

Standortangepasste Stickstoff-Düngung

Landwirtschaftliche Stickstoffverluste (N-Verluste) durch übermässige N-Düngung führen zu Emissionen von Ammoniak und Nitrat, die Umweltbelastungen verursachen, sowie zu Lachgasemissionen, die direkt zum Klimawandel beitragen. Die standortangepasste N-Düngung mittels der korrigierten Normen (korrNorm) zielt darauf ab, N-Überschüsse zu reduzieren und dadurch die N-Effizienz zu erhöhen. Sie gilt als Teil der guten landwirtschaftlichen Praxis im Acker- und Futterbau und kann als Massnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen.

Monitoring: Die Erfassung der ausgebrachten Mengen an Mineral- und Hofdüngern ermöglicht auf Projekt- und Kantonsebene, den Fortschritt bei der Umsetzung des Absenkpfeils Nährstoffverluste zu dokumentieren. Auf Parzellen- und Betriebsebene lässt sich die Ermittlung des N-Einsparpotenzials der standortangepassten N-Düngung mittels einheitlichen Feldkalendern, idealerweise in digitaler Form, vereinfachen. Eine Validierung kann über On-Farm-Versuche erfolgen, bei denen verschiedene Methoden zur N-Düngebedarfsermittlung genutzt werden können.

Empfehlungen: Für die einfache Umsetzung in der Praxis braucht es ein benutzerfreundliches digitales Tool, das nahtlos an bestehende Datenablagen angebunden ist. Beprobungen von Hofdüngern/ Böden, sowie die Erfassung von Erträgen sind zentrale Bestandteile der Düngeplanung und sollten gefördert werden. Die Weiterentwicklung der standortangepassten N-Düngung kann durch den Aufbau von Referenzdatensätzen und der Einführung fernerkundungsbasierter Ertragsschätzungen im Grasland aktiv unterstützt werden.

Vertrauen in die Wirksamkeit	Standortangepasste Düngung: Hohe Übereinstimmung & Robuste Evidenz Methode korrNorm: Hohe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz
Zeithorizont	Sofort wirksam
Bereitschaft	Anwendungsbereit (Acker- und Futterbau)
Annahmen Skalierung Graubünden	Reduktion von rund -21 kg N/ha, entspricht -0.15 t CO ₂ eq/ha; auf 80% der Ackerflächen und Kunstwiesen (rund 3200 ha)
Potenzial Graubünden	Rund -0.5 kt CO ₂ eq pro Jahr



Inhalt

1	Emissionsprozess	3
2	Technisches Potenzial	3
2.1	Wirkungsmechanismus der Minderungsmassnahme	3
2.2	Technisches Potenzial als Minderungsmassnahme	5
2.3	Vertrauen in die Wirksamkeit	6
3	Systembetrachtung.....	6
3.1	Synergien	6
3.2	Limitierungen, Zielhierarchien	7
3.3	Kostenbetrachtungen	7
4	Überlegungen zum umsetzbaren Potential Kanton Graubünden	7
4.1	Erfahrungen aus den Pilotprojekten	9
4.1.1	Düngebedarfsoptimierung	9
4.1.2	Verknüpfung von Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf	12
5	Förderung und Überwachung	13
5.1	Monitoring, Reporting and Verification	13
5.2	Existierende und mögliche weitere Förderprogramme und Instrumente	14
6	Fazit und Empfehlungen	14
7	Literatur.....	16

Impressum

Copyright: Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden, Cazis 2025
Autor:innen: E. Tanner, F. Liebisch, C. Zosso & D. Bretscher (Agroscope); Alex Mathis (ZHAW); C. Gilli (Maschinenring Graubünden)
Titelbild: Bilderarchiv Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden
Datum: Juni 2026





1 Emissionsprozess

Landwirtschaftliche Stickstoffverluste (N-Verluste) in die Umwelt korrelieren mit der Höhe an N-Überschüssen (positive N-Bilanzen), welche durch übermässige N-Düngung mitverursacht werden (Dalgaard et al., 2012). Diese N-Verluste erfolgen hauptsächlich in der Form von Nitrat (NO_3^-) und Ammoniak (NH_3), die massgeblich zur Überschreitung der planetaren Belastungsgrenzen beitragen und negative Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit haben (Rockström et al., 2024; Schulte-Uebbing et al., 2022).

Lachgasemissionen (N_2O -Emissionen) tragen hingegen einen relativ kleinen Anteil (rund 1 % des ausgebrachten N-Düngers, Huddell et al., 2020) zu den gesamten N-Verlusten in die Umwelt bei, sind jedoch aufgrund des hohen globalen Erwärmungspotentials (*Global Warming Potential*, GWP) von N_2O klimarelevant. N_2O -Emissionen in der Landwirtschaft entstehen hauptsächlich als Nebenprodukt mikrobieller Umsetzungen (Nitrifikation und Denitrifikation) von N-Verbindungen in Böden (Gao & Cabrera Serrenho, 2023). Bei der Nitrifikation, welche hauptsächlich in gut belüfteten Böden stattfindet, wird Ammonium (NH_4^+) zuerst zu Nitrit (NO_2^-) und anschliessend zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt. Während dieses Prozesses kann N_2O als Nebenprodukt freigesetzt werden und in die Atmosphäre entweichen. Die Denitrifikation erfolgt hingegen unter sauerstoffarmen Bedingungen (wassergesättigte Böden), bei denen Bakterien Nitrat über mehrere Zwischenstufen, darunter N_2O , zu elementarem Stickstoff (N_2) umwandeln.

Diese natürlich vorkommenden Prozesse werden durch verschiedene Umweltfaktoren wie Bodenfeuchte, Bodentemperatur oder Boden-pH beeinflusst (s. Wang et al. (2021) für Details). Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung, insbesondere der Einsatz von N-haltigen Düngemitteln, spielt jedoch ebenfalls eine wichtige Rolle. Pflanzen konkurrieren mit den N_2O -produzierenden Mikroben um die Nutzung des im Boden vorhandenen N, wodurch die N_2O -Produktion begrenzt wird, solange die Pflanzen den grössten Teil des N im Boden nutzen. Übersteigt der

N-Gehalt im Boden jedoch den N-Bedarf der Pflanzen (positive N-Bilanz), steigen die N_2O -Emissionen überproportional an (Rosas et al., 2015).

In der Regel unterscheidet man zwischen direkten und indirekten N_2O -Emissionen. Direkte N_2O -Emissionen entstehen, wenn z.B. durch die Ausbringung von mineralischen Düngern oder Hofdüngern der N-Gehalt im Boden erhöht wird, wodurch die Ausgangsstoffe für die mikrobiellen Umwandlungen angereichert werden (Wang et al., 2021). Indirekte N_2O -Emissionen entstehen, wenn N aus Düngemitteln in Form von Stickoxiden (NO_x) oder Ammoniak durch Verflüchtigung und anschliessende Deposition oder als Nitrat durch Auswaschung oder Oberflächenabfluss in die Umwelt gelangt und anschliessend zu N_2O umgewandelt wird.

2 Technisches Potenzial

2.1 Wirkungsmechanismus der Minderungsmassnahme

Eine standortangepasste N-Düngung, bei der die Düngemenge auf den Pflanzenbedarf abgestimmt wird, kann dazu beitragen N-Überschüsse im Boden zu verringern und dadurch die N_2O -Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zu reduzieren (Gao & Cabrera Serrenho, 2023).

Ein Ansatz zur standortangepassten N-Düngebedarfsermittlung ist die Methode der korrigierten Normen (korrNorm), wie sie in den *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz* (GRUD; Sinaj & Richner, 2017) für den Acker- und Futterbau (Kunstwiesen und Silomais) beschrieben wird. Bei der korrNorm wird die kulturspezifische N-Düngungsnorm, die für einen durchschnittlichen Ertrag unter durchschnittlichen Bedingungen in der Schweiz kalibriert ist, mittels verschiedener Korrekturfaktoren an die parzellenspezifischen Klima-, Boden- und Bewirtschaftungsgegebenheiten angepasst (**Formel 1**).



Formel 1: Berechnung der N-Düngeempfehlung nach der Methode der korrigierten Normen (GRUD, S. 8/23).

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

Wobei:

N_{korrNorm} ist die N-Düngeempfehlung gemäss korrNorm.

N_{Norm} ist die kulturspezifische N-Düngungsnorm, kalibriert für den mittleren Ertrag unter durchschnittlichen Bedingungen in der Schweiz.

f_{Ertrag} passt die N-Düngermenge bei einer Abweichung der Ertragserwartungen vom mittleren Ertrag an.

f_{OSB} widerspiegelt die erhöhte, resp. verminderte N-Nachlieferung durch die Mineralisierung der organischen Substanz (OS) im Boden in Abhängigkeit des OS- und Tongehaltes des Bodens.

f_{Hacken} reflektiert die Erhöhung der Mineralisierung der OS durch (mehrmaliges) Hacken.

