

N-Düngereinsparungen mittels der korrigierten Normen: Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO₂ncept

Elisabeth Tanner, Frank Liebisch und Daniel Bretscher
Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Frank Liebisch, E-Mail: frank.liebisch@agroscope.admin.ch

DOI: <https://doi.org/10.34776/afs15-304g> Publikationstermin: 16. Dezember 2024



Betriebe mit Stickstoff-Einsparpotenzialen könnten die betrieblichen Treibhausgas-Emissionen durch den Verzicht auf Mineraldünger senken. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

Zusammenfassung

Das Ziel der Netto-Null-Emissionen bis 2050 erfordert eine Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in allen Sektoren, inklusive der Schweizer Landwirtschaft. Ein Ansatz dazu ist die Optimierung der Stickstoff(N)-Düngung mittels der Methode der korrigierten Normen (korrNorm). Durch die Berücksichtigung von Boden-, Klima- und Anbaubedingungen mittels Korrekturfaktoren wird die N-Düngungsnorm auf den Pflanzenbedarf abgestimmt, wodurch N-Überschüsse und damit verbundene THG-Emissionen vermieden werden sollen. Die korrNorm wurde im Zuge des Ressourcenprojekts AgroCO₂ncept über einen Zeitraum von vier Jahren (2018–2021) in einer Ex-post-Analyse auf elf Betriebe im Zürcher Flaachtal angewendet und mit der N-Düngungsnorm sowie der betrieblichen

Düngepraxis verglichen. Je nach aktueller Düngepraxis wären bei einer Anwendung der korrNorm sowohl realisierbare N-Einsparungen zwischen $-7,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ bis $-75,1 \text{ kg N ha}^{-1}$ in zwölf Betriebsjahren, als auch ein erhöhter Düngebedarf zwischen $+1,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ bis $+56,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ in 14 Betriebsjahren zu verzeichnen. Eine Umstellung der Düngepraxis auf die korrNorm würde also nicht in allen Fällen zu THG-Emissionsminderungen führen. Nichtsdestotrotz liefert die korrNorm wertvolle Erkenntnisse für die Düngeplanung auf Betriebs- und Parzellenebene und unterstreicht die Bedeutung betriebspezifischer Massnahmen zum Klimaschutz.

Key words: *location adapted, N-fertilization, GHG emissions.*

Einleitung

Das 2019 vom Bundesrat beschlossene Netto-Null-Ziel bis 2050 erfordert eine umfassende Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in allen Sektoren (Schweizerischer Bundesrat, 2021). Dies betrifft somit auch die Schweizer Landwirtschaft, welche rund 14 % zu den gesamtschweizerischen THG-Emissionen beiträgt (FOEN, 2024). Bereits im Jahr 2012 haben sich 24 Landwirte und Landwirtinnen aus dem Flaachtal im Kanton Zürich zum Verein AgroCO₂ncept zusammengeschlossen, mit dem Ziel, klimaschonende und ressourceneffiziente landwirtschaftliche Praktiken aufzuzeigen und umzusetzen (Thiébaud *et al.*, 2023). Seit 2016 wird im Rahmen eines Ressourcenprojekts die Zielformel «20/20/20» verfolgt. Diese beinhaltet:

- eine Reduktion der THG-Emissionen um 20 % durch Ressourceneinsparungen, CO₂-Speicherung sowie der Erzeugung erneuerbarer Energien;
- eine Kostenreduktion um 20 % durch Effizienzsteigerungen und Nutzung von Synergien in der Produktion;
- eine Zunahme um 20 % der Wertschöpfung durch Wissenserwerb und -transfer, sowie dem Imagegewinn durch den Verkauf klimaschonender Produkte für die Beteiligten und die Region (Thiébaud *et al.*, 2023; Verein AgroCO₂ncept, 2023).

Um diese Ziele zu erreichen, wurden für die teilnehmenden Betriebe individuelle Massnahmenkataloge aus 39 Einzelmassnahmen formuliert.

Eine zentrale Massnahme dabei ist die Optimierung der Düngung in Form und Menge zur besseren Berücksichtigung des Pflanzenbedarfs und zur Reduktion des Düngemittel- und Maschineneinsatzes (Thiébaud *et al.*,

2023). Die Stickstoff(N)-Düngung ist für rund 18 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen verantwortlich und stellt damit nach der Futterverdauung von Nutztieren die zweitgrösste landwirtschaftliche THG-Quelle dar (BLW, 2023). In den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD, Sinaj and Richner (2017) wird die Methode der korrigierten Normen (korrNorm) als eine der beiden empfohlenen Methoden der standortangepassten N-Düngung beschrieben.

Die korrNorm zielt darauf ab, die benötigte N-Dünger Menge parzellenspezifisch durch die Berücksichtigung der lokalen Boden-, Klima- und Anbaubedingungen zu ermitteln und dem Pflanzenbedarf anzupassen. Verschiedene wissenschaftliche Kleinparzellen-Versuche in der Schweiz haben bereits erwiesen, dass die korrNorm eine Reduktion der N-Düngung bei gleichbleibenden Erträgen ermöglicht (Grossrieder *et al.*, 2022; Maltas *et al.*, 2015). Somit können N-Überschüsse vermieden und die N-Effizienz erhöht werden, was dazu beiträgt, den Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Produktivität zu entschärfen (Grossrieder *et al.*, 2022). Im internationalen Vergleich entspricht die Methode dem fachlichen Standard und benutzt ähnliche Grundlagen wie andere mitteleuropäische Länder (Jordan-Meille *et al.*, 2023). Zusätzlich zeichnet sich die korrNorm im Vergleich zu anderen Methoden der standortangepassten N-Düngung, bspw. der N_{min}-Methode, durch einen verhältnismässig geringen Zeitaufwand und niedrige Kosten aus (Grossrieder *et al.*, 2022). Dies liegt daran, dass für die Berechnung der korrNorm Feldkalenderdaten und Bodenprobenresultate verwendet werden, die auf einem Grossteil der schweizerischen Landwirtschaftsbetriebe

