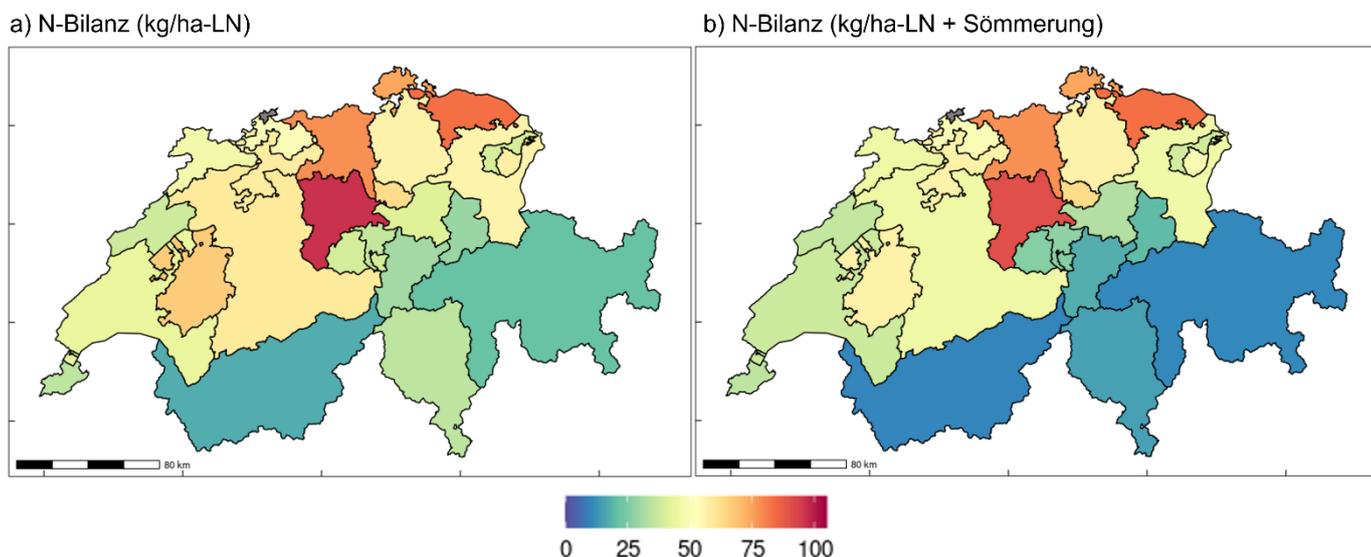


Abbildung 5: a) Die Karte zeigt die mittleren N-Bilanzen pro Kanton in kg N pro Hektar LN resultierend aus der MAUS-Berechnung. b) wie a), aber pro landwirtschaftliche Fläche (LN + Sömmerung).

Nebst den kantonalen Unterschieden gibt es auch beträchtliche Unterschiede zwischen den landwirtschaftlichen Zonen (Abbildung 6). Für die N-Bilanz nehmen die Überschüsse vom Talgebiet mit zunehmender Höhe ab, die tiefsten N-Überschüsse sind im Sömmerungsgebiet zu verzeichnen.

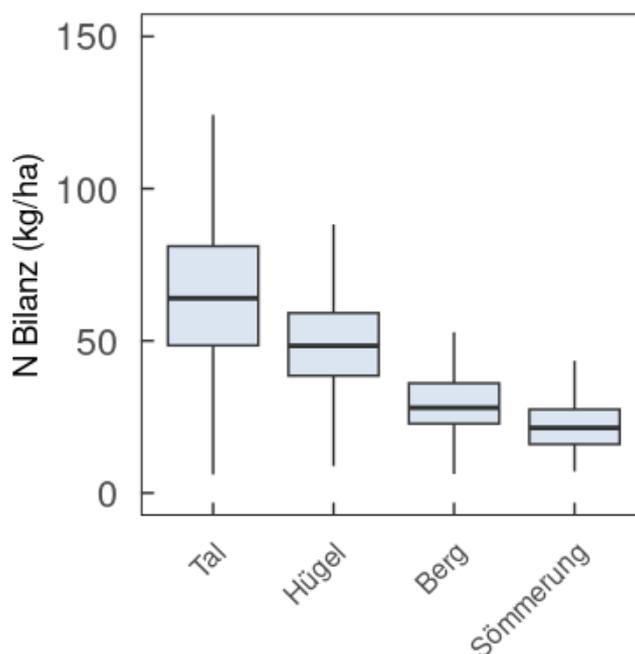


Abbildung 6: Boxplot der mittlerer N-Bilanzen aller Schweizer Bezirke im Jahr 2021 nach landwirtschaftlichen Zonen gemäss MAUS-Berechnung.

5 Vergleich MAUS mit nationaler OECD-Bilanz

Um den MAUS-Ansatz für die N-Bilanzierung zu überprüfen, wurden die verschiedenen Ein- und Austräge auf nationaler Ebene aggregiert und mit der nationalen OECD-Bilanz des BFS verglichen (Tabelle 2). Für den Vergleich mit den nationalen Werten wird die LN als Bezugsgrösse verwendet, d.h. die Sömmerungsfläche inklusive deren Ein- und Austräge werden nicht berücksichtigt. Die Werte wurden vom BFS zur Verfügung gestellt (OFS, 2023). Zur besseren Interpretation werden auch die verwendeten Methoden und Daten aufgezeigt. Die MAUS-N-Bilanzen aggregiert auf nationaler Ebene (57 kg ha⁻¹ für die LN und 40 kg ha⁻¹ für die gesamte LF) sind um 37% bzw. 39% tiefer als die vom BFS veröffentlichten Werte der nationalen OECD-Bilanz. Im Folgenden werden wir detaillierter darauf eingehen, wieso die MAUS-Methode die nationalen Werte unterschätzt.

Tabelle 2: Vergleich der schweizweiten (auf LN, ohne Sömmerung) Stickstoff-Ein- und Austräge zwischen der Berechnung von MAUS und den nationalen Zahlen vom Bundesamt für Statistik (BFS) für das Jahr 2021. Beide Ansätze folgen der Bodenbilanzierungsmethode nach OECD.

	Nationale OECD-Bilanz des BFS	Auf nationaler Ebene aggregierte MAUS-OECD-Werte	Methode/Daten BFS	Methode/Daten MAUS
N-Einträge				
Organische Dünger (t)	126'811	120'068 (- 5%)	Agrarstrukturerhebungen BFS, HODUFLU, AGIS, Schlachtstatistiken Agristat	Abschätzung gemäss AGIS-Tierbestand & HODUFLU, Korrekturen anhand Milchleistung Qualitas, Ressourceneffizienzbeiträge AGIS, Ammoniak-Umfrage HAFL, Suisse-Bilanz-Stichprobe St. Gallen
Mineralische Dünger (t)	45'978	33'548 (- 27%)	Importmengen - Agricura	Kulturspezifische ZA-AUI-Werte, georeferenzierte Nutzungsdaten
Biologische N-Fixierung (t)	33'070	30'832 (- 7%)	Methode Spiess & Liebisch (2022)	Methode Nucera et al. (2023)
Atmosphärische Deposition (t)	9'047	9'548 (+ 6%)	Karte N-Deposition OLW 2015 (Rihm & Künzle 2019)	Karte N-Deposition OLW 2020 (Rihm & Künzle 2023)
Saatgut (t)	1'041	816 (- 22%)	Standardmenge an Saatgut pro Kultur + Importe Setzlinge (Swiss Impex)	Kulturspezifische ZA-AUI-Werte, georeferenzierte Nutzungsdaten
Total Einträge (t)	215'947	194'813 (- 10%)		
N-Austräge				
Getreide (inkl. Körnermais) (t)	13'688	15'342 (+ 12%)	Ernteerträge Agristat	Ernteerträge Agristat & ZA-BH
Grünland (t)	91'887	102'179 (+ 11%)	Futtermittelbilanz Agristat; Heuerhebung Agridea	Abschätzung gemäss AGIS-Tierbestand und Grundfutterbedarf, Grünlandflächen gemäss georeferenzierten Nutzungsdaten

Hülsenfrüchte (t)	388	983 (+ 154%)	Ernteerträge Agristat	Ernteerträge Agristat, ZA-BH
Hackfrüchte (Kartoffeln & Rüben) (t)	2'393	2'208 (-8%)	Zuckerfabriken	Ernteerträge Swisspatat, SZA, ZA- BH
Gemüse (t)	1'229	612 (- 50%)	SZG	Angebotsmengen SZG
Früchte (Obst, Reben, Beeren) (t)	335	181 (- 46%)	SOV	Ertragsschätzungen Schweizer Obstverband
Silo- & Grünmais (t)	9'778	11'998 (+ 23%)	Ernteerträge Agristat	Ernteerträge Agristat, ZA-BH
Andere Erträge (Ölfrüchte, Nebenprodukte, etc.) (t)	3'077	2'924 (- 5%)	Ernteerträge Agristat	Ernteerträge Agristat, ZA-BH
Total Austräge (t)	122'776	136'427 (+ 11%)		
Bilanz (t)	93'171	58'385 (- 37%)		
Bilanz (kg/ha)	90	57		

5.1 Mineralischer und Organischer Dünger

In Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die tieferen nationalen Bilanzen im MAUS-Ansatz durch 10% tiefere N-Einträge und 11% höhere N-Austräge entstehen. Bei den Einträgen auf nationaler Ebene liegt der grösste Unterschied zwischen der MAUS-Berechnung und den Werten der nationalen OECD-Bilanz des BFS (sowohl in Prozent als auch in absoluten Zahlen) bei den mineralischen Düngern (-27% mit dem MAUS-Ansatz).

Die Menge an Mineraldünger unterscheidet sich durch die verschiedenen Ansätze in der Berechnung. Der nationale Wert geht von den nationalen Importmengen an N-Mineraldüngern von Agricura aus. Die MAUS-Berechnung basiert (abgesehen von Spezialkulturen) auf kulturspezifischen ZA-AUI-Werten, die nicht repräsentativ für die ganze Schweiz sind und somit die nationale Mineraldüngermenge höchstwahrscheinlich unterschätzen. Wir vermuten, dass dies der Hauptgrund für die unterschätzte Mineraldüngermenge darstellt.