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.

$f_{\text{Frühling}}$ bezieht sich auf die Auswirkungen der Witterungsbedingungen im Frühling (Feuchtigkeit und Temperatur) auf die Mineralisierung der OS und die N-Verfügbarkeit. Zum jetzigen Zeitpunkt stehen keine validierten Kriterien zur Beschreibung der Witterungsbedingungen zur Verfügung, weshalb dieser Faktor derzeit nicht berücksichtigt werden sollte.

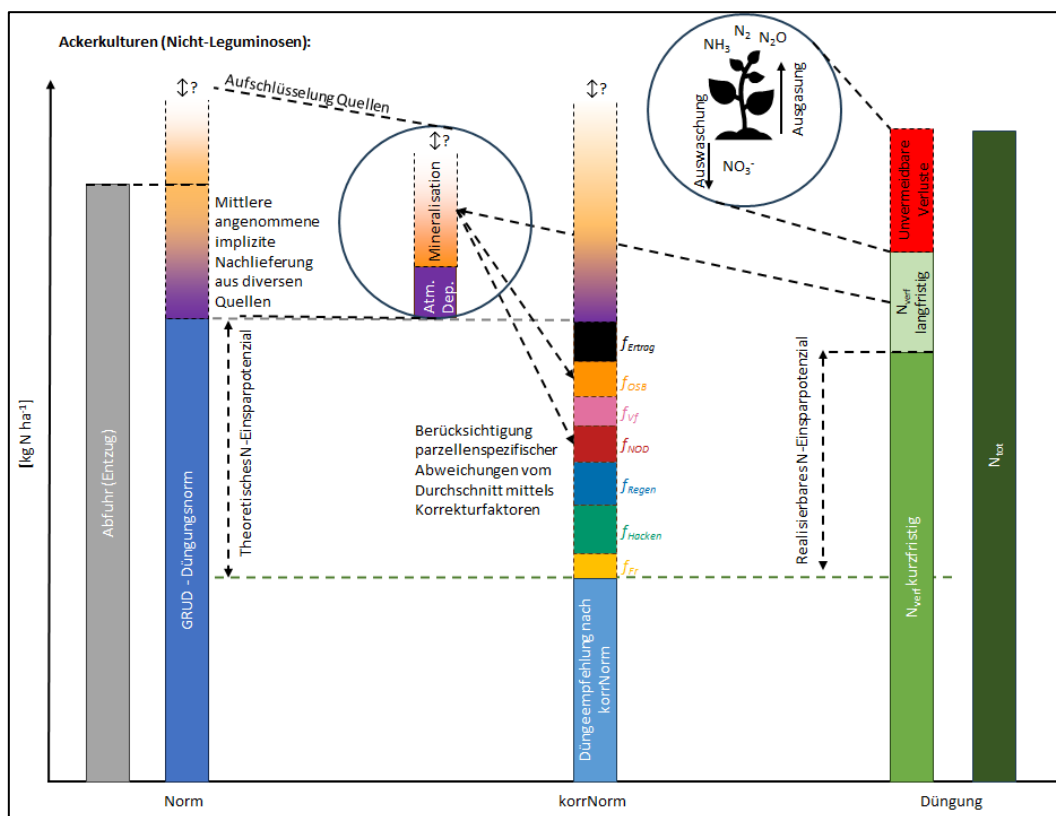


Abbildung 1: Schematische Darstellung der relevanten Größen zur Beurteilung der N-Düngung bei Ackerkulturen (Nicht-Leguminosen): N-Abfuhr über die Ernte, GRUD-Düngungsnorm, Düngebedarf gemäss der Methode der korrigierten Normen, sowie die N-Düngung aufgeteilt in Gesamt-Stickstoff (N_{tot}) und pflanzenverfügbarer Stickstoff (N_{verf}) (nicht massstabsgetreu).



Die Düngeplanung mittels korrNorm ermöglicht somit die gezielte Düngung nach Bedarf. Bei einem Vergleich des N-Düngebedarfs gemäss korrNorm und der tatsächlichen Düngepraxis, lässt sich Ex-post (im Nachhinein) das (realisierbare) N-Einsparpotenzial eruieren (**Abbildung 1**).

Ausgehend von diesem N-Einsparpotenzial lässt sich das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) pro kg eingespartem N quantifizieren (basierend auf der Methodik des Intergovernmental Panel on Climate Change, s. Hergoualc'h et al., 2019 und FOEN, 2024). Berücksichtigt werden dabei die direkten und indirekten N_2O -Emissionen nach der Ausbringung von organischen und synthetischen Düngemitteln, sowie die THG-Emissionen aus der Herstellung bei synthetischen Düngemitteln. Die N_2O -Emissionen nach der Ausbringung werden mithilfe von Emissionsfaktoren berechnet, welche die freigesetzte Menge an N_2O in Relation zur ausgebrachten N-Menge setzen. Dies umfasst die direkten Emissionen aus den N-Inputs, sowie die indirekten Emissionen, die entstehen, wenn sich Anteile der ausgebrachten N-Menge verflüchtigen (Ammoniak, Stickoxide), bzw. durch Auswaschung und Oberflächenabfluss (Nitrat) in die Umwelt gelangen und anschliessend zu N_2O umgewandelt werden (basierend auf Werten aus FOEN, 2024; Hergoualc'h et al., 2019 & IPCC, 2014; für Details zur Herleitung s. Tanner et al., 2024). Für Hofdünger ergibt sich eine Einsparung von ca. 7.3 kg CO_2eq pro kg eingespartem N. Bei synthetischen Düngemitteln beträgt das THG-Einsparpotenzial rund 8.7 kg CO_2eq pro kg eingespartem N, wobei ca. 3 kg CO_2 -Äquivalente pro kg N auf die THG-Emissionen der Herstellung entfallen (Hoxha & Christensen, 2019 und Yara, 2023). Durch die Anwendung der korrNorm zur Düngebedarfsermittlung lässt sich somit nicht nur das N-Einsparpotenzial bestimmen, sondern auch der Beitrag zur Minderung der THG-Emissionen.

2.2 Technisches Potenzial als Minderungsmassnahme

Die bisher gewonnen Erkenntnisse und Schätzungen zum N-Einsparpotenzial durch die korrNorm

umfassen sowohl wissenschaftliche Versuche (Argento et al., 2025; Grossrieder et al., 2022; Maltas et al., 2015), als auch regionale (Tanner et al., 2024) und nationale Modellierungen (Guillaume et al., 2023).

In Kleinparzellenversuchen konnten für Winterweizen bei gleichbleibenden Erträgen N-Einsparungen von rund -20 bis -40 kg N ha^{-1} im Vergleich zur N-Düngenorm erzielt werden (Grossrieder et al., 2022). Für Silomais, Wintergerste, Urdinkel und Winterraps wurde ebenfalls ein N-Einsparpotenzial durch die korrNorm nachgewiesen (Argento et al., 2025). Auf Betriebsebene wurde die N-Düngebedarfsermittlung nach korrNorm im Rahmen des Ressourcenprojekts AgroCO₂cept für mehrere Betriebe im Zürcher Oberland in einer theoretischen Ex-post Analyse angewendet (Tanner et al., 2024). Beim Vergleich der Düngeempfehlung nach korrNorm mit der tatsächlich ausgebrachten N-Düngermenge wären für knapp die Hälfte (46 %) der analysierten Betriebsjahre Reduktionen zwischen -7.5 bis -75.1 kg N ha^{-1} (Mittelwert: -21 kg N ha^{-1}) möglich gewesen, während in den restlichen analysierten Betriebsjahren weniger gedüngt wurde als nach korrNorm empfohlen. Bei der Analyse handelte es sich jedoch um eine theoretische Betrachtung, und somit konnte keine Aussage über die Auswirkungen auf die Erträge gemacht werden.