Tab. 1 | Übersicht über die Betriebe.

| Betriebsnummer | Bewirtschaftung | Betriebszweige | | | Düngbare Fläche | | | | Viehbestand | |
|----------------|-----------------|----------------|----------|-----------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| | | | | | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | | |
| | | Haupt- | Neben- | Neben- | ha | ha | ha | ha | GVE | GVE ha ⁻¹ (d) |
| 1 | ÖLN | Mutterkuh | Grünland | Wald | 27,7 ^(c) | 27,6 | 30,8 | – ^(a) | 29,9 | 1,0 |
| 2 | ÖLN | Milchvieh | Grünland | Streuobst | – ^(a) | 43,6 ^(c) | 43,5 | – ^(a) | 60,9 | 1,4 |
| 3 | Bio | Ackerbau | Grünland | Streuobst | 31,4 ^(c) | 31,4 | 30,6 | 30,6 ^(b) | 0,0 | 0,0 |
| 8 | ÖLN | Ackerbau | Obstbau | – | 9,8 ^(c) | 9,8 | 12,2 | 8,6 ^(b) | 0,1 | 0,0 |
| 9 | ÖLN | Rindermast | Ackerbau | Wald | – ^(a) | 41,5 ^(c) | 41,5 | – ^(a) | 30,1 | 0,7 |
| 11 | ÖLN | Rindermast | Ackerbau | Grünland | – ^(a) | – ^(a) | 65,8 | – ^(a) | 121,2 | 1,8 |
| 13 | ÖLN | Milchvieh | Ackerbau | – | 39,1 ^(c) | 39,1 | 45,4 | 45,4 ^(b) | 70,1 | 1,6 |
| 14 | Bio | Ackerbau | Grünland | Mutterkuh | – ^(a) | 26,1 ^(c) | 26,5 | 28 ^(b) | 11,4 | 0,4 |
| 15 | ÖLN | Milchvieh | Ackerbau | Obstbau | – ^(a) | 27,2 | 27,0 | – ^(a) | 52,9 | 1,9 |
| 17 | ÖLN | Milchvieh | Ackerbau | – | – ^(a) | 32,2 ^(c) | 63,8 | 68,6 ^(b) | 87,5 | 1,5 |
| 18 | ÖLN | Milchvieh | Ackerbau | – | 61,7 ^(c) | 66,8 | 55,9 | – ^(a) | 86,7 | 1,4 |
| Total | – | – | – | – | 169,7 | 345,4 | 443,1 | 181,2 | 550,8 | – |

^(a) keine Daten verfügbar, ^(b) keine Informationen zur ausgebrachten Düngermenge verfügbar, ^(c) keine Nachwirkung der ausgebrachten organischen Dünger aus dem Vorjahr verfügbar,

^(d) gerechnet mit dem Durchschnitt der düngbaren Fläche über die hier berücksichtigten Jahre.

bereits für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) dokumentiert werden. Trotz dieser Vorteile wird die korrNorm in der landwirtschaftlichen Praxis jedoch nicht konsequent angewendet, insbesondere aufgrund der begrenzten Erkenntnisse zur Anwendbarkeit und Effektivität auf Betriebsebene. Das wissenschaftlich begleitete Ressourcenprojekt AgroCO₂ncept bot daher einen geeigneten Rahmen, um die Anwendung der korrNorm in der betrieblichen Praxis zu testen und zu evaluieren, indem die potenziellen N- und THG-Einsparungen für die beteiligten Betriebe im AgroCO₂ncept-Projekt ermittelt wurden.

Material und Methode

Betriebe

Von den 24 im Projekt AgroCO₂ncept beteiligten Betrieben wurden die Daten von elf Betrieben über einen Zeitraum von vier Jahren (2018–2021) ausgewertet. Nicht für alle Betriebe waren in jedem Jahr vollständige Daten verfügbar. In Folge dessen wurden 31 Betriebsjahre analysiert (Tab. 1). Die Betriebe repräsentieren typische Betriebstypen der Region, darunter fünf Betriebe mit Hauptbetriebszweig Milchviehhaltung, drei mit Ackerbau, zwei mit Rindermast und ein Betrieb mit Mutterkuhhaltung. Alle Betriebe erfüllen den ÖLN und zwei Betriebe bewirtschaften zusätzlich nach den Richtlinien von *Bio Suisse*. Zwei der Betriebe haben kein Vieh (0 bzw. 0,1 GVE), während die übrigen neun Betriebe einen Viehbestand zwischen 11,4 und 121,0 GVE aufwiesen. Die düngbare Fläche der einzelnen Betriebe variierte zwischen 8,6 ha bis 68,6 ha. Die flächenmässig am stärksten vertretenen Kulturen waren Grünland, (Silo) Mais (*Zea mays*), (Winter-) Weizen (*Triticum aestivum*) und Zuckerrüben (*Beta vulgaris*).

Von den insgesamt rund 1139 ha an analysierter Fläche (Summe über alle Jahre) waren für rund 982 ha (86 %) Bodenprobenresultate (ÖLN-Beprobungen) mit Informationen zum Gehalt an organischer Substanz (OS) und Ton verfügbar. Der Gehalt an OS im Boden lag dabei bei durchschnittlich 3,1 +/- 0,7 % und der Tongehalt bei durchschnittlich 22,5 +/- 5,2 %.