Weitere, weniger wichtige Gründe für den tieferen Mineraldünger-Wert im MAUS-Ansatz sind die Vernachlässigung der Zwischenkulturen und der Kulturen im geschützten Anbau. Zwischenkulturen werden nicht berücksichtigt, da weder in den AGIS-Daten noch in den georeferenzierten Nutzungsdaten Informationen verfügbar sind. Eine Analyse der ZA-AUI-Betriebe über die Jahre 2009 bis 2021 zeigt, dass die AUI-Betriebe im Durchschnitt 1.2% der gesamten mineralischen N-Düngern auf Zwischenkulturen applizieren. Somit kann die Vernachlässigung der Zwischenkulturen nur einen kleinen Teil der grossen Diskrepanz in der Mineraldüngermenge erklären. Die Kulturen im geschützten Anbau werden nicht berücksichtigt, da diese sich ausserhalb der Systemgrenze der Indikatoren im MAUS befinden (analog zu der ZA-AUI). Dies, weil sich die Umweltwirkungen von geschütztem Anbau und Freiland deutlich unterscheiden und viele Indikatoren nicht im geschützten Anbau angewendet werden können. Die totalen Flächen mit geschütztem Anbau beziehen sich gemäss georeferenzierten Nutzungsdaten auf 470 ha. Unter der Annahme, dass im Durchschnitt ca. 250 kg N ha⁻¹ Mineraldünger verwendet werden, würden zusätzlich 118 t mineralischer N-Dünger anfallen, bzw. 0.4% von der nationalen Menge. Der geschützte Anbau ist somit bezüglich eingesetzter Mineraldüngermenge auf nationaler Ebene vernachlässigbar.

Durch die Berücksichtigung nur der Betriebe, die die BFS-Definition erfüllen (siehe Kapitel 2), werden fast 20'000 ha Kulturflächen nicht berücksichtigt, welche in den georeferenzierten Nutzungsdaten zusätzlich verfügbar sind. Würden diese Kulturflächen auch berücksichtigt, würde sich der mineralische N-Düngereinsatz um 608 t erhöhen, beziehungsweise 1.8%.

Während die Abschätzung der mineralischen Düngermengen im MAUS Unsicherheiten mit sich bringt und die tatsächlichen Mengen unterschätzt, ist auch die national in der Schweizer Landwirtschaft eingesetzte Mineraldüngermenge nicht genau erfasst. Wie viel vom verkauften Dünger tatsächlich in der Landwirtschaft eingesetzt wird, ist nicht genau bekannt und wird für die nationale Abschätzung auf 97% geschätzt (Spiess & Liebisch, 2020). Zusätzlich berücksichtigen die nationalen Verkaufszahlen keine Mengen, die potentiell nicht

angewendet werden. Dass die Verkaufsmengen nicht mit den Anwendungsmengen übereinstimmen müssen, zeigt ein Vergleich von Pflanzenschutzmittel (PSM)-Verkaufsmengen und PSM-Anwendungen in Dänemark zwischen den Jahren 2011 – 2019 (Miljøstyrelsen, 2021; Lutz et al., 2023). In Dänemark müssen sämtliche berufliche PSM-Anwendungen gemeldet werden. Diese Anwendungsdaten erklärten aber im Schnitt über die neun Jahre nur 69% der nationalen verkauften Mengen. Obwohl es sich hier um PSM und nicht Düngemittel handelt, ist die in beiden Fällen beobachtete Diskrepanz zwischen verkaufter und angewendeter Menge zu erwähnen.

Im Vergleich zu den N-Mengen von mineralischen Düngern stimmt die Menge an N in organischen Düngern besser mit den Zahlen aus der nationalen OECD-Bilanz des BFS überein (Tabelle 2). Die Diskrepanz der 5% tieferen N-Mengen im MAUS-Ansatz kann dadurch erklärt werden, dass im MAUS nicht alle Betriebe aus der AGIS-Datenbank berücksichtigt werden, sondern nur die Betriebe, welche die BFS-Norm erfüllen. Für die nationale OECD-Bilanz des BFS werden hingegen die Ausscheidungen der Tiere aller Betriebe berücksichtigt. Würden alle Betriebe aus dem AGIS-Datensatz berücksichtigt, würde sich die Menge an organischem N um 6% erhöhen und somit viel näher am nationalen Wert sein.

5.2 Biologische N-Fixierung

Im MAUS-Ansatz wird 9% weniger atmosphärischer N fixiert als in der nationalen OECD-Bilanzen des BFS (Tabelle 2). Ein Teil dieser Differenz ist auf die adaptierte Methodik zur Berechnung der N-Fixierung (nach Nucera et al., 2023) zurück zu führen. Jedoch liegt auch bei einer Anwendung der bisherigen Methode nach Spiess und Liebisch (2022) der nationale MAUS-Wert um 6% tiefer und kann somit nicht die ganze Differenz erklären. Es ist jedoch erstaunlich, dass die biologische N-Fixierung im MAUS tiefer ist, denn die national abgeschätzten Grünlanderträge im MAUS sind höher, was direkt in die N-Fixierungsberechnung einfließt. Somit muss der Unterschied durch eine andere Verteilung der Erträge auf die Wiesentypen zustande kommen, d.h. dass im MAUS weniger Ertrag auf Kunstwiesen anfällt im Vergleich zur nationalen OECD-Abschätzung des BFS (Kleeanteil auf Kunstwiesen ist höher als auf Naturwiesen, was zu höherer N-Fixierung führt).

5.3 Grünlanderträge

In totalen Zahlen ist der Unterschied bei den Grünlanderträgen am höchsten (10'292 t mehr in der MAUS-Bilanz). Dies sind vermutlich auch die Erträge mit den grössten Unsicherheiten, weil Gras teilweise direkt auf der Weide von den Raufutterverzehrnern gefressen wird. Die Abschätzung der Grünlanderträge über den Grundfutterbedarf der raufutterverzehrenden Tiere ist ein guter Ansatz, jedoch wird im MAUS-Ansatz das importierte Grundfutter nicht berücksichtigt. Somit ist es möglich, dass der MAUS-Ansatz die Grünlanderträge leicht überschätzt. Neben der Unsicherheit in der Grasproduktion kann der N-Gehalt im Gras auch regional und saisonal sehr stark variieren, jedoch wird in beiden Ansätzen mit einem durchschnittlichen N-Gehalt gerechnet. Die allgemeine Unsicherheit in der Abschätzung des N-Austrages über die Grasproduktion zeigt sich in der Diskrepanz zwischen den beiden Ansätzen.

5.4 Weitere Erträge

Die totalen N-Austräge sind um 11% höher im MAUS-Ansatz im Vergleich zu der nationalen OECD-Bilanz des BFS (Tabelle 2). Es gibt einzelne Kulturen, bei denen die Differenz besonders ausgeprägt ist. Prozentual sind die Unterschiede am grössten bei Hülsenfrüchten, Gemüse und Früchten. Für das Gemüse wird im MAUS nur das Freilandgemüse berücksichtigt, während Gemüse im geschützten Anbau nicht Teil des Monitorings sind. Deswegen ist der Gemüseertrag in der nationalen OECD-Bilanz des BFS höher als im MAUS-Ansatz. Auch bei den N-Austrägen über die Früchte (inkludiert Obst, Reben und Beeren) gibt es einen prozentual grossen Unterschied zum nationalen Wert, obwohl von den gleichen Datengrundlagen ausgegangen wird. Im MAUS-Ansatz werden aus den nationalen und kantonalen Erträgen und Anbauflächen ein Ertrag pro Fläche für die verschiedenen Obstkulturen berechnet. Bei den Rebflächen sind die totalen Flächen in den georeferenzierten Nutzungsdaten um ca. 10% geringer als die Rebflächen aus dem Sortenspiegel, welcher uns vom BLW zur Verfügung gestellt wurde. Diese geringeren Obstabauflächen in den georeferenzierten Nutzungsdaten führen zu tieferen Erträgen in der MAUS-Berechnung. Da die totalen N-Mengen durch die Austräge über die Gemüse- und Früchteerträge in der gesamten Bilanz vernachlässigbar sind (0.4 bzw. 0.1% des gesamten N-Austrages), ist die Unsicherheit jedoch marginal.

5.5 Weitere Unterschiede

Die N-Einträge über die atmosphärische Deposition stimmen gut mit der Zahl in der nationalen OECD-Bilanz des BFS überein und obwohl der prozentuale Unterschied beim N-Eintrag über das Saatgut gross ist, ist der Fehler durch die kleinen absoluten Mengen vernachlässigbar.

6 Vergleich MAUS mit der Regionalisierung des BFS

Im Vergleich zu den nationalen Bilanzen ist das Ziel der MAUS-N-Bilanz in erster Linie, die Nährstoffüberschüsse regional aufzuschlüsseln. In diesem Kapitel wird eruiert, wie gut die kantonalen Resultate mit der Regionalisierung der nationalen OECD-Bilanz des BFS übereinstimmen (OFS, 2023).

Der Vergleich der kantonalen Bilanzen wird in Abbildung 7 gezeigt. Der Vergleich bezogen auf die LN zeigt eine gute Korrelation zwischen den kantonalen Ergebnissen, jedoch sind die MAUS-Bilanzen im Schnitt 40% tiefer. Das ist durch die Abweichung der MAUS-Resultate von der nationalen OECD-Bilanz zu erklären (Tabelle 2). Die schlechteste Übereinstimmung gibt es für den Kanton Genf, wo die BFS-Bilanz drei Mal höher ist als die MAUS-Bilanz (Abbildung 7). Obwohl die Verteilung der gesamten Ein- und Austräge auf die Kantone zwischen beiden Ansätzen gut übereinstimmen (Abbildung 8), gibt es vor allem bei der Verteilung der mineralischen Dünger auf den Kanton Genf eine grosse Diskrepanz: Im MAUS-Ansatz fallen 2% der totalen mineralischen N-Dünger im Kanton Genf an, bei der BFS-Regionalisierung jedoch 4%, was zu 1'100 t mehr mit dem BFS-Ansatz führt (Abbildung A 1).