Eine schweizweite Schätzung im Rahmen des Absenkpfeils Nährstoffverluste ([Art. 6a LWG](#)) ergab, dass alleine durch die Faktoren f_{VF} , f_{NOD} und f_{Hacken} eine Reduktion des N-Bedarfs von rund 5'600 t N möglich wäre (Guillaume et al., 2023). Dies würde, verglichen mit einer Düngung gemäss der Suisse-Bilanz, einer Reduktion des N-Überschusses der Schweizer Landwirtschaft um rund 6% entsprechen.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse und Schätzungen zur Grössenordnung der N-Einsparpotenziale durch die korrNorm lassen sich jedoch nur schwer auf den Kanton Graubünden übertragen. Zum einen wird die Düngebedarfsermittlung nach korrNorm inhärent von betriebspezifischen und regionalen Gegebenheiten, wie etwa dem Niederschlagsniveau oder den angebauten Kulturen, beeinflusst. Dabei gilt insbesondere zu beachten, dass die korrNorm



für die Anwendung im Acker- und Futterbau (Kunstwiesen und Silomais) entwickelt und validiert wurde, wohingegen im Kanton Graubünden viel Dauergrasland zu finden ist. Zum anderen wird auch die betriebliche Düngepraxis durch regionale Einflussfaktoren, wie bspw. dem Anteil an biologisch bewirtschafteten Betrieben und dem Anteil an organischer Düngung, beeinflusst. Eine allgemeingültige Aussage zur Höhe des technischen Potenzials der korrNorm ist daher schwierig zu treffen, da der Vorteil der Methode in ihrer Anpassungsfähigkeit an betriebsspezifische und regionale Bedingungen liegt. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass die Anwendung der korrNorm gegenüber der Normdüngung zu einer Reduktion der Düngemenge führt.

2.3 Vertrauen in die Wirksamkeit

Aufgrund der diffusen Natur von N_2O -Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden besteht der wirksamste Reduktionsansatz darin, den Einsatz der Inputs, die letztlich die Emissionen verursachen, zu reduzieren (Shortle und Abler 1997; Xepapadeas 1997; und Segerson 1988 in Rosas et al., 2015). Eine standortangepasste Düngung, welche zum Ziel hat, N-Überschüsse durch die Abstimmung der N-Düngemenge auf den N-Bedarf der Pflanze zu reduzieren, stellt somit einen effektiven Hebel zur Senkung der N_2O -Emissionen landwirtschaftlicher Böden dar (Gao & Cabrera Serrenho, 2023). Somit kann der wissenschaftliche Konsens in den Wirkungsmechanismus als hoch eingestuft werden.

Vertrauen in die Wirksamkeit Bezüglich Übereinstimmung und Qualität der Evidenz in der akademischen Literatur		
5 Hohe Übereinstimmung & Robuste Evidenz	4 Mittlere Übereinstimmung & Robuste Evidenz	3 Geringe Übereinstimmung & Robuste Evidenz
4 Hohe Übereinstimmung & Mittlere Evidenz	3 Mittlere Übereinstimmung & Mittlere Evidenz	2 Geringe Übereinstimmung & Mittlere Evidenz
3 Hohe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz	2 Mittlere Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz	1 Geringe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz

Abbildung 2: Wirkungseinschätzung für das Konzept der standortangepassten Düngung (grün umrandet) und der Düngebedarfsermittlung nach der Methode der korrigierten Normen (rot umrandet, nach (Mastrandea et al, 2010).

Es fehlen jedoch, mit Ausnahme von Maltas et al. (2015), Grossrieder et al. (2022) und Argento et al. (2025), noch Praxisversuche für die Belegung einer tatsächlichen Reduktion des Düngemiteleinsatzes durch die korrNorm in der Schweiz, wobei dies insbesondere die Anwendung im Grasland betrifft. Derzeit gibt es mehrere laufende Projekte ([MaisNet](#), [CriticalN](#)), welche ebenfalls auf ein Reduktionspotenzial hindeuten, deren finale Evaluation jedoch noch nicht abgeschlossen ist.

Zusammenfassend kann die standortangepasste Düngung als Massnahme zur Reduktion von N_2O -Emissionen als «Hohe Übereinstimmung & Robuste Evidenz» eingestuft werden (**Abbildung 2**). Die korrNorm als spezifische Methode der standortangepassten Düngung wird mit «Hohe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz» bewertet, vor allem in Bezug auf Dauergrasland.

3 Systembetrachtung

3.1 Synergien

Düngeplanung und -dokumentation:

Ein zentraler Vorteil der korrNorm liegt im verhältnismässig geringen zeitlichen Zusatzaufwand von ca. 0.5 h pro Schlag und Jahr (Grossrieder et al., 2022). Relativierend ist zudem, dass gemäss Gesetzgebung eine Düngeplanung und -dokumentation ohnehin Voraussetzung für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) und somit für den Erhalt von Direktzahlungen ist. Ebenfalls wird für den ÖLN das regelmässige Beprobieren (mind. alle 10 Jahre) aller Parzellen auf den pH-Wert sowie die Gehalte an Phosphor, Kalium und organischer Substanz (für Ackerflächen) verlangt. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die benötigten Unterlagen für die Düngebedarfsermittlung gemäss korrNorm (d.h. Feld- und Wiesenkalender und Bodenanalysen) auf den meisten Betrieben bereits vorhanden sind und kein wesentlicher zeitlicher oder finanzieller Zusatzaufwand für deren Beschaffung entsteht. Im Gegenteil: Aus wirtschaftlicher Sicht können die Betriebe von Kosteneinsparungen profitieren, wenn durch die korrNorm die Menge an zugekauften Düngemitteln reduziert werden kann.



Reduktion der Umweltbelastung:

Die Reduktion des Düngemittleinsatzes durch die korrNorm reduziert N-Überschüsse und senkt somit das Risiko von N-Verlusten in Form von Nitrat ins Grundwasser oder Ammoniak und Stickoxiden in die Luft (Dalgaard et al., 2012). Dies führt nicht nur zu geringeren THG-Emissionen, sondern reduziert auch die Eutrophierung von Oberflächengewässern und die Luftbelastung durch reaktive N-Verbindungen, was sich positiv auf die Biodiversität, die Trinkwasserqualität und die menschliche Gesundheit auswirkt (BLW et al., 2023).

3.2 Limitierungen, Zielhierarchien

Einschränkungen bei Düngung mit Hofdüngern:

Bei einer Reduktion des empfohlenen N-Düngebedarfs nach korrNorm können Betriebe, die synthetische Düngemittel einsetzen, diese Einsparung direkt durch einen geringeren Zukauf realisieren, was zudem finanzielle Vorteile mit sich bringt. Bei Betrieben, die ausschliesslich auf Hofdünger setzen, liegt der Nutzen der korrNorm primär in einer optimierten räumlichen Verteilung des Hofdüngers auf die einzelnen Parzellen. Kurzfristig würde die Abgabe überschüssiger Nährstoffe an Betriebe mit ungedecktem Düngerbedarf eine vielversprechende Massnahme darstellen, um eine überbetriebliche Reduktion des N-Düngemittleinsatzes und der entsprechenden THG-Emissionen zu erreichen. Eine solche lokale oder regionale Umverteilung ist jedoch mit logistischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Hürden verbunden. So liegt im Kanton Graubünden die durchschnittliche Transportdistanz von Hofdünger bei knapp 20 km und beträgt damit mehr als das Doppelte des Schweizer Durchschnitts von 9 km (Möhring, 2023). Ein verstärkter überbetrieblicher Hofdüngerhandel müsste gezielt gefördert werden, um die Attraktivität im Vergleich mit Mineraldüngern zu erhöhen.

Mittel- bis langfristig sollte jedoch eine innerbetrieblich ausgeglichene Bilanz angestrebt werden, wobei die anfallende Menge an Hofdünger letztlich durch die Besatzdichte steuerbar ist (Alig et al., 2015). Solche Anpassungen können jedoch mit

Betriebsumstrukturierungen sowie wirtschaftlichen und kulturellen Thematiken der ländlichen Entwicklung verbunden sein.

Keine Berücksichtigung essenzieller Pflanzennährstoffe neben N:

Die korrNorm fokussiert auf die Ermittlung des N-Düngebedarfs und berücksichtigt keine anderen essenziellen Pflanzennährstoffe wie Phosphor, Kalium oder Magnesium. Dies kann unter Umständen bei der Verwendung organischer Dünger, zu Nährstoffungleichgewichten führen, da deren Nährstoffverhältnisse oft nicht dem spezifischen Bedarf der Pflanzen entsprechen. Solche Ungleichgewichte können sowohl Ertrags- als auch Qualitätseinbussen zur Folge haben, lassen sich jedoch durch P-, K-, und Mg-Düngeplanung gemäss GRUD (s. GRUD Kapitel 2, 8 und 9), inkl. regelmässiger Boden- und Hofdüngeranalysen, vermeiden.

3.3 Kostenbetrachtungen

Die korrNorm ist als wirtschaftliche Massnahme einzustufen: Abgesehen von den Kosten für den geringen zeitlichen Aufwand bei der Düngeplanung (ca. 15 CHF pro Schlag; Grossrieder et al., 2022) entstehen keine weiteren Mehrkosten. Da die monetären Erträge gleichbleiben und gleichzeitig ggf. durch die Reduktion des Einsatzes von synthetischen Düngern Einsparungen erzielt werden können, übersteigen die finanziellen Vorteile die zusätzlichen Kosten, d.h. Δ monetäre Erträge $>$ Δ Kosten (Guillaume et al., 2023).