Methode der korrigierten Norm

Die Methode zur Berechnung der N-Düngemenge gemäss der korrNorm basiert auf dem Modell beschrieben in Sinaj and Richner (2017). Dieses Modell passt die kulturspezifische N-Düngungsnorm, welche für einen durchschnittlichen Ertrag (den sogenannten Referenzertrag) unter durchschnittlichen Bedingungen in der Schweiz kalibriert ist, an spezifische Standort- und

Betriebsbedingungen an. Die Anpassung erfolgt durch Korrekturfaktoren, die die Boden-, Klima- und Anbaubedingungen widerspiegeln (Formel 1). Die korrNorm setzt voraus, dass die einzelnen Korrekturfaktoren additiv sind und keine Interaktionen zwischen ihnen bestehen. Die Summe der Korrekturfaktoren ergibt die N-Korrektur.

Formel 1 | Berechnung der N-Düngeempfehlung nach korrigierter Norm.

$$N_{\text{korrNorm}} = N_{\text{Norm}} + f_{\text{Ertrag}} + f_{\text{OSB}} + f_{\text{VF}} + f_{\text{NOD}} + f_{\text{Regen}} + f_{\text{Hacken}} + f_{\text{Fr}}$$

| | |
|---------------------|---|
| f_{Ertrag} | passt die N-Düngermenge bei einer Abweichung der Ertragsersparungen vom Referenzertrag an. |
| f_{OSB} | berücksichtigt die N-Nachlieferung durch die Mineralisierung der OS im Boden in Abhängigkeit des Gehaltes an OS und Ton im Boden. |
| f_{VF} | bezeichnet den Einfluss der Vorfrucht (Vorkultur und Zwischenkultur) und des Einarbeitungszeitpunktes auf die N-Mineralisierung der Ernterückstände. |
| f_{NOD} | quantifiziert den Anteil des in organischen Düngern enthaltenen N aus dem Vorjahr, der im Jahr nach der Ausbringung pflanzenverfügbar wird. |
| f_{Regen} | berücksichtigt N-Verluste durch Auswaschung während des Winters und Frühjahres. Für die Kategorisierung der Winter- und Frühlingniederschläge (für f_{Regen}) in wenig (< 60 mm), normal (60–90 mm) und viel (> 90 mm) wurde der Mittelwert der Messstationen Winterthur Wülflingen und Uhwiesen verwendet, basierend auf Daten von agrometeo.ch. |
| f_{Hacken} | reflektiert die Auswirkungen von (mehrmaligem) Hacken auf die Mineralisierung der OS. |
| f_{Fr} | bezieht sich auf die Auswirkungen der Witterungsbedingungen im Frühling (Feuchtigkeit und Temperatur) auf die Mineralisierung der OS und die N-Verfügbarkeit. Für die vorliegende Analyse wurde der Faktor $f_{\text{Frühling}}$ nicht berücksichtigt, da zu diesem Zeitpunkt keine validierten Kriterien zur Beschreibung der Witterungsbedingungen verfügbar waren. |

Auf der Grundlage der N-Korrektur durch die korrNorm lassen sich zwei Potenziale zur Einsparung von N ableiten. Das theoretische N-Einsparpotenzial wird durch den Vergleich der nach korrNorm berechneten N-Düngemenge mit der N-Düngungsnorm bestimmt und widerspiegelt den Effekt der Anpassung an den Standort und das Management (Formel 2).

Formel 2 | Theoretisches N-Einsparpotenzial

$$\Delta N_{\text{theoretisch}} = N_{\text{korrNorm}} - N_{\text{Norm}}$$

Das realisierbare N-Einsparpotenzial hingegen ergibt sich aus dem Vergleich der nach korrNorm berechneten N-Düngemenge mit der tatsächlich ausgebrachten N-Düngemenge (Formel 3). Das realisierbare N-Einsparpotenzial bietet somit eine Möglichkeit zur Ex-post-Analyse der Düngepraxis eines Betriebes bzw. zur Abschätzung des Effektes einer Umstellung auf die korrNorm.

Formel 3 | Realisierbares N-Einsparpotenzial

$$\Delta N_{\text{realisierbar}} = N_{\text{korrNorm}} - N_{\text{ausgebracht}}$$

THG-Reduktionspotenziale

Eine potenzielle N-Einsparung kann zu einer Verringerung der THG-Emissionen beitragen. Einerseits sinkt der Bedarf an N-Dünger, wodurch THG-Emissionen bei der Herstellung, insbesondere von mineralischem Dünger, vermieden werden. Andererseits führen geringere Men-

gen an ausgebrachtem Dünger zu einer Reduktion der direkten und indirekten N₂O-Emissionen während und nach der Ausbringung, da weniger überschüssiger N für mikrobielle Umwandlungen (Nitrifikation, Denitrifikation), bei welchen N₂O entsteht, zur Verfügung steht (Graham *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021). Dies gilt sowohl für mineralische als auch organische Dünger.

Um das Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen durch die Anwendung der korrNorm für die analysierten elf Betriebe grob abzuschätzen, wurde vereinfacht angenommen, dass N in Form von synthetischen Düngern eingespart würde. Für die im Zuge der Produktion der synthetischen Dünger anfallenden THG-Emissionen wurde ein Wert von rund 3 t CO₂-Äquivalenten pro t N angenommen (Hoxha & Christensen, 2019; Yara, 2023). Zur Abschätzung der THG-Emissionen während und nach der Düngemittel-Ausbringung wurde der methodische Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2019) angewendet. Dieser wird bereits heute für das Schweizerische Treibhausgasinventar verwendet (FOEN, 2024). Dabei werden die N₂O-Emissionen auf Basis von Emissionsfaktoren berechnet, die die freigesetzte Menge an N₂O in Relation zur ausgebrachten N-Menge bestimmen (Formel 4). Dies umfasst sowohl die direkten N₂O-Emissionen aus den N-Inputs als auch die indirekten N₂O-Emissionen. Letztere entstehen, wenn N aus Düngemitteln zu Ammoniak (NH₃) oder Stickoxiden (NO_x) verflüchtigt wird und anschliessend wieder deponiert wird. Zudem können indirekte N₂O-Emissionen auch entstehen, wenn N durch Auswaschung und Oberflächenabfluss in die Böden gelangt und anschliessend zu N₂O umgewandelt wird.