Der Kanton Genf ist im Vergleich zur restlichen Schweiz ein spezieller Fall, da der Tierbestand im Vergleich zur Ackerfläche deutlich geringer und somit der Hofdüngeranfall vergleichsweise klein ist. Da auch nicht viel Hofdünger importiert wird, wird weniger Hofdünger auf den Kulturen ausgebracht und somit wahrscheinlich mehr Mineraldünger eingesetzt. Dies passt zum viel höheren Anteil der offenen Ackerfläche an der LN im Kanton Genf (77%) als in der Schweiz (29%). Um zu überprüfen, ob unser Ansatz mit kulturspezifischen (jedoch nicht regionsspezifischen) Mineraldünger-Werten den Mineraldüngereinsatz im Kanton Genf unterschätzt, haben wir die Düngerverteilung für den Kanton Genf mit zwei weiteren Ansätzen durchgerechnet: 1) Der gesamte Hofdünger im Kanton Genf wird auf den (mittel)intensiven Grünflächen ausgebracht und die restlichen Kulturen im Kanton werden ausschliesslich mit mineralischem Dünger gemäss GRUD-Norm gedüngt; 2) alle Kulturen inklusive Grünflächen werden mit mineralischen Düngern gemäss GRUD-Norm gedüngt (der vorhandene Hofdünger fällt zusätzlich an). Im ersten Fall erhöht sich die mineralische N-Menge von 596 t auf 624 t und im zweiten Fall auf 739 t. Somit hat sich auch im extremen Szenario die mineralische N-Menge nur um 24% erhöht. Um die Werte des BFS zu erreichen (1742 t), müssten im gesamten Kanton Genf das 2.4-fache der GRUD-Norm gedüngt werden. Somit dürfte die BFS-Methode den Wert für den Kanton Genf überschätzen. Für andere Kantone mag hingegen der Wert des BFS der Realität mehr entsprechen als der MAUS-Wert.

Bei den Austrägen stimmt die Verteilung bei den mengenmässig wichtigen Kulturen (Grünland, Getreide, Grünmais & Leguminosen) sehr gut überein (Abbildung A 2). Die schlechtesten Übereinstimmungen der Verteilung der Austräge ergeben sich bei dem Gemüse und den Früchten (Abbildung A 3). Dies sind Kulturen, bei denen auch die Abschätzung der totalen Mengen nicht übereinstimmt (Tabelle 2). Jedoch sind die totalen Mengen dieser Kulturen gering im Vergleich zu den anderen Kulturen, so dass die Auswirkungen auf die kantonalen Bilanzen klein sind.

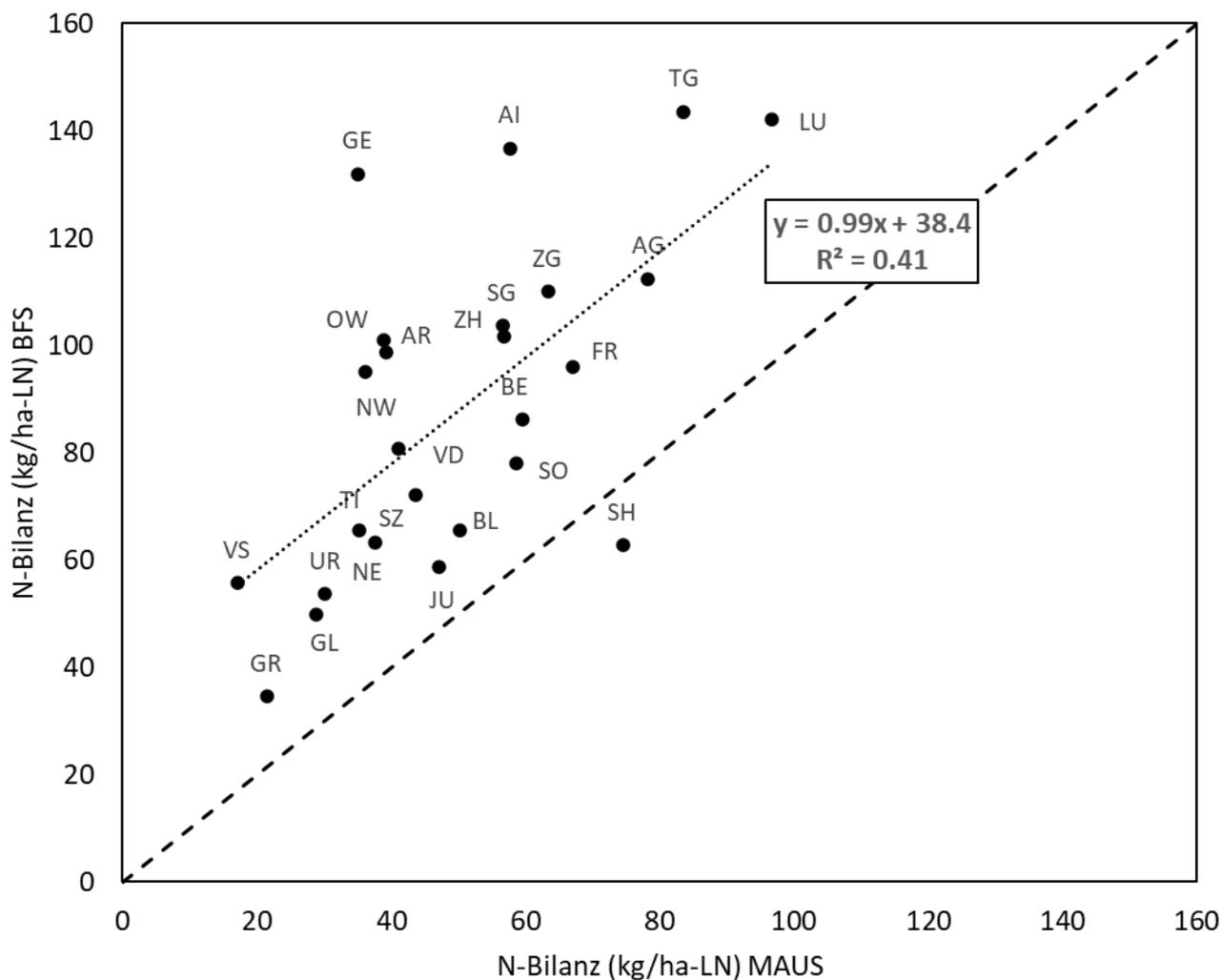


Abbildung 7: Vergleich kantonaler N-Bilanzen in kg ha^{-1} landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) zwischen der MAUS-Berechnung und der Regionalisierung des BFS (OFS, 2023). Die gepunktete Linie zeigt die lineare Regression. Die 1:1-Linie ist gestrichelt dargestellt.

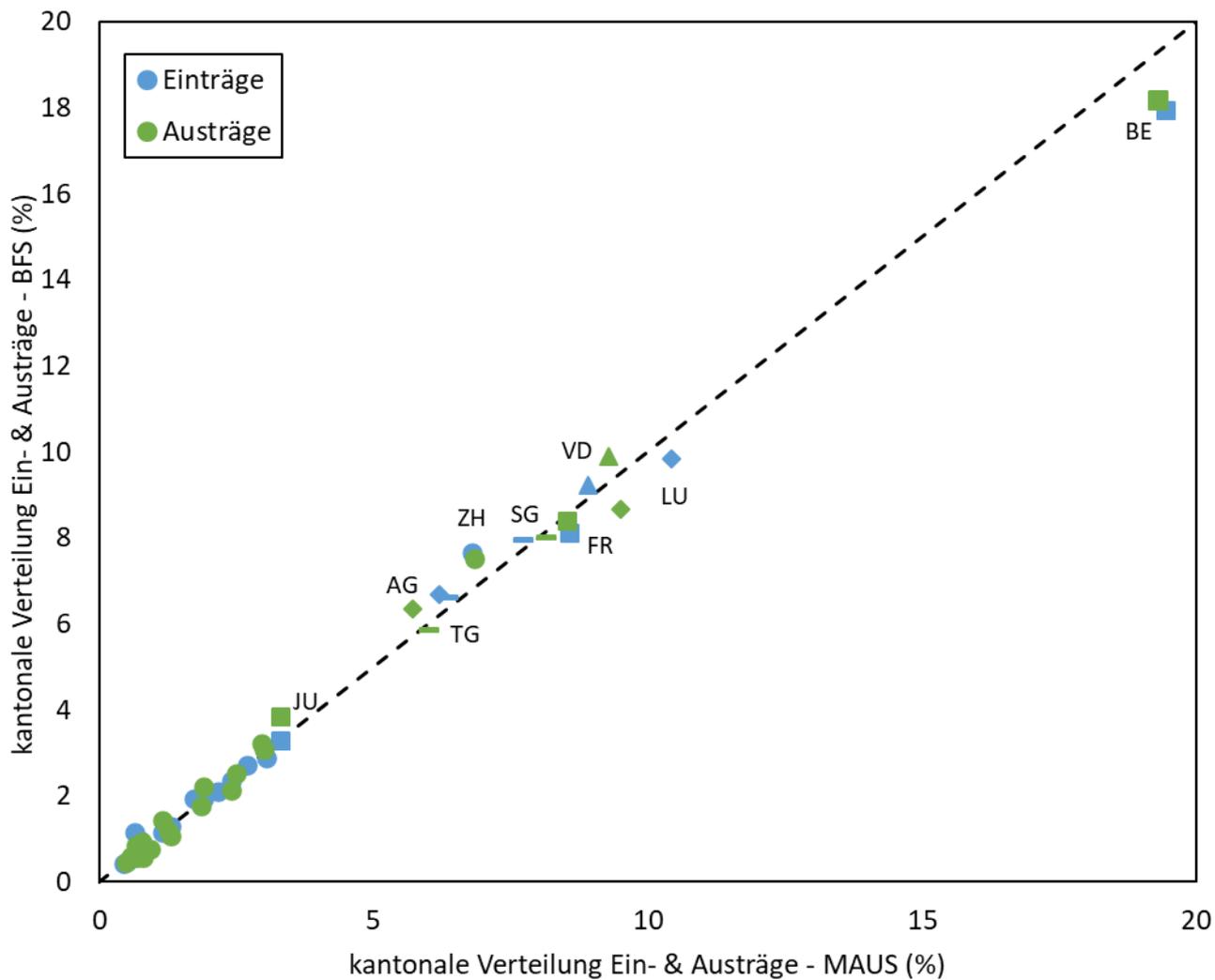


Abbildung 8: Vergleich der prozentualen Verteilung der N-Einträge (blaue Punkte) und N-Austräge (grüne Punkte) auf die Kantone zwischen dem MAUS-Ansatz und der BFS Regionalisierung. Die (teilweise) verschiedenen Formen zeigen verschiedene Kantone.