4 Überlegungen zum umsetzbaren Potential Kanton Graubünden

Für den Ackerbau lässt sich das N-Einsparpotenzial einer standortangepassten Düngebedarfsermittlung gemäss korrNorm, und darauf basierend das kantonale THG-Einsparpotenzial, anhand der durchschnittlichen Einsparungen der Pilotbetriebe von rund -21 kg N ha^{-1} (siehe Kapitel 4.1) abschätzen. Bei einer Acker- und Kunstwiesenfläche von rund 4'000 ha im Kanton Graubünden, könnten somit total ca. 84 t N pro Jahr eingespart werden. Daraus ergibt sich eine jährliche THG-Einsparung von rund



640 t CO₂eq bei der Reduktion von Hofdüngerausbringungen, bzw. rund 730 t CO₂eq bei der Reduktion von Mineraldüngern (s. Kapitel 2.1). Wird als ambitionierte Umsetzung angenommen, dass diese Einsparung auf 80% der Flächen erzielt werden kann, ergibt dies bei der Reduktion von Hofdüngerausbringungen eine Einsparung von rund 0.5 kt CO₂eq pro Jahr.

Bezüglich dieser Schätzung gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die Anzahl Datenpunkte zur Düngung bei den Pilotbetrieben klein war und insbesondere nur eine begrenzte Auswahl an Ackerkulturen umfasst. Ebenfalls ist die Bewirtschaftung durch die Pilotbetriebe im Vergleich zur Gesamtheit der landwirtschaftlichen Betriebe im Kanton vermutlich nicht repräsentativ, da bspw. von den analysierten Pilotbetrieben lediglich zwei nicht nach BioSuisse-Richtlinien bewirtschaften.

Hier braucht es eine breitere Datengrundlage, um zukünftig das Potenzial im Ackerbau je Kultur und Betriebstyp präziser bestimmen zu können. Bereits verfügbar sind u.a. georeferenzierte Inputdaten zu den Hauptkulturen (abrufbar auf dem Geoportal des Kantons), zu den Ton- und OS-Gehalten (ableitbar aus den *Hinweiskarten für Bodeneigenschaften* des Kompetenzzentrum Boden KOBO) und den Niederschlagsmengen (abrufbar über MeteoSchweiz). Ergänzend benötigt werden Daten von einer möglichst breiten und repräsentativen Auswahl an Betrieben zu den Ertragserwartungen (für f_{Ertrag}), den

Zwischenkulturen (für f_{VF}), der mechanischen Bodenbearbeitung (für f_{Hacken}) und der Ausbringung von organischen Düngern (für f_{NOD}). Zusätzlich bräuchte es die gesamten N-Ausbringungsmengen (Hof-, Recycling- und Mineraldünger) für die Ableitung einer durchschnittlichen N-Düngung je Kultur und Betriebstyp. Auf einer solchen Datengrundlage lassen sich anschliessend präzisere und ggf. kulturspezifische Schätzungen zum kantonalen N-Einsparpotenzial im Ackerbau treffen.

Im Grasland könnte eine grobe Abschätzung des N-Einsparpotenzials prinzipiell über den mittleren N-Überschuss je Bewirtschaftungsintensität vorgenommen werden. Bei den vorliegenden Daten der Pilotbetriebe erschweren jedoch die beträchtlichen Unsicherheiten bei den Ertragsannahmen, der symbiotischen N-Fixierung, sowie der N-Nachlieferung durch die OS-Mineralisierung eine aussagekräftige Schätzung, zusätzlich zu der analog zum Ackerbau nicht-repräsentativen Bewirtschaftung (N_{tot} gedüngt). Ein erster Schritt zur Verringerung der Unsicherheiten könnte in der Verbesserung der Ertragsannahmen liegen, bspw. durch wiederholte Biomasse-Ertragserhebungen in Kombination mit der Erfassung der botanischen Zusammensetzung (s. auch Empfehlungen in Kapitel 6). Dadurch liesse sich der N-Entzug und N-Bedarf präziser bestimmen und zugleich die Ertragsannahmen basierend auf den GRUD überprüfen.



4.1 Erfahrungen aus den Pilotprojekten

4.1.1 Düngebedarfsoptimierung

Eine zentrale Erkenntnis dieses Projektes ist, dass die korrNorm nicht direkt auf das Grasland übertragbar ist und ihr Einsatz im Grasland daher nicht allgemein zu empfehlen ist. Die korrNorm wurde für Ackerkulturen entwickelt und validiert. Daher liegen für mehrere kulturspezifische Korrekturfaktoren (f_{VF} , f_{Regen} , f_{Hacken}) keine validierten Referenzwerte für Grasland vor. Zudem beruht die GRUD-Norm für Grasland auf einem mehrjährigen Ansatz und berücksichtigt bspw. die N-Nachlieferung aus regelmässigen Hofdüngerapplikationen, wodurch der Faktor f_{NOD} überflüssig wird. Nachfolgend wird die korrNorm ausschliesslich für den Ackerbau evaluiert, für das Grasland erfolgt anschliessend eine alternative Bewertung.

Ackerbau

Die Düngebedarfsermittlung nach korrNorm wurde rückwirkend für die Jahre 2020-2023 für 14 Pilotbetriebe und insgesamt 41 Datenpunkten à 11 verschiedenen Kulturen durchgeführt. Im Vergleich mit der Norm-Düngeempfehlung reduzierte die korrNorm die empfohlene N-Düngemenge um durchschnittlich -64 kg N ha^{-1} (entspricht der Summe aller Korrekturfaktoren). Für alle untersuchten Parzellen und Kulturen läge der nach korrNorm ermittelte N-Bedarf somit deutlich unter 90% der Norm-Düngeempfehlung. Dies würde dazu beitragen die Anforderungen für die Produktionssystem-Beiträge für den *Effizienten Stickstoffeinsatz* zu erfüllen, bei welchen (gesamtbetrieblich) die N-Düngemenge 90% des Bedarfs der Kulturen gemäss Suisse-Bilanz (ertragskorrigierte Normdüngung) nicht überschreiten darf (s. Kapitel 5.2).

Die Ausprägung und Zusammensetzung der Korrekturfaktoren variierten dabei zwischen den Parzellen, wie in **Abbildung 3** exemplarisch für alle Ackerbau-Parzellen des Jahres 2021 dargestellt. Generell hatten jedoch das OS-Mineralisierungspotenzial (f_{OSB}), die Vorkultur (f_{VF}) und die Ertragserwartung (f_{Ertrag}), gefolgt von der Nachwirkung der organischen Dünger aus dem Vorjahr (f_{NOD}) den grössten Einfluss.

Der Vergleich zwischen der N-Düngeempfehlung nach korrNorm und den tatsächlich ausgebrachten Mengen an verfügbarem Stickstoff (N_{verf}) ergab ein mittleres N-Einsparpotenzial von rund -21 kg N ha^{-1} , d.h. durchschnittlich wurden rund 21 kg N ha^{-1} mehr ausgebracht als der Düngebedarf gemäss korrNorm wäre. Bei einer entsprechenden Reduktion der Hofdünger-Ausbringungen könnten rund $0.15 \text{ t CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ an THG-Emissionen eingespart werden (s. Kapitel 2.1).

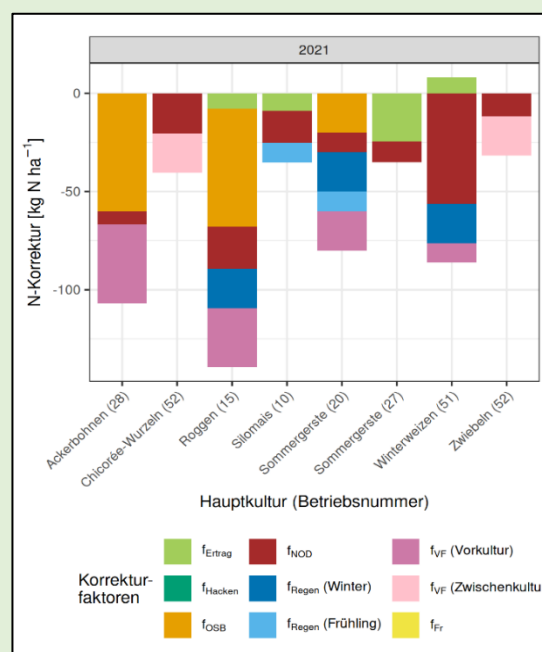


Abbildung 3: Zusammensetzung der Korrekturfaktoren der Düngebedarfsermittlung nach der Methode der korrigierten Normen für das Beispielsjahr 2021.