Formel 4 | Faktor für die Berechnung der direkten und indirekten N₂O-Emissionen in CO₂-Äquivalenten nach der Ausbringung von synthetischen Düngern.

$$F_{\text{Ausbringung, Syn}} = (EF_1 + (\text{Frac}_{\text{GASF}} * EF_4) + (\text{Frac}_{\text{LEACH}} * EF_5)) * \frac{44}{28} * GWP_{\text{N}_2\text{O}}$$

$$= 5,6833 \text{ kg CO}_2\text{eq pro kg N}$$

Wobei:

- EF_1 = Emissionsfaktor für N₂O-Emissionen aus N-Inputs (direkte Emissionen)
= 0,01 kg N₂O (kg N-Input)⁻¹, Standardwert gemäss IPCC (2019)
- $\text{Frac}_{\text{GASF}}$ = Anteil des synthetischen Düngers, welcher sich als NH₃ und/oder NO_x volatilisiert (indirekte Emissionen)
= 0,064 (kg NH₃-N + NO_x-N (kg N appliziert)⁻¹, Schweiz-spezifischer Wert gemäss dem Nationalen Treibhausgasinventar (FOEN, 2024)
- EF_4 = Emissionsfaktor für N₂O-Emissionen durch atmosphärische Deposition von N auf Böden und Oberflächen
= 0,0264 kg N₂O-N (kg NH₃-N + NO_x-N volatilisiert)⁻¹, Schweiz-spezifischer Wert gemäss dem Nationalen Treibhausgasinventar (FOEN, 2024)
- $\text{Frac}_{\text{LEACH}}$ = Anteil der N-Verluste durch Auswaschung und Oberflächenabfluss (indirekte Emissionen)
= 0,178 kg N (kg N-Input)⁻¹, Schweiz-spezifischer Wert gemäss dem Nationalen Treibhausgasinventar (FOEN, 2024)
- EF_5 = Emissionsfaktor für N₂O-Emissionen durch Auswaschung und Oberflächenabfluss
= 0,011 kg N₂O-N (kg N ausgewaschen)⁻¹, Standardwert gemäss IPCC (2019)
- $GWP_{\text{N}_2\text{O}}$ = Global Warming Potential
= 265 gemäss dem Fifth Assessment Report des IPCC (AR5) (IPCC, 2014)

Zur Einordnung der Veränderungen der THG-Emissionen aufgrund der Düngungsempfehlung nach der korrNorm wurden diese mit den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen des Jahres 2018 verglichen (Thiébaud *et al.*, 2023). Bei den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen handelt es sich um die Emissionen der landwirtschaftlichen Produktion und ihrer Vorleistungen.

Resultate

Standortanpassung durch korrNorm führt zu N-Einsparungen

Das theoretische N-Einsparpotenzial entsprach einer Reduktion von -1 kg N ha⁻¹ bis -35 kg N ha⁻¹ pro Betrieb und Jahr im Vergleich zur N-Düngungsnorm (Abb. 1). Lediglich in zwei Fällen hätte die Anwendung der korrNorm zu einer leichten Erhöhung der empfohlenen Düngemenge um +0,5 kg N ha⁻¹, respektive +6 kg N ha⁻¹ geführt. Das durchschnittliche theoretische N-Einsparpotenzial lag somit bei rund -14 % im Vergleich zur N-Düngungsnorm (-14 kg ha⁻¹).

Faktoren der korrNorm unterscheiden sich je Betrieb

Die Zusammensetzung der Korrekturfaktoren der korrNorm unterschied sich je nach Betrieb und Jahr (Abb. 2). Den generell stärksten Einfluss auf die N-Korrektur hatte jedoch f_{NOD} (Nachwirkung organischer Dünger aus dem Vorjahr), gefolgt von f_{VF} (Vorfrucht, d.h. Vor- und Zwischenkultur) und f_{OSB} (N-Nachlieferung durch Mineralisierung der OS im Boden). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass jeweils für das erste Analysejahr eines Betriebes, f_{NOD} nicht verfügbar war (keine Daten). Ebenfalls konnte f_{OSB} nur für Parzellen mit verfügbaren Bodenprobenanalysen quantifiziert werden.

Je nach aktueller Düngepraxis zeigt korrNorm auch höheren Düngebedarf

Vergleicht man die N-Düngeempfehlung nach korrNorm nicht mit der N-Düngungsnorm, sondern mit der tatsächlich ausgebrachten N-Düngemenge, so ergibt sich das realisierbare N-Einsparpotenzial. Dieses zeigt das reale Potenzial bei einer Umstellung der Düngepraxis. Negative Werte indizieren eine Möglichkeit zur Reduktion der Düngemengen. In zwölf von 26 Betriebsjahren ergaben sich N-Einsparpotenziale im Bereich von -7,6 kg N ha⁻¹ bis -75,1 kg N ha⁻¹ (Abb. 3, für das Jahr 2021 lagen keine Daten zur ausgebrachten Düngemenge vor). Besonders hervorzuheben sind dabei die Milchviehhaltungsbetriebe, welche neun der zwölf Fälle mit negativen N-Einsparpotenzialen ausmachten. Für 14 Betriebsjahre war das realisierbare N-Einsparpotenzial hingegen positiv,