7 Vergleich der Methoden zur N-Fixierung

Mit MAUS wurde eine adaptierte Berechnung der biologischen N-Fixierung im Grünland und von Ackerleguminosen eingeführt (Nucera et al., 2023). Da die N-Fixierung mit 15% der drittgrösste N-Eintrag in der Bilanz ist, ist die Wahl der richtigen Methode von hoher Bedeutung. In der adaptierten Methode ist der N-Gehalt in den Leguminosen abhängig von der Art des Grünlandes und der Intensität der Bewirtschaftung (N_{con} zwischen 2.4 und 3.8 kg N dt⁻¹ TS), während der bisherige Ansatz von Spiess & Liebisch (2022) von einer konstanten Konzentration ausgeht.

Um den Einfluss der Wahl der Methode zu beurteilen, wurde die MAUS-Berechnung für das gleiche Jahr mit dem bisherigen Ansatz berechnet und mit der adaptierten Methode verglichen. Die N-Fixierung (im Grünland und von Ackerleguminosen) auf Kantonsebene für die MAUS-Berechnung nach der bisherigen Methode, die MAUS-Berechnung nach der adaptierten Methode und die BFS-Berechnung nach der bisherigen Methode ist in Abbildung 9 dargestellt. Es ist zu sehen, dass in der MAUS-Berechnung mit dem bisherigen Modell die N-Fixierung im Schnitt nur 1% höher ist als mit dem adaptierten Ansatz (Abbildung 9). Auch der Vergleich der kantonalen Werte in Abbildung 10 zeigt, dass die Resultate beider Methoden sehr gut übereinstimmen, mit einer minimalen Reduktion der N-Fixierung in Kantonen mit grösserer Grünlandfläche. Ein Wechsel auf die adaptierte Methode würde somit zu keinen grossen Änderungen in den N-Bilanzen führen. Zudem untermauert der Vergleich die veröffentlichten Zahlen aus den vorhergehenden Jahren (Spiess & Liebisch, 2022).

Jedoch bleibt die grösste Unsicherheit bei der Berechnung in beiden Methoden der N-Fixierung die Abschätzung des Kleeanteils. Diese Abschätzung hat einen grossen Einfluss auf die berechnete Menge an fixiertem N und somit auf die Genauigkeit der Berechnung. Der Kleeanteil kann nicht aus Betriebsdaten abgeleitet werden und müsste durch umfassende Erhebungen auf dem Feld bestimmt werden, was nicht den Zielen von MAUS entspricht. Somit ist die Annahme mit 30% Kleeanteil auf Kunstwiesen und 10% Kleeanteil auf Dauergrünland (Spiess & Liebisch, 2022) vorerst die einzige Alternative.

Die Methoden (Gleichungen 4 & 5) zur Berechnung der biologischen N-Fixierung berücksichtigen nur die symbiotische N-Fixierung. Die asymbiotische N-Fixierung wird auf Parzellenfläche/Betriebsebene vernachlässigt, da der Anteil an symbiotischer N-Fixierung an die gesamte biologische N-Fixierung viel grösser ist (ca. 90%, Nucera et al., 2023). Was auf Betriebsebene vernachlässigbar ist, kann auf gesamtschweizerischer Ebene jedoch einen beträchtlichen Beitrag zum gesamten Stickstoffeintrag leisten. Keuter et al. (2014) schätzten einen Wert für die asymbiotische N-Fixierung von 2.7 kg N ha⁻¹ für Grasland in Niedersachsen, Deutschland. Dieser Wert würde zu einem Eintrag von ca. 4'000 t N in der gesamten schweizerischen landwirtschaftlichen Fläche führen. Wegen der hohen Unsicherheit berücksichtigen wir die asymbiotische N-Fixierung in der Berechnung aber vorerst nicht.

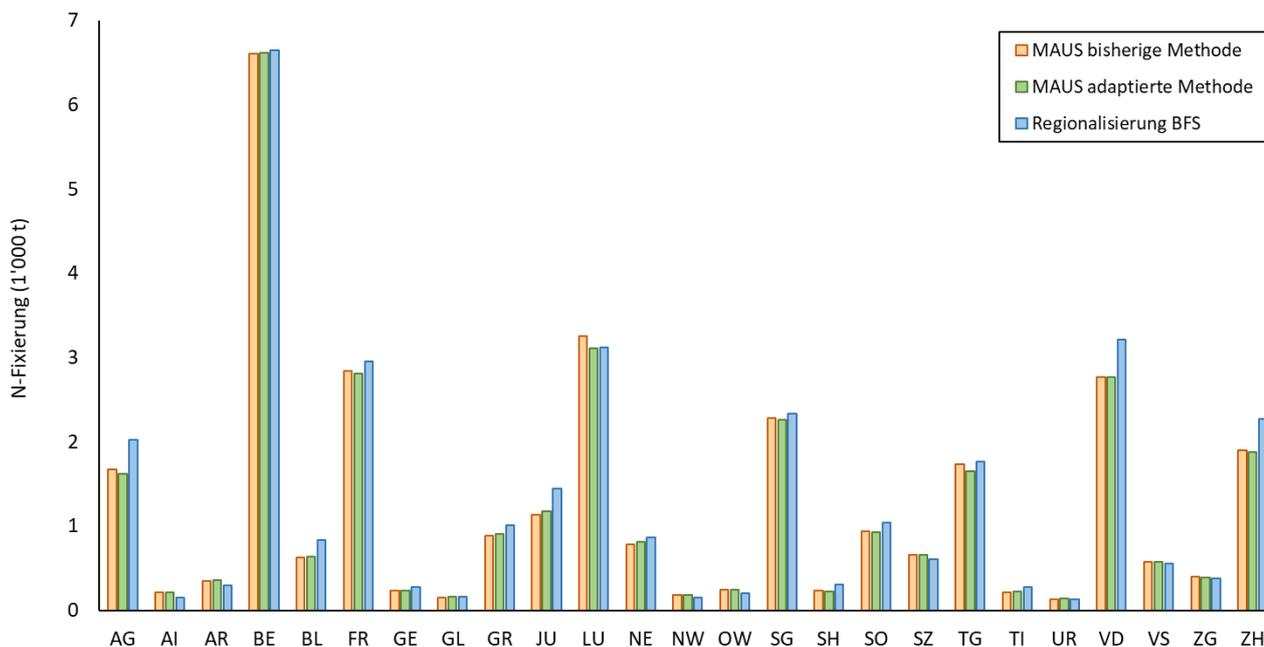


Abbildung 9: Vergleich der verschiedenen Ansätze zur Berechnung der N-Fixierung auf Kantonsebene. MAUS bisherige Methode entspricht dem Ansatz von Spiess & Liebisch (2020). MAUS adaptierte Methode entspricht dem Ansatz von Nucera et al. (2023). BFS = Regionalisierung N-Bilanz durch BFS mit Ansatz von Spiess & Liebisch (2020).

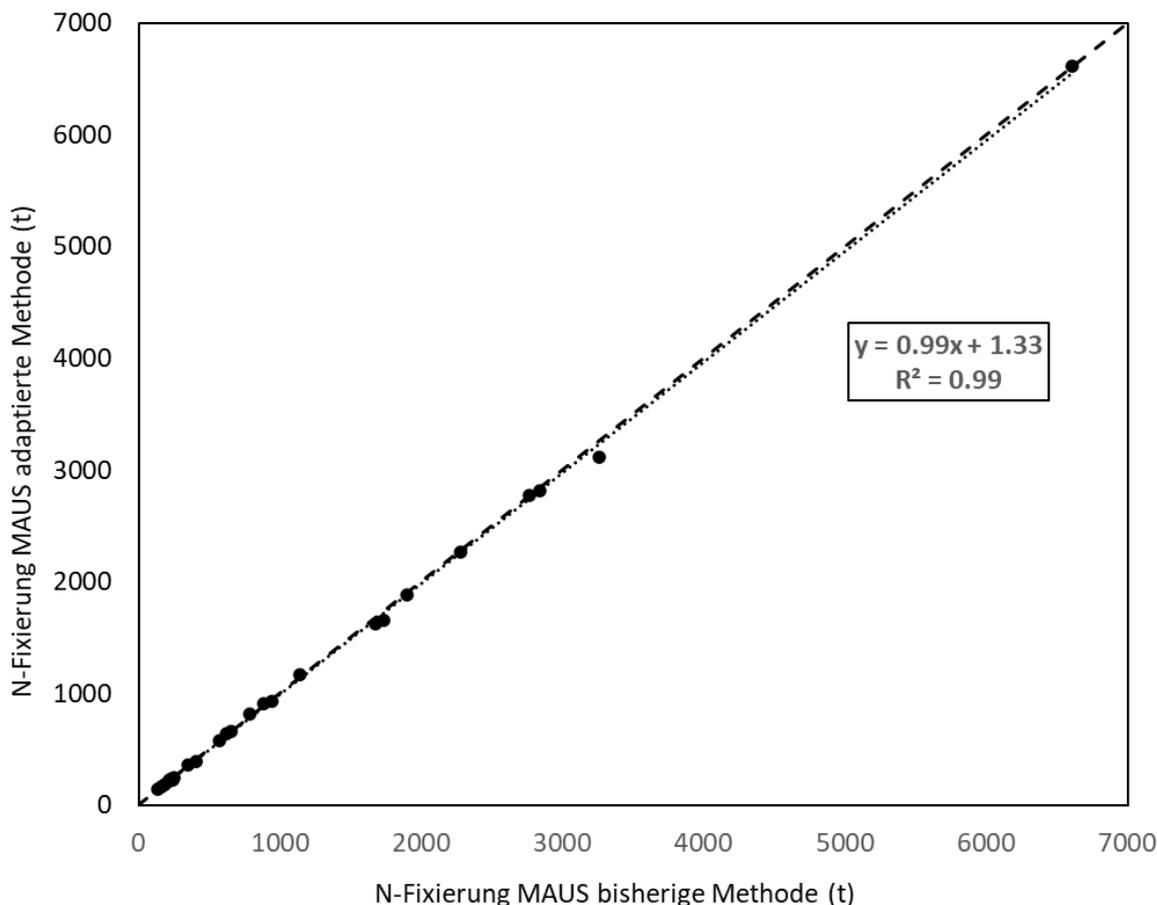


Abbildung 10: Vergleich der kantonalen N-Fixierungen zwischen der bisherigen Methode (nach Spiess & Liebisch 2022) und der adaptierten Methode (nach Nucera et al. 2023). Die gepunktete Linie zeigt die lineare Regression und die grau gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie.