Auf Parzellenebene zeigten sich jedoch beträchtliche Unterschiede im N-Einsparpotenzial (**Abbildung 4**). Während einzelne Parzellen ausgehend von der Düngebedarfsermittlung nach korrNorm unterdüngt wurden (um bis zu 94 kg N ha^{-1}), wurden andere überdüngt (um bis zu 84 kg N ha^{-1}). Somit besteht für gewisse Betriebe das Potenzial durch eine gezieltere, betriebsinterne Verteilung der Düngemenge mittels der korrNorm parzellenspezifische Ungleichgewichte zu verkleinern. Die korrNorm dient dabei als Entscheidungshilfe, ersetzt jedoch nicht die kritische Begutachtung gemäss guter fachlicher Praxis durch die Bewirtschaftenden. Dies weil u.a. die zeitliche Verteilung des N-Bedarfs der Pflanzen nicht berücksichtigt wird und auch bei einer korrNorm empfohlenen N-Bedarfsmenge von 0 kg N ha^{-1} eine Startgabe aus pflanzenbaulichen Gründen durchaus angebracht sein kann.

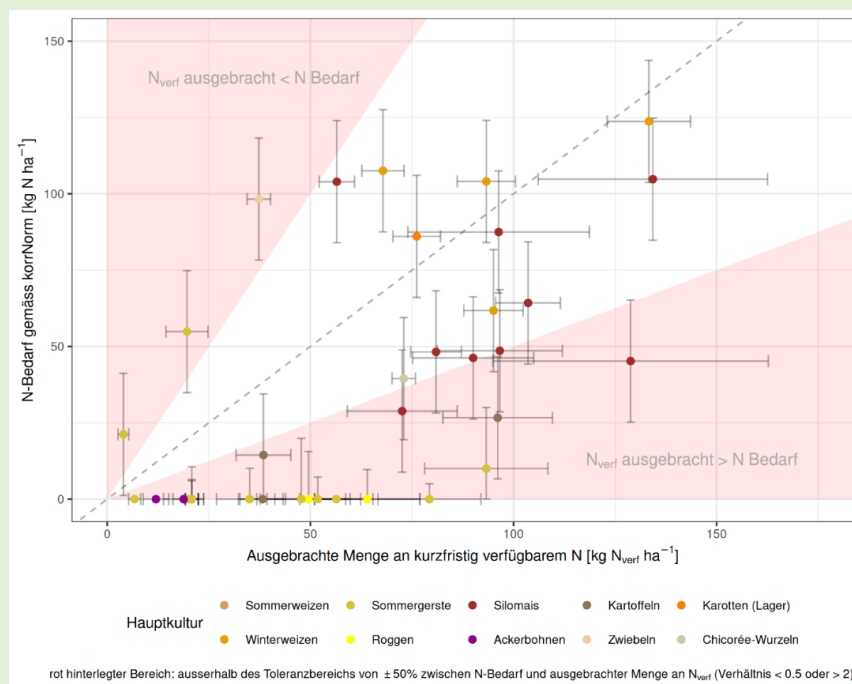


Abbildung 4: Vergleich des N-Bedarfs gemäss korrigierten Normen (korrNorm) mit den ausgebrachten Mengen an kurzfristig verfügbarem Stickstoff (N_{verf}) für einzelne Parzellen und Jahre. Die Differenz entspricht dem realisierbaren N-Einsparpotenzial. Punkte unterhalb der grau gestrichelten 1:1-Linie zeigen eine Überdüngung, Punkte darüber eine Unterschreitung des Bedarfs gemäss korrNorm. Die rot hinterlegten Bereiche zeigen eine Abweichung von über 50% an. Die Balken zeigen den Unsicherheitsbereich infolge der zugrundeliegenden Annahmen.

Grasland

Da bei Grasland die korrNorm nicht anwendbar ist, wurde zur Beurteilung der N-Versorgung ein Vergleich zwischen den N-Einträgen und N-Entzügen vorgenommen (**Abbildung 5**). Der N-Entzug wurde gemäss GRUD basierend auf der Bewirtschaftungsintensität und der Ertragsannahme geschätzt. Die N-Einträge setzen sich zusammen aus der ausgebrachten Menge an Gesamt-Stickstoff (N_{tot}), der atmosphärischen N-Deposition (für das Jahr 2020 gemäss FOEN, 2023), der symbiontischen N-Fixierung (geschätzt via GRUD S. 9/13 und Nucera et al., 2023), sowie der Nachlieferung durch die Mineralisierung der OS im Boden (geschätzt via GRUD und RothC-Modellierungen).

Sowohl die geschätzten N-Entzüge als auch die N-Einträge weisen dabei einen hohen Unsicherheitsbereich auf. Da im Grasland meist keine direkten Ertragsmessungen vorliegen, beruhen die N-Entzüge auf Ertragsannahmen, welche über Wiesenkalenderangaben und Schätzungen basierend auf der Höhenlage hergeleitet wurden

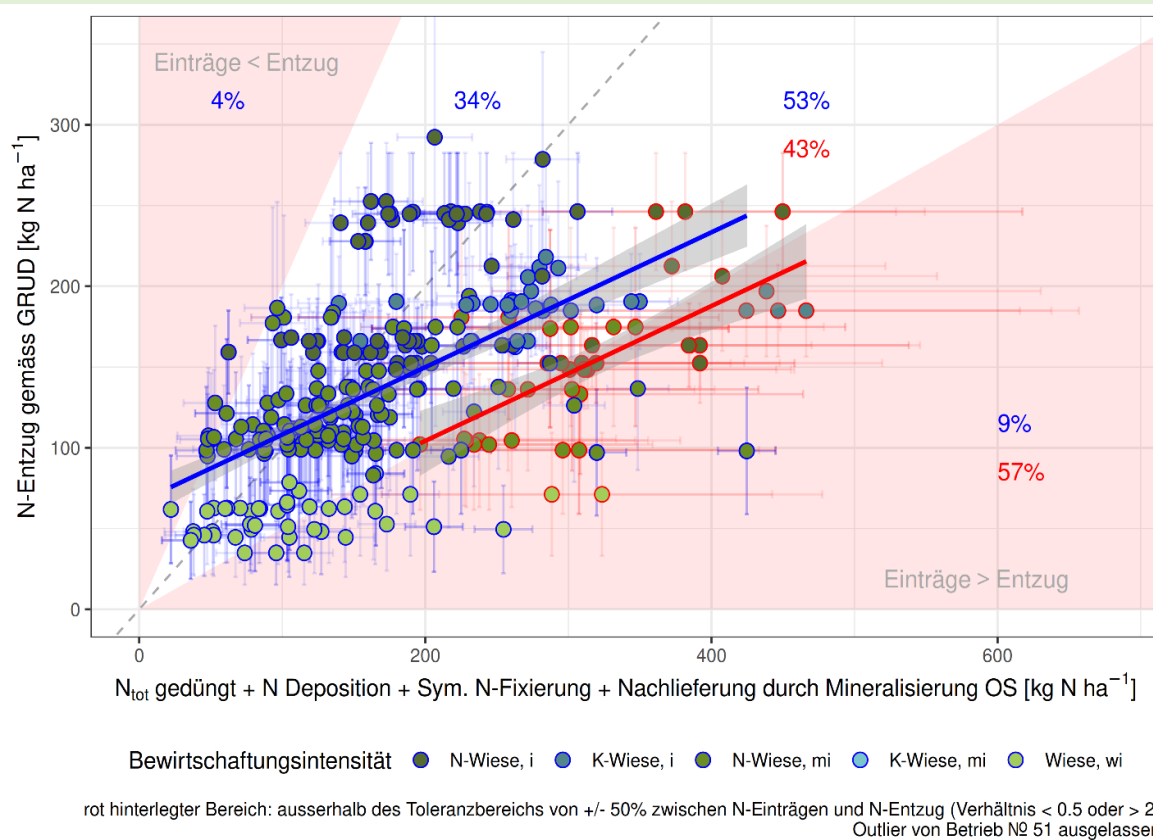


Abbildung 5: Gegenüberstellung der N-Einträge (aus der Düngung (N_{tot}), atmosphärischer N-Deposition, symbiontischer N-Fixierung und Nachlieferung durch die Mineralisierung der org. Substanz) mit dem N-Entzug. Die Balken zeigen den Unsicherheitsbereich der Annahmen zur Herleitung der N-Einträge und N-Entzüge an. Blau umrandete Punkte und Linien stellen die Herleitung der N-Nachlieferung durch die OS-Mineralisierung gemäss dem Korrekturfaktor f_{OSB} der korrNorm dar, während die rot-umrandeten Punkte und Linien die N-Nachlieferung gemäss Schätzungen basierend auf RothC-Modellierungen berücksichtigen. Werte unterhalb der 1:1-Linie (grau gestrichelt) zeigen einen Überschuss der N-Einträge im Vergleich zum N-Entzug an. Die rot hinterlegten Bereiche zeigen eine Abweichung von über 50% an. Die Prozentzahlen zeigen jeweils die Anteile der Parzelle (je nach Herleitung der N-Nachlieferung durch die OS-Mineralisierung) in jedem Bereich.