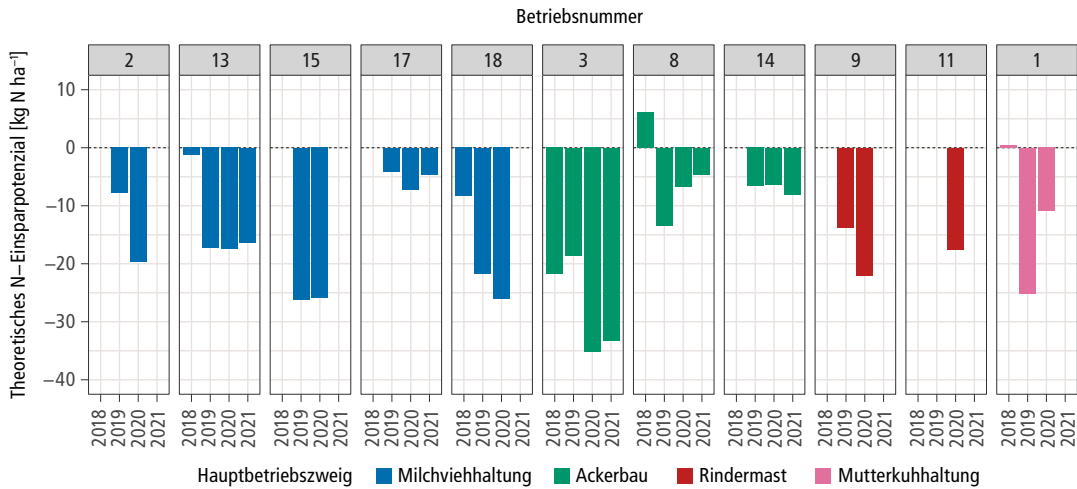


Abb. 1 | Theoretisches N-Einsparpotenzial (Düngung nach korrNorm – Düngungsnorm) pro Betrieb und Jahr. Negative Werte indizieren eine Einsparung, positive Werte eine Erhöhung der empfohlenen N-Düngemenge durch die korrNorm im Vergleich zur Düngungsnorm.

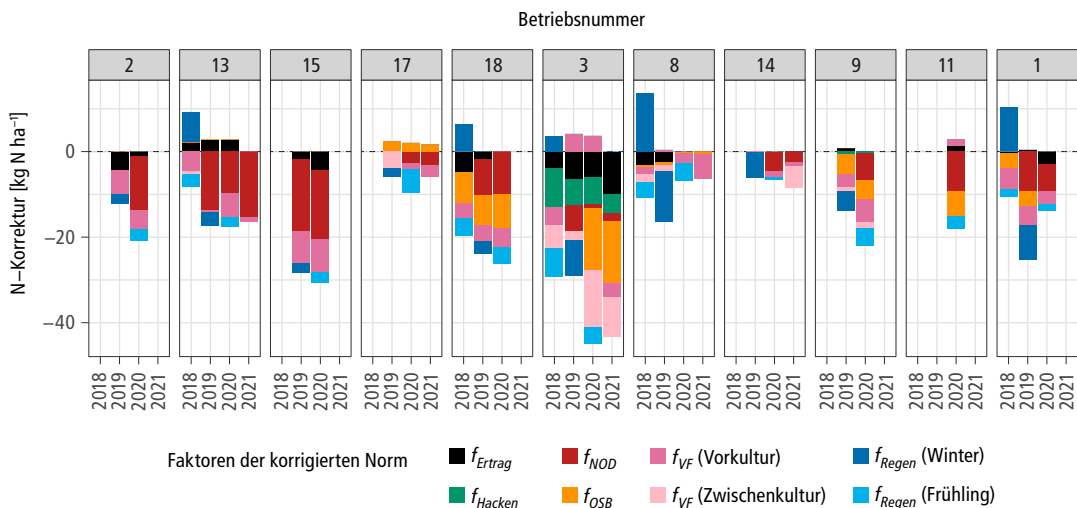


Abb. 2 | Verteilung der einzelnen Korrekturfaktoren der korrNorm. Negative Werte zeigen eine Reduktion der Düngemenge bei Anwendung der korrNorm bezogen auf die Düngungsnorm.

d.h. die korrNorm zeigte einen höheren Düngebedarf im Bereich von +1,4 kg N ha⁻¹ bis +56,7 kg N ha⁻¹. Hier stachen insbesondere Ackerbaubetriebe hervor. Im Durchschnitt über alle Betriebe würde die Anwendung der korrNorm zu einer Mehrdüngung von +1 kg N ha⁻¹, bzw. rund +1% im Vergleich zu den tatsächlich ausgebrachten N-Düngemengen führen.

Beim Übergang von der Betriebsebene zur Parzellenebene zeigte sich, dass innerhalb eines jeden Betriebs sowohl Parzellen existieren, auf denen mehr N ausgebracht wurde, als von der korrNorm empfohlen (<0), als auch solche, auf denen weniger ausgebracht wurde (>0, Abb. 4). Dabei lassen sich für gewisse Betriebe Trends in Bezug auf die angebaute (Haupt-) Kultur erahnen. Ein

Beispiel hierfür ist Betrieb Nummer 17, bei welchem intensive Wiesen oder Weiden durchgehend weniger gedüngt wurden, als nach der korrNorm vorgesehen (d.h. positives N-Einsparpotenzial).