8 Limitationen und zukünftige Anpassungen

8.1 Mineraldünger

Eine der grössten Unsicherheiten in unserer Berechnung liegt im Mineraldüngereinsatz. Der N-Eintrag über Mineraldünger ist nach den organischen N-Inputs schweizweit der grösste Eintrag von Stickstoff auf den Boden (Tabelle 2). Der Ansatz mit den kulturspezifischen Mittelwerten resultiert in einer unterschätzten Menge an mineralischen N-Düngern im Vergleich zu den nationalen Verkaufszahlen. Die grösste Sensitivität dürfte bei den intensiven Grünlandflächen liegen (Kapitel 5). Im Durchschnitt haben die ZA-AUI-Betriebe 19 kg mineralischen N pro Hektare und Jahr eingesetzt. Dieser Wert ist unsere Einschätzung nach von der Grössenordnung her zwar plausibel, hat aber bei verhältnismässig kleinen Änderungen einen grossen Einfluss auf das Resultat. Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, wie stark sich eine Änderung des kulturspezifischen Mittelwerts für das intensive Grünland auf die Bilanz auf nationaler Ebene auswirkt. Ein 50% höherer oder tieferer kulturspezifischer Mittelwert (28.5 bzw. 9.5 kg N pro Hektar) würde demnach die schweizweit eingesetzte mineralische N-Menge um 13% erhöhen bzw. verringern. Bei einer Erhöhung von 100% resultiert ein mineralischer N-Einsatz, welcher mit den nationalen Zahlen der Agricura übereinstimmen. Die Diskussion rund um die Mineraldüngerabschätzung unterstreicht die Bedeutung der Offenlegungspflicht im Bereich Mineraldüngerkäufe, die für die Bilanzierung von sehr grossem Wert wäre.

8.2 Kleeanteil

Bei der Stickstofffixierung ist die grösste Unsicherheit der Kleeanteil im Grünland. In der MAUS-Methode wird (wie schon in der ZA-AUI) ein Kleeanteil von 10% in Naturwiesen und 30% in Kunstwiesen angenommen. Da der Kleeanteil ein wichtiger Bestandteil bei der N-Fixierung ist, hat eine Unsicherheit in diesen Werten eine grosse Auswirkung auf die gesamte Menge an fixiertem N. Zum Beispiel führt ein schweizweit 5% höherer Kleeanteil (15% in Naturwiesen und 35% in Kunstwiesen) zu über 30% mehr fixiertem N pro Jahr. Da ein regional hoch aufgelöster Kleeanteil nur durch das Bestimmen im Feld verfügbar wäre, dürfte auch in Zukunft der genaue Kleeanteil unbekannt bleiben.

8.3 Fütterung

Das Abschätzen von Grünlanderträgen ist schwierig, jedoch von besonderer Bedeutung für die N- Bilanz. Die Grünlanderträge sind ein wichtiger Austrag von Nährstoffen und fliessen auch in die Berechnung der N-Fixierung ein. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ist ein robuster Ansatz zur Grünlandertrags-Abschätzung über den Grundfutterbedarf des Tierbestandes auf einem Betrieb. Leider fehlen uns Informationen zum Zu- und Verkauf von Grund- und Kraffutter auf Betriebsebene, was zu Fehlern in den betriebsspezifischen Ertragsabschätzungen führen kann. Auf der regionalen Ebene (z.B. Kantone) dürften sich Verschiebungen jedoch zum Teil ausgleichen. Netto-Verschiebungen zwischen Regionen können mit den heute zur Verfügung stehenden Daten nicht erfasst werden. Neben dem Einsatz von Grundfutter fehlen uns für das MAUS auch die Menge von verfüttertem Kraffutter. Diese Informationen würden helfen, um die Nährstoffausscheidungen von Milchkühen und ggf. weiteren Tieren zu präzisieren.

8.4 Stroh als Einstreu

In den MAUS-Nährstoffbilanzen wird das Stroh, welches als Einstreu verwendet wird, nicht berücksichtigt unter der Annahme, dass selbstproduzierte Nebenprodukte als Einstreu verwendet werden und somit die Bilanz nicht verändern. Jedoch gibt es Betriebe, die Stroh zu- und verkaufen und diese Informationen sind nicht vorhanden. In diesen Fällen kann das zugekaufte Stroh die betrieblichen Nährstoffbilanzen beeinflussen. Bei einer Aggregation auf höherer Stufe wird sich der Fehler teilweise ausgleichen. Problematisch sind Regionen, welche im Allgemeinen mehr Stroh importieren, wie z.B. Berggebiete. In diesen Regionen ist eine systematische Unterschätzung der Nährstoffbilanzen möglich.

8.5 Gemüse

In den georeferenzierten Nutzungsdaten sind die meisten Gemüsekulturen unter «Einjährige Freilandgemüse, ohne Konservengemüse» & «Freiland-Konservengemüse» zusammengefasst. Somit ist mit unserer Datengrundlage eine genaue Bestimmung der Gemüsekulturflächen nicht möglich. Dies erschwert zum einen die Abschätzung der Mineraldüngermengen sowie die Abschätzung der Ertragsmengen auf Betriebsebene. Aus diesen Gründen sind die Nährstoffbilanzen für Betriebe mit hoher Gemüseproduktion sehr ungenau.

8.6 Zwischenkulturen

Aktuell werden nur die Ackerhauptkulturen in der Berechnung der MAUS-Nährstoffbilanzen berücksichtigt. Da die georeferenzierten Nutzungsdaten die Zwischenkulturen nicht abbilden, werden diese auch nicht in die Berechnung einbezogen. Die Bewirtschaftung der Zwischenkulturen hat aber auch einen Einfluss auf die Nährstoffbilanzen eines Betriebes. Gewisse Zwischenkulturen werden mit mineralischem Dünger gedüngt und zusätzlich sind Zwischenkulturen vielfach Zwischenfutter mit Klee gras oder Leguminosen als Gründüngung, die viel Stickstoff fixieren. Eine Analyse der ZA-AUI-Betriebe über die Jahre 2009 bis 2021 zeigt, dass die AUI-Betriebe im Durchschnitt 1.2% der gesamten mineralischen N-Düngern auf Zwischenkulturen applizieren. Für das MAUS ist vorgesehen, in Zukunft mit Hilfe von Satellitenbildern Zwischenkulturen zu identifizieren.

9 Fazit

Die erste Berechnung der N-Bilanz im MAUS hat gezeigt, dass mit der bestehenden Datengrundlage und gewissen Limitationen regionalisierte Bilanzen berechnet werden können. Der Ansatz zur Berechnung im MAUS besteht darin, Bilanzen betriebsspezifisch zu berechnen und die Resultate auf regionaler Ebene zu aggregieren. Die Resultate zeigen deutliche regionale Unterschiede in den N-Bilanzen. Die grössten Unsicherheiten in der Berechnung liegen aktuell bei den N-Mineraldünger-Mengen, den Grünlanderträgen und der Stickstofffixierung der Graslandflächen, wobei bei letzterer vor allem der nicht bekannte Kleeanteil die Unsicherheit ausmacht. Eine Erhebung von Mineraldüngerkäufen auf Betriebsebene könnte die Unsicherheit der Resultate drastisch reduzieren.

Der Eintrag mit der grössten Unsicherheit in der Berechnung (mineralischer Dünger) zeigt auch die grösste Diskrepanz, wenn die auf die nationale Ebene aggregierten Resultate mit der nationalen OECD-Bilanz des BFS verglichen werden. Der MAUS-Ansatz resultiert in einem um 27% unterschätzten Mineraldüngereinsatz. Durch diese Diskrepanz zu den nationalen Zahlen gibt es auch grössere Unterschiede zwischen der kantonalen MAUS-Bilanz und der Regionalisierung der nationalen Bilanz durch das BFS (d.h. von nationalen Zahlen heruntergerechnet). Vergleicht man jedoch bei den beiden Ansätzen die prozentuale Verteilung der Ein- und Austräge auf die Kantone, zeigt sich in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung. Vereinzelt gibt es kantonale Werte, bei denen die Unterschiede gross sind, zum Beispiel beim Mineraldüngereinsatz im Kanton Genf.

In den nächsten Jahren wird die Methode zur Berechnung der N-Bilanz im MAUS kontinuierlich weiterentwickelt. So werden anhand zusätzlicher Daten(-erhebungen) (Satellitendaten, Daten aus Agrarsoftwaresystemen, Online-Umfragen) voraussichtlich weitere Datenlücken geschlossen. Ziel ist es, in den nächsten Jahren die Differenz zu den nationalen Werten der Ein- und Austräge zu verringern und die regionalen Unterschiede besser zu verstehen.