(Tabelle 1a der GRUD auf S. 9/4). Die ausgebrachten Mengen an N_{tot} wurden mittels Wiesenkalenderangaben und betriebsspezifischer Hofdüngeranalysen berechnet, wobei jedoch aufgrund der limitierten Anzahl Analysen die saisonalen und jährlichen Schwankungen der Nährstoffgehalte nicht berücksichtigt werden konnten. Bei den N-Einträgen weisen insbesondere die symbiontische N-Fixierung, welche stark abhängig ist vom geschätzten Leguminosen-Anteil, und die N-Nachlieferung durch die Mineralisierung der OS grosse Unsicherheiten auf.

Letztere wurde einerseits basierend auf dem Korrekturfaktor f_{OSB} der korrNorm abgeschätzt (blaue Punkte in **Abbildung 5**). Der f_{OSB} beschreibt die Korrektur der N-Düngung bei einer erhöhten (oder reduzierten) N-Nachlieferung, abhängig vom OS-Mineralisierungspotenzial, das anhand des OS- und Tongehalts des Bodens beurteilt wird (GRUD Tabelle 12, S. 8/23). Für die Parzellen der Pilotbetriebe, die alle ein mittleres bis sehr hohes Mineralisierungspotenzial aufwiesen, wird somit eine zusätzliche N-Nachlieferung von 0 bis 80 kg N ha⁻¹ angenommen. Dabei ist zu beachten, dass dies nicht der absoluten N-Nachlieferung entspricht, da ein nicht näher quantifizierter Grundumsatz vorausgesetzt wird. Andererseits wurde die N-Nachlieferung für gewisse Parzellen auch mittels



Modellierung der Kohlenstoffdynamik durch das Modell RothC (rote Punkte in **Abbildung 5**) geschätzt ($N\text{-Nachlieferung} = (C\text{-Eintrag} - \text{Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrates}) * \text{angenommenes } C:N\text{-Verhältnis von } 10:1$). Dies ergab mit einer mittleren N-Nachlieferung von rund 307 kg N ha⁻¹ etwa das fünffache der Abschätzung via f_{OSB} . Die tatsächliche N-Nachlieferung bleibt unbekannt, die beiden Ansätze können jedoch als untere und obere Richtwerte betrachtet werden.

Rund 4% der Parzellen wiesen deutlich höhere N-Entzüge als N-Einträge auf (blaue Punkte im oberen roten Bereich in **Abbildung 5**), was teilweise durch Unsicherheiten bei den Erträgen oder eine unvollständige Erfassung der N-Quellen mitbedingt wurde. Im Gegensatz dazu lagen je nach Herleitung der N-Nachlieferung zwischen 9% bis 57% der Parzellen im Bereich von mehr als doppelt so hohen Einträgen wie Entzügen (rot hinterlegter Bereich rechts unten in **Abbildung 5**). In diesem Bereich gilt das N-Management als nicht nachhaltig (per Definition der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft DLG, gemäss persönlicher Kommunikation (2025) mit B. Görlach, DLG). Für die in diesem Bereich liegenden Parzellen deutet dies aus Umweltperspektive auf ein erhöhtes Risiko für N-Verluste durch Nitratauswaschung und gasförmige Verluste über die Denitrifikation hin. Ein erheblicher Anteil, je nach Herleitung der N-Nachlieferung durch die Mineralisierung zwischen 43% und 87% der Parzellen, befand sich jedoch im Toleranzbereich von +/- 50% Abweichung zwischen N-Einträgen und N-Entzug. Dies verdeutlicht, dass obwohl Potenzial zur Optimierung besteht, ein grosser Teil der Flächen bereits bedarfsgerecht gedüngt wird. Die erheblichen Unsicherheitsbereiche zeigen, dass derzeit aufgrund der aktuellen Datenlage eine verlässliche Quantifizierung des N-Einsparpotenzials auf Graslandflächen nicht möglich ist.

4.1.2 Verknüpfung von Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf

Die Kreisläufe von Stickstoff und Kohlenstoff sind eng über zentrale Prozesse wie den mikrobiellen Abbau und die Bildung von Bodenkohlenstoffvorräten miteinander verknüpft. Die Art und die Menge der organischen Düngung haben dabei einen bedeutenden Einfluss auf die Dynamik beider Kreisläufe. Um die Auswirkungen von Veränderungen in der Düngung auf die Bodenkohlenstoffvorräte in Naturwiesen abschätzen zu können, wurde die Kohlenstoffdynamik bis ins Jahr 2050 mit RothC (Coleman et al., 1997; Jenkinson, 1990; Keel et al., 2025) modelliert¹.

Die Modellierungen zeigen, dass die Entwicklung des Bodenkohlenstoffvorrates wesentlich vom Verhältnis des Kohlenstoffeintrags zum bestehenden Vorrat an Bodenkohlenstoff abhängt. Bei niedrigen bis mittleren Anfangsvorräten (im Vergleich zu allen analysierten Parzellen im Projekt) zeigte sich ein Trend zur Stabilisierung bzw. zur Steigerung des Bodenkohlenstoffvorrates bis 2050, während bei hohen Anfangsvorräten trotz gleich hohen Einträgen an organischem Kohlenstoff (C_{org}) ein abnehmender Trend zu beobachten war. Dies ist in Übereinstimmung mit Langzeitbeobachtungen (Wiesmeier et al., 2025) und widerspiegelt die Schwierigkeit, hohe Bodenkohlenstoffvorräte zu erhalten, die historisch durch stabilisierende Faktoren (wie kühles, nasses Klima oder hohe Lehm- und Tongehalte) begünstigt wurden und nun insbesondere durch klimawandelbedingte Veränderungen in Niederschlags- und Temperaturmustern gefährdet sind (Bright et al., 2025; Kühnel et al., 2019; Wiesmeier et al., 2025).

Eine Möglichkeit zur Erhaltung resp. der Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrates, liegt in der Wahl der organischen Dünger. Würde beispielsweise statt Mist kompostierter Mist eingesetzt, sinkt zwar die Höhe der C_{org} -Einträge (infolge des Abbaus der OS während der Kompostierung), die höhere Stabilität des eingetragenen C_{org} bei Kompost kann dies jedoch allenfalls ausgleichen (Keel et al., 2025). Die Modellierungen zeigten daher beim Einsatz von Kompost im Vergleich zur Düngung mit Mist einen tendenziell höheren Anstieg, respektive eine tendenziell geringere Abnahme der Bodenkohlenstoffvorräte. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es während des Kompostierungsprozesses zu N-Verlusten kommt (s. Faktenblatt Mistkompostierung) und die kurzfristige Verfügbarkeit

¹ Detaillierte Informationen zur Modellierung werden in einem fachlichen Abschlussbericht festgehalten.



von N im Kompost niedriger ist als bei Mist. Aufgrund der langjährigen Auslegung der Düngeplanung im Grasland, sowie der teils bestehenden N-Überschüsse (**Abbildung 5**), scheint diese kurzfristige Verringerung an N_{verf} jedoch vertretbar.

Anders verhält es sich bei der Ausbringung von anaerob vergorener Gülle (Gärgülle). Die höhere Stabilität des eingetragenen Kohlenstoffs kann die niedrigeren C_{org} -Einträge über die Gärgülle (in Folge des OS-Abbaus während der Vergärung) vermutlich nicht vollständig kompensieren. Die Modellierungen ergaben geringfügig niedrigere Bodenkohlenstoffvorräte im Vergleich mit der Ausgangssituation, wobei die Differenzen jedoch vermutlich innerhalb des Unsicherheitsbereichs der Modellierungen lagen. Höhere Mengen an Gärgülle würden zwar die C_{org} -Einträge ausgleichen, gleichzeitig aber auch die N-Einträge, insbesondere in Form von Ammonium, steigern und damit das Risiko für N-Verluste in die Umwelt erhöhen.