THG-Einsparpotenzial nicht für alle Betriebe vorhanden

Basierend auf den realisierbaren N-Einsparpotenzialen wurde im nächsten Schritt das THG-Einsparpotenzial (in t CO₂e) abgeleitet, um die Auswirkungen einer Umstellung der Düngepraxis abzubilden (Abb. 5). Für jene Betriebe und Jahre, für welche N-Einsparungen durch die Anwendung der korrNorm möglich wären (d.h. negatives realisierbares N-Einsparpotenzial), lagen die ent-

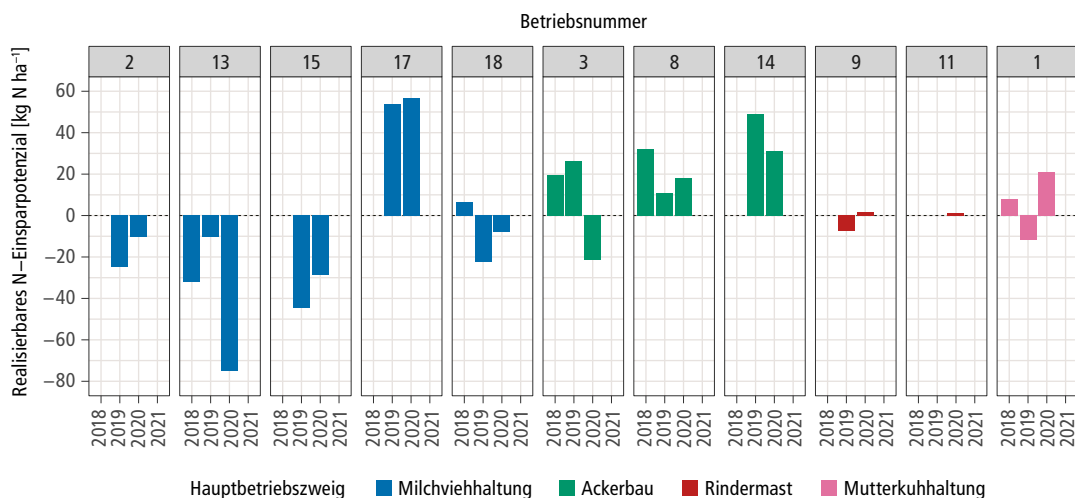


Abb. 3 | Realisierbares N-Einsparpotenzial (Düngung nach korrNorm – tatsächlich ausgebrachte Düngermengen) je Betrieb und Jahr. Negative Werte zeigen eine Einsparung, positive Werte eine Erhöhung der N-Düngemenge durch die korrNorm im Vergleich zur betrieblichen Praxis.

sprechenden THG-Einsparungen pro Betrieb und Jahr zwischen $-2,5\text{t CO}_2\text{eq}$ (Betrieb 9 im Jahr 2019; $-0,8\%$ an den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen 2018) bis $-28,1\text{t CO}_2\text{eq}$ (Betrieb 13 im Jahr 2020; $-5,0\%$ an den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen 2018).

Für manche Betriebe gäbe es jedoch auch eine Erhöhung der THG-Emissionen zwischen $+0,8\text{t CO}_2\text{eq}$ (Betrieb 11 im Jahr 2020; $+0,1\%$ im Vgl. zu den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen 2018) und $+33,2\text{t CO}_2\text{eq}$ (Betrieb 17 im Jahr 2020; $+5,4\%$ an den gesamtbetrieblichen THG-Emissionen 2018) sofern mehr Dünger ausgebracht würde. Über alle Betriebe hinweg würde bei einer Düngung nach korrNorm in der Summe rund $-7,2\text{t CO}_2\text{eq}$ eingespart werden.

Diskussion

Agronomisches und ökologisches Potenzial

Das theoretische N-Einsparpotenzial war für die meisten Betriebe und Jahre negativ, das heisst die korrNorm sorgte zumeist für eine Reduktion der empfohlenen Düngemenge im Vergleich mit der N-Düngungsnorm. Es gab jedoch Unterschiede in der Ausprägung zwischen den Betrieben und den Jahren aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Korrekturfaktoren (Abb. 2). Gewisse Faktoren bilden dabei den Effekt der Standortgegebenheiten ab und sind durch den Bewirtschafter nur wenig oder nicht zu beeinflussen, bspw. f_{OSB} oder f_{Regen} . Andere Faktoren hingegen reflektieren die Auswirkungen des Managements, wie f_{VF} , f_{NOD} oder f_{Hacken} , und ergeben sich durch Managemententscheide respektive Betriebsstrukturen. Dies widerspiegelt die

Anpassungsfähigkeit der korrNorm an die betrieblichen und standortspezifischen Bedingungen, wie auch die variierenden N-Einsparpotenziale auf Parzellenebene (Abb. 4) verdeutlichen.

Im Vergleich zu den mehrheitlich negativen theoretischen N-Einsparpotenzialen kam es bei den realisierbaren N-Einsparpotenzialen auf Betriebsebene sowohl zu positiven als auch negativen Werten. Über alle Betriebe führte dies daher im Durchschnitt zu einer geringen Mehrdüngung von $+1\text{kg N ha}^{-1}$ bei einer Düngungsempfehlung nach der korrNorm im Vergleich zu den tatsächlich ausgebrachten Düngemengen. Das verdeutlicht, dass etliche der Betriebe, insbesondere Ackerbaubetriebe, in ihrer betrieblichen Praxis weniger N düngten als nach Düngungsnorm bzw. nach korrNorm ausgewiesen (Abb. 3; N-Einsparpotenzial >0). Umgekehrt wiesen jedoch insbesondere Milchviehbetriebe mitunter die grössten N-Einsparpotenziale aller Betriebe mit bis zu -75kg N ha^{-1} aus. Eine Umstellung der Düngepraxis auf die korrNorm könnte also insbesondere für Milchviehbetriebe zu einer Erhöhung der N-Effizienz führen. Dies würde zudem mit einer Reduktion der THG-Emissionen aus der Produktion und Anwendung synthetischer Dünger einhergehen (Abb. 5), sofern der Zukauf reduziert würde, was zudem auch finanzielle Vorteile mit sich brächte.