10 Danksagung

Diese Arbeit wurde von Agroscope und dem Bundesamt für Landwirtschaft finanziert. Wir danken Jérôme Schneuwly, Olivier Huguenin-Elie, Jochen Mayer, Reto Neuweiler, Patrick Schlegel, Pierluigi Calanca, Sonja Kay, Christof Carlen, Cédric Camps, Thomas Kuster und Jean-Laurent Spring von Agroscope für hilfreiche Diskussionen und Auskünfte zur Berechnung. Vom Bundesamt für Landwirtschaft haben Simon Peter, Philip Stevanon und Ruth Badertscher wertvolle Rückmeldungen zum Bericht geliefert. Des Weiteren bedanken wir uns herzlich bei Florian Kohler, Franz Murbach und Sara Hurschler vom Bundesamt für Statistik für die Zusammenarbeit, um die verschiedenen Bilanzierungsansätze zu vergleichen und den Bericht zu verbessern. Ein grosses Dankeschön geht auch an alle Personen und Organisationen, die Daten für unsere Berechnungen zur Verfügung gestellt haben: Erika Fässler (ehemalig BLW), Ryan Studer (BLW), Peter Schwegler (BLW), Manuel Kaufmann (Geowissensplattform Agroscope), Dierk Schmid (Agroscope), Svetlana Renner (Agroscope), Max Reich (qualitas), Thomas Kupper (HAFL), Christoph Häni (HAFL), Beat Rihm (meteotest), Thomas Schildknecht (Ingenieurbüro Schildknecht), Daniel Erdin (Agristat), Peter Imhof (Schweizer Zucker AG) und Thyda Sy (swisspatat).

11 Anhang

Tabelle A1: Mapping der Tierkategorien der AGIS-Datenbank zu den GRUD-Tierkategorien für die Berechnung der Nährstoffausscheidungen und des Raufutterverzehr

Tierkategorie - AGIS	Tierkategorie - GRUD
<i>Rindvieh und Wasserbüffel</i>	
Rindergattung und Wasserbüffel, Milchkühe	Milchkuh
Rindergattung und Wasserbüffel, Andere Kühe	Mutterkuh mittelschwere Rassen (600-700 kg)
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere 160-365 Tage alt, männlich	Aufzuchtrind unter 1-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere 160-365 Tage alt, weiblich	Aufzuchtrind unter 1-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere 365-730 Tage alt, männlich	Aufzuchtrind 1- bis 2-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere 365-730 Tage alt, weiblich	Aufzuchtrind 1- bis 2-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere bis 160 Tage alt, männlich	Mastkalb
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere bis 160 Tage alt, weiblich	Aufzuchtrind unter 1-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere über 730 Tage alt, männlich	Aufzuchtrind über 2-jährig
Rindergattung und Wasserbüffel, Tiere über 730 Tage alt, weiblich	Aufzuchtrind über 2-jährig
<i>Bisons, Hirsche, Alpakas und Lamas</i>	
Bisons über 900 Tage alt	Bison, über 3-jährig
Bisons unter 900 Tage alt	Bison, unter 3-jährig
Damhirsche jeden Alters	Damhirsche
Rothirsche jeden Alters	Rothirsch
Alpakas über 2-jährig	Alpaka, über 3-jährig
Alpakas unter 2-jährig	Alpaka, unter 3-jährig
Lamas über 2-jährig	Lama, über 3-jährig
Lamas unter 2-jährig	Lama, unter 3-jährig
<i>Pferdegattung</i>	
Pferdegattung: Fohlen bis 180 Tage alt, Widerristhöhe ab 148 cm	<i>Sind bei den Muttertieren inkludiert</i>
Pferdegattung: Fohlen bis 180 Tage alt, Widerristhöhe bis 148 cm	<i>Sind bei den Muttertieren inkludiert</i>
Pferdegattung: Hengste über 900 Tage alt, Widerristhöhe ab 148 cm	Andere Pferde über 3-jährig
Pferdegattung: Jungtiere über 180 Tage bis 900 Tage alt, Widerristhöhe ab 148 cm	Fohlen 0.5- bis 3-jährig
Pferdegattung: Jungtiere über 180 Tage bis 900 Tage alt, Widerristhöhe bis 148 cm	Ponys, Kleinpferde, Esel (jeden Alters)
Pferdegattung: weibliche und kastrierte männliche Tiere, über 900 Tage alt, Widerristhöhe ab 148 cm	Andere Pferde über 3-jährig
Pferdegattung: weibliche und kastrierte männliche Tiere, über 900 Tage alt, Widerristhöhe bis 148 cm	Ponys, Kleinpferde, Esel (jeden Alters)
<i>Schafe und Ziegen</i>	
Ziegen gemolken	Ziegen
Ziegenböcke über 1-jährig	Ziegen
Andere weibliche Ziegen über 1-jährig	Ziegen

Tierkategorie - AGIS	Tierkategorie - GRUD
Zwergziegen über 1-jährig, Nutztierhaltung (grössere Bestände zu Erwerbszwecken)	Ziegen
Zwergziegen unter 1-jährig, Nutztierhaltung (grössere Bestände zu Erwerbszwecken)	Ziegen
Zwergziegen zu Nicht-Erwerbszwecken	Ziegen
Widder über 1-jährig	Schaf
Schafe gemolken	Milchschaf
Andere weibliche Schafe über 1-jährig	Schafe
Jungschafe unter 1-jährig (in den Faktoren der weiblichen Tiere eingerechnet)	
Jungziegen unter 1-jährig (im Faktor des weiblichen Tieres eingerechnet)	
Weidelämmer (Mast unter 0.5-jährig), welche nicht den Muttertieren anzurechnen sind (ganzjährige Weidelämmermast)	Weidemastlamm, Weidemastgitzi
<i>Schweine</i>	
Remonten und Mastschweine (ca. 3 Umtriebe pro Platz)	Mastschwein/Remonte
Wollschweine	Zuchtschwein
Säugende Zuchtsauen	Säugende Zuchtsau
Mini-Pigs	
Nicht säugende Zuchtsauen über 6 Monate alt (ca. 3 Umtriebe pro Platz)	Galtsau
Saugferkel (im Faktor der Mutter eingerechnet)	
Abgesetzte Ferkel	Abgesetzte Ferkel
Zuchteber	Eber
<i>Geflügel</i>	
Zuchthennen und Zuchthähne (Bruteierproduktion für Legelinien)	Legehennen
Zuchthennen und Zuchthähne (Bruteierproduktion für Mastlinien)	Legehennen
Legehennen	Legehennen
Junghennen, Junghähne und Küken (ohne Mastpoulets)	Junghennen
Mastpoulets jeden Alters	Mastpoulets
Truten jeden Alters (ca. 3 Umtriebe pro Platz)	Masttruten
Trutenausmast	Masttruten
Trutenvormast (ca. 6 Umtriebe pro Jahr)	Masttruten
Emus	Anderes Geflügel
Enten (ohne Zierenten)	Enten
Gänse	Anderes Geflügel
Perlhühner	Anderes Geflügel
Übriges Geflügel (Rebhühner, Pfauen, Fasane, usw.)	Anderes Geflügel
Wachteln	Wachteln
Strausse älter als 13 Monate	Strauss, älter als 13 Monate
Strausse bis 13 Monate	Strauss, jünger als 13 Monate
Zierenten	Enten
<i>Weitere Tierkategorien</i>	

Tierkategorie - AGIS	Tierkategorie - GRUD
Kaninchen, Jungtiere	Kaninchen: Jungtiere ab ca. 35 Tagen
Kaninchen, Produzierende Zibben	Kaninchen: Zibbe inkl. Jungtiere bis 35 Tage
Andere Kaninchen	Kaninchen: Zibbe inkl. Jungtiere bis 35 Tage
Hundezucht	
Pelztiere aller Art (Nerz)	
Andere Tiere	
Übrige Nutztiere	

Tabelle A2: Mapping der verwendeten Kulturen im ZA-AUI auf die Kulturgruppen im MAUS für das Berechnen der Kulturgruppen-spezifischen mineralischen N-Düngemengen.

Kultur ZA-AUI	Kulturgruppe MAUS
Dauerweide extensiv	Grünland extensiv
Naturwiese extensiv	Grünland extensiv
Uferwiese entlang von Fliessgewässern	Grünland extensiv
Waldweide	Grünland extensiv
Kunstwiese/Mähweide extensiv	Grünland extensiv
Dauerweide wenig intensiv	Grünland wenig intensiv
Kunstwiese/Mähweide wenig intensiv	Grünland wenig intensiv
Naturwiese wenig intensiv	Grünland wenig intensiv
Kunstwiese/Mähweide intensiv	Grünland intensiv
Kunstwiese/Mähweide mittelintensiv	Grünland intensiv
Weiden für Schweine	Grünland intensiv
Naturwiese/Mähweide mittelintensiv	Grünland intensiv
Naturwiese/Mähweide intensiv	Grünland intensiv
Dauerweide mittelintensiv	Grünland intensiv
Dauerweide intensiv	Grünland intensiv
Futterweizen	Weizen
Sommerweizen	Weizen
Winterweizen	Weizen
Sommertriticale	Triticale
Wintertriticale	Triticale
Sommergerste	Gerste
Wintergerste	Gerste
Dinkel (Winterkorn)	Dinkel
Winterroggen (Hybridsorten)	Roggen
Winterroggen (Populationsorten)	Roggen
Winterhafer	Hafer
Sommerhafer	Hafer
Sorghum	Anderes Getreide
Winteremmer/-einkorn	Anderes Getreide
Getreide siliert mit Leguminosen	Anderes Getreide
Getreide siliert	Anderes Getreide
Quinoa	Anderes Getreide
Reis	Anderes Getreide
Buchweizen	Anderes Getreide
Hirse	Anderes Getreide
Körnermais	Mais
Saatmais	Mais
Lieschkolbenschrot	Mais
Feuchtkörnermais	Mais
CCM	Mais
Grünmais	Mais
Silomais	Mais
Winterackerbohnen	Leguminosen