Die Modellierungen, welche die Basis für die beschriebenen Trends bilden, sind als grobe Abschätzungen der potenziellen Kohlenstoffentwicklung basierend auf einem relativ einfachen Modell zu verstehen. Die Aussagekraft ist u.a. durch die limitierte Datenverfügbarkeit (betreffend Lagerungsdichte und Steingehalte) eingeschränkt. Ungeachtet dieser Unsicherheiten zeigen die Trends, dass eine Veränderung der Düngung die Bodenkohlenstoffvorräte beeinflussen können. Dabei gilt es unterschiedliche Ziele abzuwägen, je nachdem ob bspw. die Förderung der Bodenkohlenstoffvorräte oder die Erhöhung des Anteils an kurzfristig verfügbarem N im Fokus stehen soll. Langfristig können klimatische Veränderung die Stabilität der Kohlenstoffvorräte im Boden beeinträchtigen (Wiesmeier et al., 2025), weshalb eine fortlaufende Langzeitbeobachtung der Bodenkohlenstoffvorräten in Kombination mit der Erhebung der Düngepraxis zentral sind.

5 Förderung und Überwachung

5.1 Monitoring, Reporting and Verification

Eine Validierung des N-Einsparpotenzials durch die Düngebedarfsermittlung gemäss korrNorm könnte mittels On-Farm-Versuchen erfolgen. Ein Beispiel dafür ist das Projekt *CriticalN* in der Region Gäu-Niederbipp, bei dem verschiedene Methoden zur (standortangepassten) N-Düngebedarfsempfehlung (korrNorm , N_{min} -Methode, Betriebsstandard, Düngungsnorm) auf Praxisbetrieben verglichen werden, um die Reduktion der Nitratauswaschung zu validieren.

Dazu sollten folgende Daten erhoben werden:

- Düngung: Art und Menge der applizierten Dünger, inkl. Analyse der Nährstoffgehalte bei Hofdüngern
- Zur besseren Vergleichbarkeit und Erfassung der lokalen Boden- und Umweltbedingungen empfiehlt sich zudem das Anlegen einer Nulldüngungsparzelle.

- Ertrag: Menge und Qualität, z.B. Gehalte relevanter Nährstoffe oder Inhaltsstoffe
- Gehalt an Ton und OS im Boden: Einerseits zur Bestimmung des Korrekturfaktors f_{OSB} der korrNorm , andererseits für die Evaluation der Veränderung der Bodenfruchtbarkeit bei einem mehrjährigen Versuchsdesign.

Die auf dieser Grundlage erhobenen Daten ermöglichen eine Validierung des N-Einsparpotenzials, sowie eine darauf basierende Schätzung der THG-Einsparungen. Zudem lässt sich der Effekt einer optimierten Düngebedarfsempfehlung auf den Ertrag überprüfen. Um Erkenntnisse über die langfristigen Auswirkungen angepasster Düngepraktiken auf die Bodenfruchtbarkeit zu gewinnen, wäre eine kontinuierliche, mehrjährige Durchführung solcher Versuche zu empfehlen.

Auf übergeordneter, kantonaler Ebene würde die Erfassung der im gesamten Kanton ausgebrachten Mineral- und Hofdüngermengen (bspw. mittels Suisse-Bilanz, HODUFLU oder anderen digitalen Umsetzungen) dazu beitragen, einen generellen



Trend abzubilden, aber auch den Fortschritt in Bezug auf den Absenkpfad Nährstoffverluste und die Umweltziele der Schweizer Agrarpolitik abzubilden.

5.2 Existierende und mögliche weitere Förderprogramme und Instrumente

Es gibt keine Förderprogramme, welche die Anwendung der korrNorm direkt unterstützen. Allerdings kann die korrNorm dazu beitragen, die Produktionssystembeiträge für den effizienten N-Einsatz ([Art. 71e DZV](#)) gezielt zu erreichen, auch bei hoher Produktionsintensität. Diese Beiträge sind finanzielle Anreize in der Höhe von 100 CHF pro Hektare und Jahr für ressourcenschonende Bewirtschaftung und werden gewährt, wenn die gesamtbetriebliche N-Zufuhr 90% des Bedarfs der Kulturen gemäss Suisse-Bilanz nicht übersteigt.

6 Fazit und Empfehlungen

Die standortangepasste N-Düngung trägt zur Reduktion von N-Überschüssen bei und somit auch zur Verringerung von N-Verlusten in die Umwelt und THG-Emissionen.

Im Ackerbau steht mit der korrNorm dafür eine belegte und kosteneffiziente Methode basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft zur Verfügung (Guillaume et al., 2023). Die rückwirkende N-Düngebedarfsermittlung nach der korrNorm hätte bei den Pilotbetrieben im Vergleich mit den tatsächlich eingesetzten N-Düngermengen zu N-Einsparungen von durchschnittlich -21 kg N ha^{-1} geführt. Bei entsprechender Reduktion der Hofdüngerausbringungen würde dies einer THG-Emissionsminderung von etwa $-0.15 \text{ t CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ entsprechen.

Für das Grasland ist eine Anwendung der korrNorm aufgrund methodischer Differenzen nicht zu empfehlen. Die Auswertung der N-Entzüge und N-Einträge ergab, dass ein erheblicher Anteil der Parzellen im tolerierbaren Bereich von weniger als 50% Abweichung lag, es jedoch auch Parzellen mit erhöhtem Risiko für N-Verluste in die Umwelt gab. Aufgrund der eingeschränkten Datengrundlagen ist eine aussagekräftige Quantifizierung des N-Einsparpotenzials im Grasland aktuell schwierig.

Insgesamt zeigt sich, dass eine gezielte Optimierung der Düngepraxis in Graubünden nicht nur ein relevantes Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen bietet, sondern auch zur effizienteren Nährstoffnutzung und zur Minderung der Umweltbelastung beitragen kann. Um dieses Potenzial zu realisieren, braucht es jedoch weitere Investitionen in solide Datengrundlagen und geeignete technische Hilfsmittel.

Basierend auf den Resultaten und Erkenntnissen aus dem Projektverlauf lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

Ziel: Förderung und Umsetzung einer standortangepassten N-Düngung

Gemäss einer stichprobenartigen Umfrage unter den Pilotbetrieben ($n=27$) erstellen lediglich rund 15% der Umfrageteilnehmer für alle Parzellen eine Düngeplanung. Im Durchschnitt wären die Umfrageteilnehmer jedoch bereit, rund 10 Minuten pro Parzelle in die Düngeplanung zu investieren, was das Potenzial und die Bereitschaft für die Düngeoptimierung aufzeigt.

- Ebene Parzelle:
 - Ackerbau: N-Düngebedarfsermittlung nach korrNorm oder nach der $N_{\min}$ -Methode:** Neben der korrNorm ist die $N_{\min}$ -Methode eine weitere Möglichkeit zur standortangepassten Düngebedarfsermittlung im Ackerbau. Dabei wird der N-Bedarf basierend auf Messungen des mineralischen Stickstoffs ($N_{\min}$ = Summe von Ammonium und Nitrat) bestimmt (GRUD, S. 8/24 f.).
 - Grasland: Düngung nach Bewirtschaftungsintensität und Ertragsniveau** (gemäss GRUD-Kapitel 9 und ggf. auf Grundlage von Ertragsmessungen, s. auch letzter Punkt)
- Ebene Betrieb:
 - Regelmässige Hofdüngereanalysen:** Eine regelmässige Nährstoff-Analyse der Hofdünger ist empfehlenswert, um die Auswirkungen von Umwelteinflüssen und saisonalen Schwankungen, wie bspw. die Verdünnung durch ein niederschlagsreiches Frühjahr, bei der Düngeplanung berücksichtigen zu können. Da



Laboranalysen zeitaufwändig und kostspielig sind, könnten auch vor Ort einsetzbare Analysemethoden wie der «TS-Schwimmer» von Interesse sein. Solche Verfahren werden zurzeit u.a. von der Versuchsstation Luzern getestet.

- Auf übergeordneter Ebene:
Bereitstellung eines geeigneten digitalen Tools für die Düngeplanung: Um eine breite Anwendung zu fördern, sollte die korrNorm in bestehende Systeme (Feld-/Wiesenkaler) integriert und als benutzerfreundliches digitales Werkzeug zur Verfügung gestellt werden. Agroscope stellt in Zukunft dazu die Grundlagen (digitale Version der GRUD-Inhalte) bereit, eine Umsetzung in ein Betriebstool liegt in der Verantwortung privater Anbieter oder kantonalen Stellen, wie z.B. Düngeberatung. Eine stichprobenartige Umfrage unter den Pilotbetrieben ($n = 27$) hat ergeben, dass bei einem zukünftigen digitalen Tool zur Düngeplanung besonderen Wert auf eine benutzerfreundliche Bedienung und nahtlose Schnittstellen zu anderen bestehenden Programmen gelegt (bspw. digitalen Feldkalendern, AGIS, etc.) werden sollte, um Doppelspurigkeit zu vermeiden.