Für die Betriebe und Jahre ohne realisierbare N-Einsparungen gilt es zu beachten, dass dies teilweise akzentuiert wurde, durch die Tatsache, dass für einige Betriebsjahre nicht alle Korrekturfaktoren berücksichtigt werden konnten und somit die N-Korrektur tendenziell unterschätzt wurde. Dies betrifft insbesondere f_{NOD} für

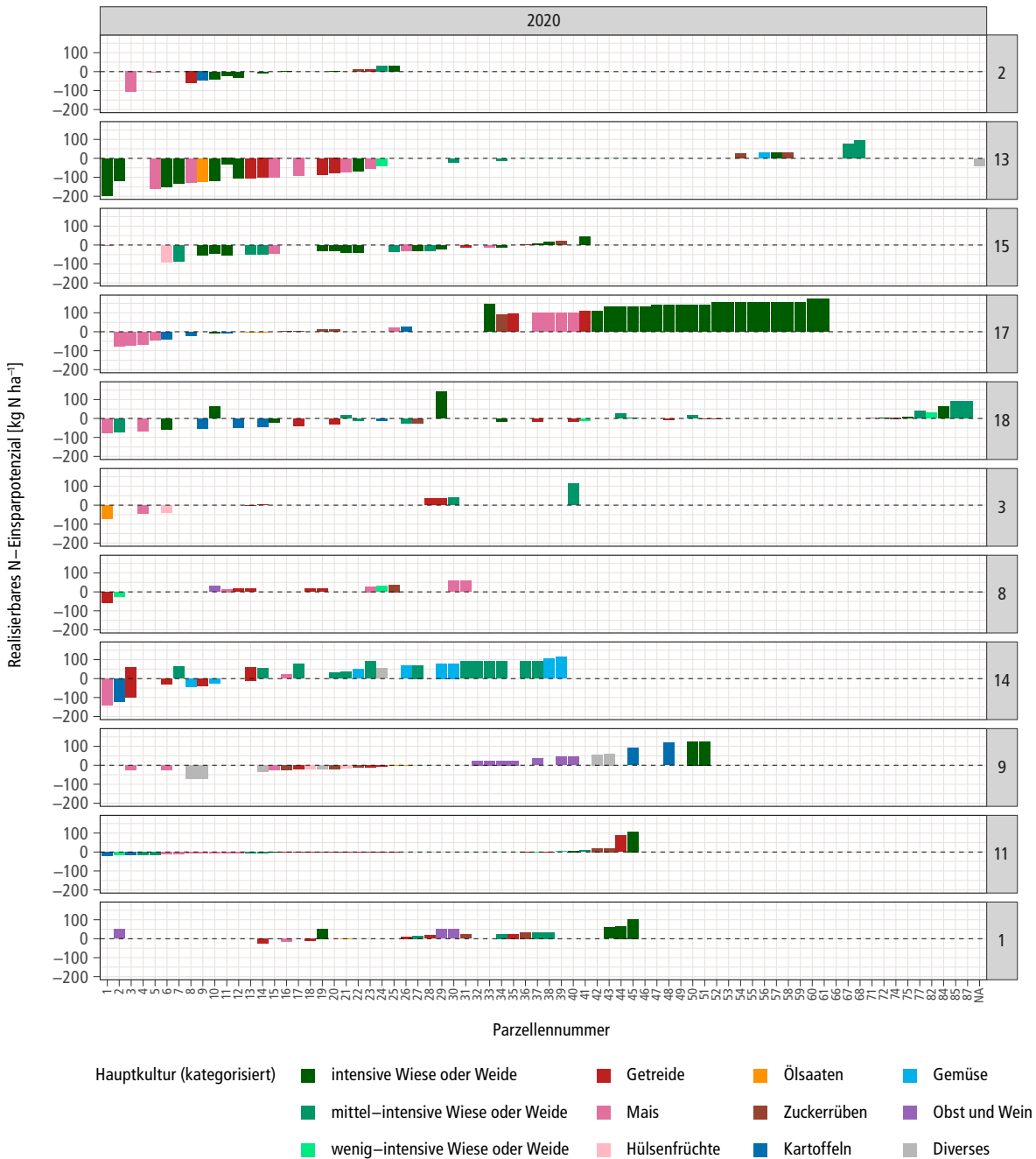


Abb. 4 | Realisierbares N-Einsparpotenzial auf Parzellenebene mit der farblichen Unterscheidung nach angebaute Hauptkultur für das Jahr 2020. Negative Werte zeigen eine Einsparung, positive Werte eine Erhöhung der N-Düngemenge.

das jeweils erste Analysejahr, da keine Informationen zur ausgebrachten Menge an organischen Düngern im Vorjahr verfügbar waren. Dieser Fakt trifft ebenso auf f_{OSB} zu, da für einige der analysierten Parzellen keine Daten zu den Gehalten an OS und Ton im Boden vorlagen. Aufgrund des relativ starken Einflusses dieser beiden Faktoren im Vergleich zu den anderen Korrekturfaktoren (Abb. 2), kann davon ausgegangen werden, dass für jene Jahre bzw. jene Parzellen eine Unterschätzung der

N-Korrektur und somit des N-Einsparpotenzials vorliegt. Für eine weitere Anwendung der korrNorm in zukünftigen Jahren oder Projekten ist es daher entscheidend, eine möglichst vollständige und genaue Datengrundlage sicherzustellen. Nur durch die Berücksichtigung aller relevanter Faktoren kann das volle Potenzial der korrNorm in Bezug auf N-Einsparungen und daraus abgeleiteten THG-Emissionsreduktionen evaluiert werden. Auch eine Anpassung an das tatsächliche Ertragspoten-