Kultur ZA-AUI	Kulturgruppe MAUS
Sommerackerbohnen	Leguminosen
Nicht aufgef. Kultur, Leguminosen	Leguminosen
Eiweisserbsen	Leguminosen
Sommereiweisserbsen	Leguminosen
Wintereiweisserbsen	Leguminosen
Süsslupinen	Leguminosen
Soja	Leguminosen
Speisekartoffeln	Kartoffeln
Industriekartoffeln	Kartoffeln
Frühkartoffeln	Kartoffeln
Futterkartoffeln	Kartoffeln
Saatkartoffeln	Kartoffeln
Futterrüben	Rüben
Zuckerrüben	Rüben
Kernenkürbis	Ölfrucht
Ölhanf	Ölfrucht
Faserhanf	Ölfrucht
Sommerlein (Fasergew.)	Ölfrucht
Winterlein (Fasergewinn.)	Ölfrucht
Winterlein (Ölgewinn.)	Ölfrucht
Sommerlein (Ölgewinn.)	Ölfrucht
Sommerraps für Speiseöl	Ölfrucht
Winterraps für Speiseöl	Ölfrucht
Sonnenblumen für Speiseöl	Ölfrucht
Zuckerhut	Freilandgemüse
Zwiebeln	Freilandgemüse
Zuckermais	Freilandgemüse
Spinat	Freilandgemüse
Bohnen	Freilandgemüse
Blumenkohl	Freilandgemüse
Broccoli	Freilandgemüse
Cicorino rosso	Freilandgemüse
Erbsen	Freilandgemüse
Essiggurken	Freilandgemüse
Kabis	Freilandgemüse
Karotten	Freilandgemüse
Kohlrabi	Freilandgemüse
Lauch	Freilandgemüse
Rosenkohl	Freilandgemüse
Salate	Freilandgemüse
Schalotten	Freilandgemüse
Schnittzichorie	Freilandgemüse
Sellerie	Freilandgemüse
Rüben	Freilandgemüse
Petersilie	Freilandgemüse

Kultur ZA-AUI	Kulturgruppe MAUS
Heil-, Gewürzpflanzen (mehrj.)	Freilandgemüse
Kürbis	Freilandgemüse
Pilze	Freilandgemüse
Rhabarber	Freilandgemüse
Spargel	Freilandgemüse
Cichorien, Treib-	Freilandgemüse
Aubergine	Freilandgemüse
Bodenkohlrabi	Freilandgemüse
Chinakohl	Freilandgemüse
Endivie	Freilandgemüse
Kefen	Freilandgemüse
Fenchel	Freilandgemüse
Gurken	Freilandgemüse
Krautstiel	Freilandgemüse
Kräuter	Freilandgemüse
Melone	Freilandgemüse
Nüsslisalat, Feldsalat	Freilandgemüse
Radies	Freilandgemüse
Randen	Freilandgemüse
Rettich	Freilandgemüse
Schnittlauch	Freilandgemüse
Schwarzwurzel	Freilandgemüse
Tomaten	Freilandgemüse
Wirz	Freilandgemüse
Zucchetti, Patisson	Freilandgemüse
Pastinaken	Freilandgemüse
Topinambur	Freilandgemüse
Artischocken	Freilandgemüse
Kardy	Freilandgemüse
Cima di rapa	Freilandgemüse
Federkohl	Freilandgemüse
Knoblauch	Freilandgemüse
Äpfel	Kernobst
Birnen	Kernobst
Kernobst	Kernobst
Quitten	Kernobst
Aprikosen	Steinobst
Zwetschgen/Pflaumen	Steinobst
Kirschen	Steinobst
Pfirsiche	Steinobst
Reben	Reben
Weinreben / Tafeltrauben	Reben
Brombeeren	Beeren
Himbeeren	Beeren
Erdbeeren	Beeren

Kultur ZA-AUI	Kulturgruppe MAUS
Alternative Strauchbeeren	Beeren
Heidelbeeren	Beeren
Übrige Strauchbeeren	Beeren
Johannisbeeren	Beeren
Minikiwi	Beeren
Stachelbeeren	Beeren
Holunder	Beeren
Nashi	Beeren
Jostabeere	Beeren
Gojibeere	Beeren
Tabak Burley	Tabak
Tabak Virginia	Tabak
Baumschulen	Andere Nutzung
Löwenzahn	Andere Nutzung
Walnuss	Andere Nutzung
Christbäume	Andere Nutzung
Grassamenproduktion	Andere Nutzung
Hopfen	Andere Nutzung

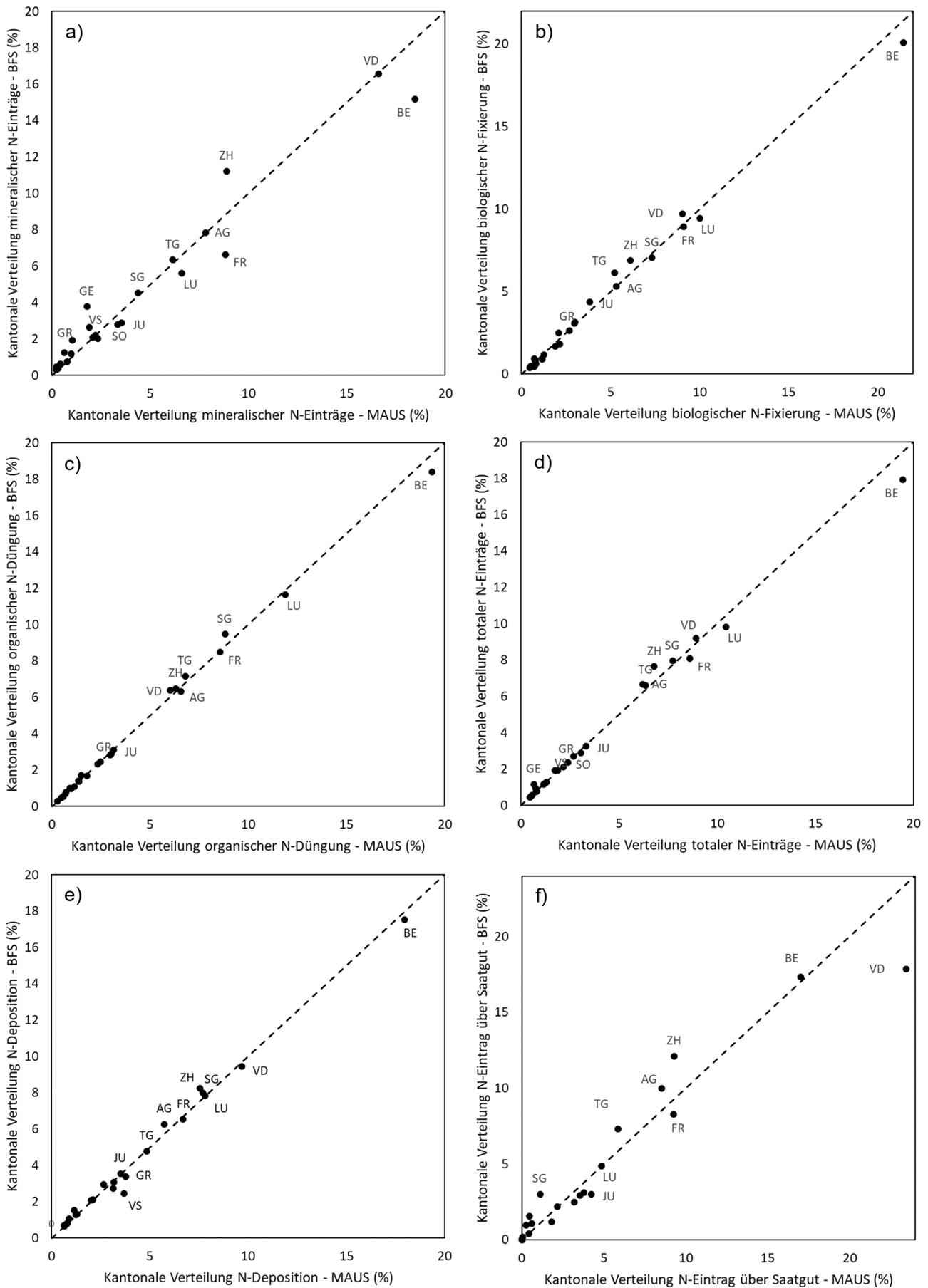


Abbildung A 1: Vergleich der kantonalen Verteilung der verschiedenen N-Einträge zwischen der MAUS-N-Bilanz und der BFS-Regionalisierung.

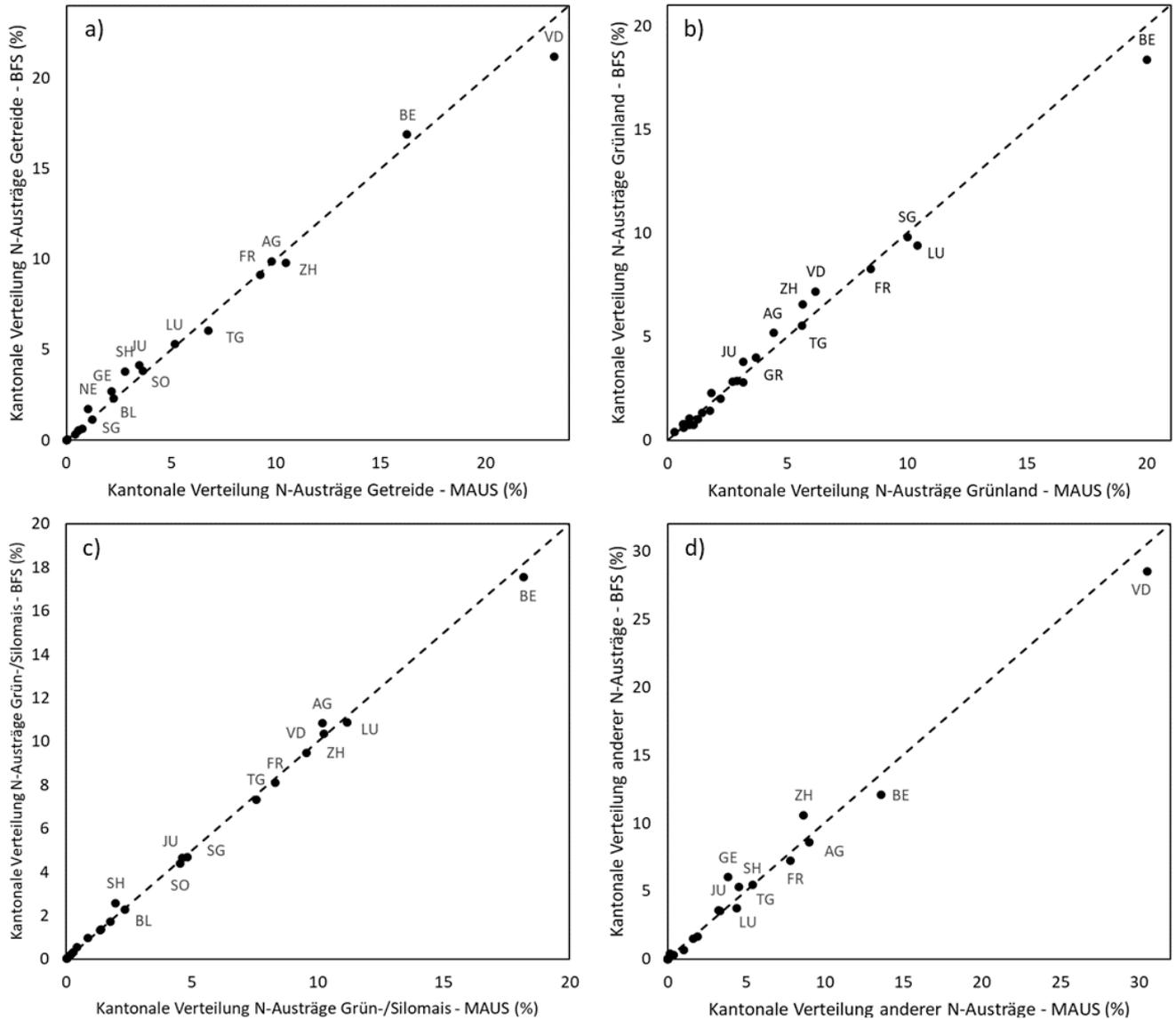


Abbildung A 2: Vergleich der kantonalen Verteilung der N-Austräge über Getreide (a), Grünland (b), Grün- und Silomais (c) und anderer Austräge (wie z. B. Ölfrüchte und Nebenprodukte; d) zwischen der MAUS-N-Bilanz und der BFS-Regionalisierung.

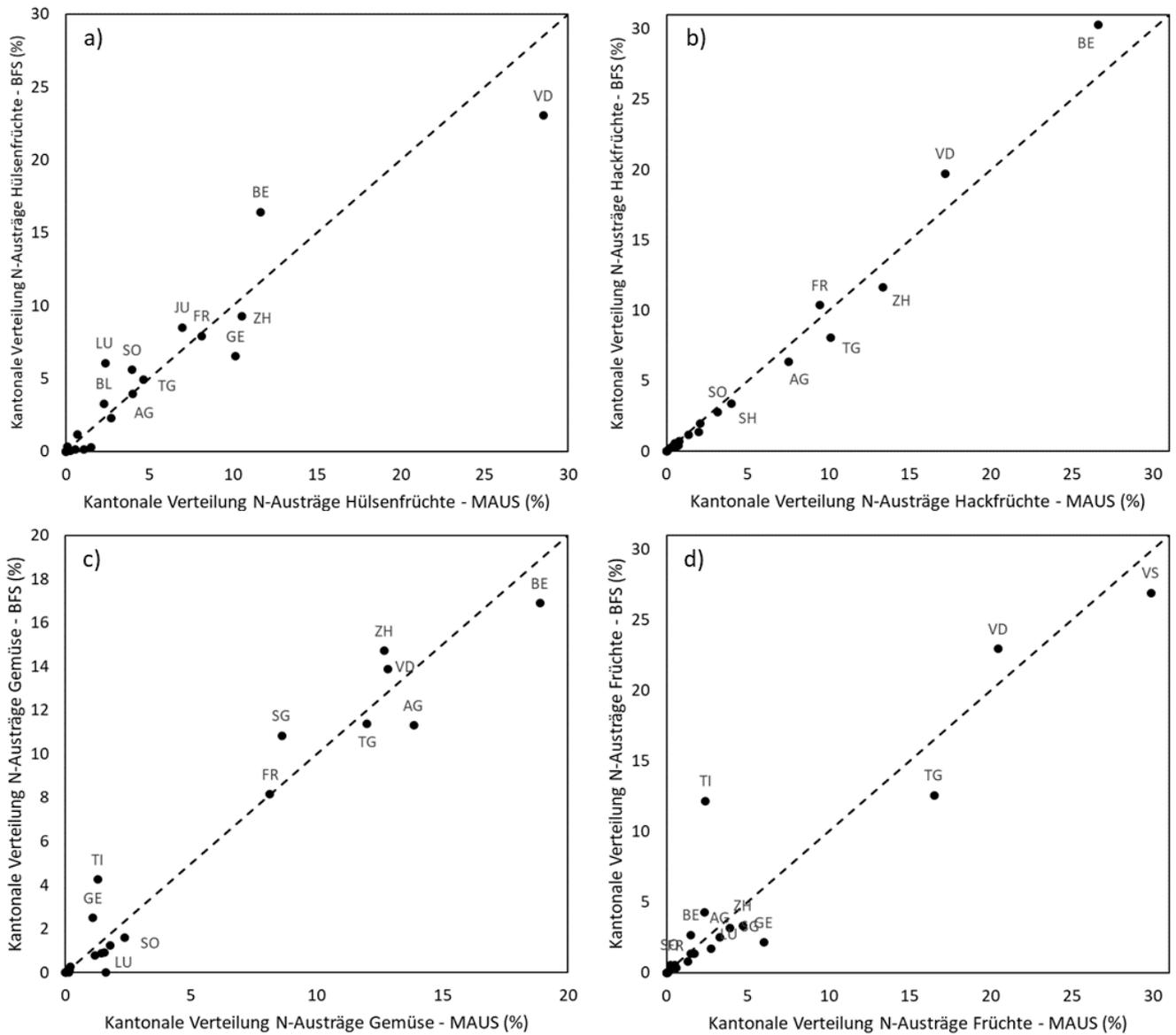


Abbildung A 3: Vergleich der kantonalen Verteilung der N-Austräge über Hülsenfrüchte (a), Hackfrüchte (b), Gemüse (c) und Früchte (Obst, Reben und Beeren; d) zwischen der MAUS-N-Bilanz und der BFS-Regionalisierung.

12 Literaturverzeichnis

- Agroscope. (2016). Schweizerische Futtermitteldatenbank.
- BFS. (2023). «Landwirtschaft», <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/land-forstwirtschaft/landwirtschaft.html>, letzter Aufruf: 25.08.2023
- Braun, M., Hurni, P., & Spiess, E. (1994). Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Paralandwirtschaft. *Schriftenreihe der FAC Liebefeld Nr. 18*, 70 pp.
- Eurostat. (2013). *Nutrient Budgets – Methodology and Handbook*. Version 1.02. Eurostat and OECD, Luxembourg.
- 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.
- Hiemstra, P., Pebesma, E., Twenhöfel, C., & Heuvelink, G. (2008). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch Radioactivity Monitoring Network. *Computers & Geosciences* 35. 1711-1721.
- Huguenin-Elie, O., Mosimann, E., Schlegel, P., Lüscher, A., Kessler, W., & Jeangros, B. (2017). 9/ Düngung von Grasland (GRUD). *Agrarforschung Schweiz* 8, (6), 1-22.
- Keuter, A., Veldkamp, E., & Core, M. D. (2014). Asymbiotic biological nitrogen fixation in a temperate grassland as affected by management practices. *Soil Biology and Biochemistry* 70, 38-46.
- Kupper, T., Bonjour, C., Menzi, H., Bretscher, D., & Zaucker, F. (2018). Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990-2015.
- Kupper, T., Häni, C., Bretscher, D., & Zaucker, F. (2022). Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020.
- Lutz, E., Blom, J. F., Schneuwly, J., & de Baan, L. (2023). Analyse zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz. *Agroscope Science*, 173.
- Meteotest. (2023). Stickstoffdeposition auf Landwirtschaftsflächen 1990-2020; Herausrechnen der landwirtschaftlichen Quellen für die Bilanzierung nach der OSPAR-Methode. Meteotest, Bern, Technischer Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft.
- Möhring, A. (2023). Analyse des Hofdüngermarktes in der Schweiz. *Agroscope Science*, 146.
- Miljøstyrelsen. (2021). Bekæmpelsesmiddelstatistik 2019. Behandlingshyppighed og pesticidbelastning baseret på salg og forbrug. Orientering fra Miljøstyrelsen.
- Nucera, E., Huguenin-Elie, O., Mayer, J., Liebisch, F., & Spiess, E. (2023). Method for estimating nitrogen input by symbiotic fixation on Swiss farms. *Agroscope Science* 164. 1-49.
- 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.
- OFS. (2023). Calcul pilote de régionalisation des bilans N et P aux niveaux des cantons et des régions agricoles – Rapport à l'attention de l'OFAG.
- OSPAR. (1995). PARCOM guidelines for calculating mineral balances. Summary record of the meeting of the programmes and measures committee (PRAM), Oviedo, 20–24 February 1995. Oslo and Paris Conventions for the Prevention of Marine Pollution (OSPAR), Annexe 15.
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science* 326. 123-5.
- Richner, W., Bosshard, C., & Spiess, E. (2015). Forschungsauftrag «Folgearbeiten des Mandats zur Überprüfung der Methode Suisse-Bilanz»: Schlussbericht.

- Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähler, M., & Menzi, H. (2017). 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6). 1-24.
- Richner, W., & Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Rihm, B., & Künzle, T. (2019). Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Meteotest, Bern, commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN).
- Rihm, B., & Künzle, T. (2023). Nitrogen deposition and exceedances of critical loads for nitrogen in Switzerland. Meteotest, Bern, commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN).
- Spiess, E., & Liebisch, F. (2020). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. *Agroscope Science*, 100.
- Spiess, E., & Liebisch, F. (2022). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre bis 2020. *Agroscope Science*, 149.