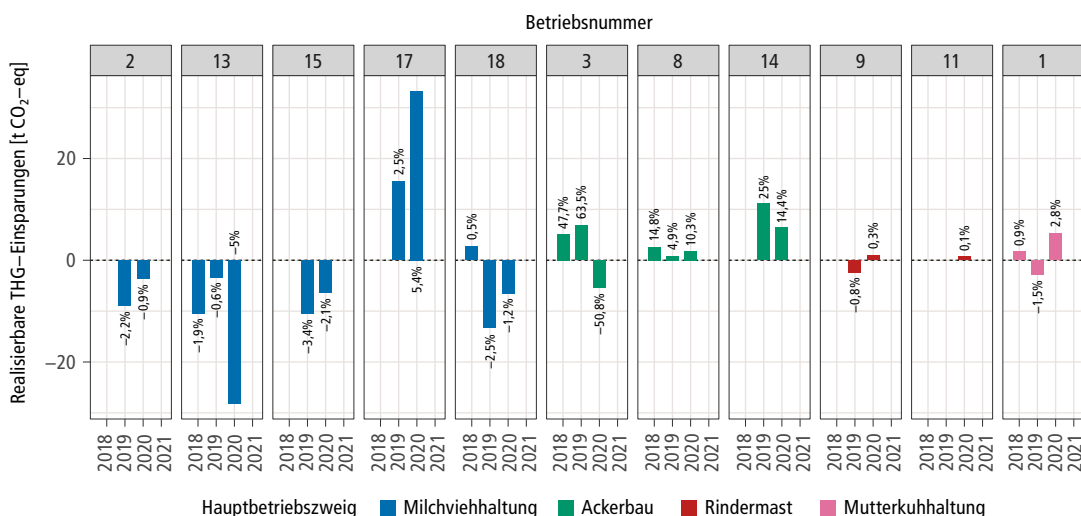


Abb. 5 | Realisierbare THG-Einsparungen auf Grundlage der realisierbaren N-Einsparpotenziale bei einer Umstellung der Düngepraxis auf die Empfehlung nach korrNorm. Die abgebildeten Prozentzahlen setzen die realisierbaren THG-Einsparungen in Bezug zur THG-Bilanzierung der Betriebe aus dem Jahr 2018 (Thiébaud *et al.*, 2023).

tial bzw. der Ertragserwartung kann den errechneten Düngebedarf substantiell beeinflussen. Eine korrekte Berücksichtigung des Normertrags konnte im Projekt allerdings aufgrund Datenmangel nicht überprüft werden.

Vergleich mit der Suisse-Bilanz

Für eine Einordnung der korrNorm in den aktuellen Vollzugskontext braucht es einen Vergleich mit der Suisse-Bilanz. Die Suisse-Bilanz dient als zentrales Instrument zur Nährstoffbilanzierung gemäss der schweizerischen Gesetzgebung und stellt eine der Voraussetzungen für den ÖLN dar. Die Berechnungen basieren dabei primär auf Ertragserwartungen und lassen die spezifischen Korrekturfaktoren der korrNorm mit Ausnahme von f_{Ertrag} unberücksichtigt. Dies führt somit potenziell zu einer Überschätzung des Nährstoffbedarfs, und bringt in der Konsequenz die Gefahr von N-Überschüssen und N-Verlusten mit sich. Für das Jahr 2020 wurde bspw. der Pflanzenbedarf gemäss Suisse-Bilanz für alle elf Betriebe zusammen betrachtet um über 8t N, resp. etwa 18kg N ha⁻¹, überschätzt, was der Summe aller Korrekturfaktoren mit Ausnahme von f_{Ertrag} entspricht. Hier handelt es jedoch nur um eine Punktaufnahme und es benötigt einen längeren Beobachtungszeitraum um diese Ergebnisse zu validieren.

Limitationen der Studie

Einige Limitationen erschweren eine abschliessende Bewertung der korrNorm im betrieblichen Kontext. Eine

zentrale Einschränkung liegt darin, dass die vorliegende Analyse auf einer Ex-post-Betrachtung beruht, ohne dass die Betriebe tatsächlich ihre Düngepraxis auf die korrNorm umgestellt haben. Dabei wäre es wichtig, die Auswirkungen einer Umstellung auf die korrNorm im Hinblick auf das Ernteprodukt (Ertrag und Qualität) als auch auf die Bodenfruchtbarkeit zu evaluieren. Denn die korrNorm zielt darauf ab, eine optimale N-Versorgung der Kulturen sicherzustellen, nicht jedoch auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Es könnten sich Nachteile ergeben, aufgrund des Rückgangs der OS durch reduzierte Ausbringmengen an organischem Dünger. Zusätzlich war die Düngebedarfsermittlung nach korrNorm im Projekt auf die N-Düngung beschränkt und berücksichtigte andere essenzielle Pflanzennährstoffe wie Phosphor, Kalium oder Magnesium nicht. Dies kann insbesondere bei der Anwendung von organischen Düngern, deren Nährstoffverhältnis oft nicht mit dem Bedarf der Pflanzen übereinstimmt, zu Problemen führen. Weiterhin muss erwähnt werden, dass die korrNorm lediglich bei der Bestimmung des Gesamt-N-Bedarfs unterstützt. Die zeitliche Aufteilung und die räumliche Verteilung der Düngegaben, die Auswahl der Dünger sowie technische Massnahmen sind ebenso wichtige Aspekte einer effizienten Düngung (Johnston & Bruulsema, 2014; Snyder, 2017). Diese Punkte verdeutlichen, dass trotz der vielversprechenden Ergebnisse der korrNorm im Hinblick auf N-Einsparungen und daraus abgeleiteten THG-Reduktionen, zusätzliche Verbesserungsmöglichkeiten für den Einsatz in der betrieblichen Praxis bestehen.