Ziel: Monitoring der N- und THG-Einsparungen durch die standortangepasste N-Düngung

- Ebene Projekt:
Einheitliche Feld- und Wiesenkaler: Unterschiede in der Ausführlichkeit der Wiesen- und Feldkalender erschweren die Berechnung der ausgebrachten N-Mengen und schränken die Verlässlichkeit der Resultate ein. Abhilfe könnte durch gezielte Beratung und Schulung sowie durch Unterstützung bei der Datenerhebung geschaffen werden.
Analytische Bestimmung des Bodenkohlenstoffgehalts: Auch das Fehlen oder die unzureichende Qualität der Bodenanalysen können die Resultate beeinflussen. So werden für die Berechnung des Korrekturfaktors f_{OSB} die Ton- und OS-Gehalte des Bodens benötigt, wobei eine analytische Bestimmung des C_{org} -Gehalts einer

im ÖLN-Verfahren üblichen Fühlprobe vorgezogen werden (Hirte et al., 2022).

N_{min}-Beprobungen im Grasland: Gezielte saisonale N_{min}-Beprobungen helfen, die im Boden verfügbare Menge an N_{min} und damit das Risiko einer Nitratauswaschung besser einzuschätzen (Nyfeler et al., 2024). Dabei wäre insbesondere der Vergleich zwischen Herbst und Frühling interessant, um die Nitratauswaschung während der Wintermonate quantifizieren zu können.

Ziel: Weiterentwicklung der standortangepassten N-Düngung

- Auf übergeordneter Ebene:
Fernerkundungsbasierte Ertragsschätzung im Grasland: Eine zentrale Einschränkung sind die unsicheren Ertragsschätzungen im Grasland. Zur deren Verbesserung ist die regelmässige Bestimmung der Erträge hilfreich und notwendig. Konventionelle Erhebungsmethoden wie bspw. das Wiegen, liefern direkte Messwerte, sind jedoch arbeitsintensiv, lokal begrenzt und somit nur schwer skalierbar. Langfristig und grossflächig sollten deshalb Ansätze zur Biomasse-Ertragsschätzung durch Fernerkundungsinstrumente angestrebt werden. Die Vorteile solcher Methoden liegen in der Anwendbarkeit über grosse räumliche Gebiete mit unterschiedlichen Höhenlagen und klimatischen Bedingungen, sowie in der hohen zeitlichen Auflösung (Graswachstum) (Klingler et al., 2025; Reiner mann et al., 2020). Die Qualität solcher Modellschätzungen und ihre Übertragbarkeit in die Praxis hängen allerdings wesentlich von der Verfügbarkeit von geeigneten Referenzdaten unter realen Bewirtschaftungsbedingungen («ground truth data») ab. Deshalb sollten auch konventionelle Ertragserhebungen künftig gezielt und standardisiert über mehrere Standorte, Bewirtschaftungsintensitäten und Jahre hinweg durchgeführt werden, um die für die Entwicklung von fernerkundungsbasierten Modellen notwendigen Referenz- und Validierungsdaten zu sammeln (Klingler et al., 2025).



7 Literatur

- Alig, M., Prechsl, U., Schwitter, K., Waldvogel, T., Wolff, V., Wunderlich, A., Zorn, A., & Gaillard, G. (2015). Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz. *Agroscope Science*, 29.
- Argento, F., Schwarz, A., Bischoff, W.-A., Hug, R., & Liebisch, F. (2025). *Jahresbericht CriticalN - Teil Ackerbau 2024* [Kumulativer Jahresbericht CriticalN]. Agroscope, Gutachterbüro TerrAquat, AfU Kanton Solothurn.
- BLW, BLV, & BAFU. (2023). *Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050, 2. Teil: Massnahmenplan*. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV, Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Bright, K., Dienes, B., Keiluweit, M., Rixen, C., & Aepli, M. (2025). Climate change impacts on organic carbon cycling in European alpine soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 210, 109891. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109891>
- Coleman, K., Jenkinson, D. S., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klír, J., Körschens, M., Poulton, P. R., & Richter, D. D. (1997). Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 81(1), 29–44. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00079-7)
- Dalgaard, T., Bienkowski, J. F., Bleeker, A., Dragosits, U., Drouet, J. L., Durand, P., Frumau, A., Hutchings, N. J., Kedziora, A., Magliulo, V., Olesen, J. E., Theobald, M. R., Maury, O., Akkal, N., & Cellier, P. (2012). Farm nitrogen balances in six European landscapes as an indicator for nitrogen losses and basis for improved management. *Biogeosciences*, 9(12), 5303–5321. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5303-2012>
- FOEN. (2023). *Nitrogen deposition 2020* [Dataset]. <https://opendata.swiss/en/dataset/stickstoffdeposition>
- FOEN. (2024). *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2022: National Inventory Document and reporting tables. Submission of 2024 under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Federal Office for the Environment FOEN.
- Gao, Y., & Cabrera Serrenho, A. (2023). Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. *Nature Food*, 4(2), 170–178. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w>
- Grossrieder, J., Ringger, C., Argento, F., Grandgirard, R., Anken, T., & Liebisch, F. (2022). Standortangepasste Stickstoffdüngung: Aktuelle Methoden und Erfahrungen. *Agrarforschung Schweiz*, 13, 103–113. <https://doi.org/10.34776/AFS13-103G>
- Guillaume, T., Carlen, C., Gilgen, A., & Liebisch, F. (2023). *Düngebedarfsermittlung nach korrigierten Normen* (No. 201; Agroscope Merkblatt). Agroscope.
- Hergoualc'h, K., Akiyama, H., Bernoux, M., Chirinda, N., del Prado, A., Kasimir, Å., MacDonald, J. D., Ogle, S. M., Regina, K., & van der Weerden, T. J. (Hrsg.). (2019). N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Bd. 4). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Hirte, J., Liebisch, F., Heller, O., Weisskopf, P., Weyermann, I., Baumann, P., Keller, A., & Bürge, D. (2022). Die Schweizer Bestimmungsmethoden für pflanzenverfügbare Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Boden. *Agroscope Science*, 129. <https://doi.org/10.34776/as129g>
- Hoxha, A., & Christensen, B. (2019). *The Carbon Footprint of Fertiliser Production: Regional Reference Values* (Proceedings 805, S. 21). International Fertiliser Society.
- Huddell, A. M., Galford, G. L., Tully, K. L., Crowley, C., Palm, C. A., Neill, C., Hickman, J. E., & Menge, D. N. L. (2020). Meta-analysis on the potential for increasing nitrogen losses from intensifying tropical agriculture. *Global Change Biology*, 26(3), 1668–1680. <https://doi.org/10.1111/gcb.14951>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jenkinson, D. S. (1990). The turnover of organic carbon and nitrogen in the soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 329(1255), Article 1255. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0177>
- Keel, S. G., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Levavasseur, F., Zhi, L., Mondini, C., Plaza, C., & Leifeld, J. (2025). Efficiency of Plant Biomass Processing Pathways for Long-Term Soil Carbon Storage. *European Journal of Soil Science*, 76(2), e70074. <https://doi.org/10.1111/ejss.70074>

- Klingler, A., Dujakovic, A., Vuolo, F., Mayer, K., Gaier, L., Pötsch, E. M., & Schaumberger, A. (2025). Prediction of grassland yield in Austria: A machine learning approach based on satellite, weather, and extensive in situ data. *European Journal of Agronomy*, 170, 127701. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127701>
- Kühnel, A., Garcia-Franco, N., Wiesmeier, M., Burmeister, J., Hobley, E., Kiese, R., Dannenmann, M., & Kögel-Knabner, I. (2019). Controlling factors of carbon dynamics in grassland soils of Bavaria between 1989 and 2016. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 280, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.036>
- Maltas, A., Charles, R., Pellet, D., Dupuis, B., Levy, L., Baux, A., Jeangros, B., & Sinaj, S. (2015). Evaluation zweier Methoden für eine optimale Stickstoffdüngung im Ackerbau. *Agrarforschung Schweiz*, 6(3), 84–93.
- Möhring, A. (2023). Analyse des Hofdüngermarktes in der Schweiz: Zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung. *Agroscope Science*, 146. <https://doi.org/10.34776/as146g>
- 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. <https://doi.org/10.34776/as164e>
- Nyfeler, D., Huguenin-Elie, O., Frossard, E., & Lüscher, A. (2024). Effects of legumes and fertiliser on nitrogen balance and nitrate leaching from intact leys and after tilling for subsequent crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108776. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108776>
- Reinermann, S., Asam, S., & Kuenzer, C. (2020). Remote Sensing of Grassland Production and Management—A Review. *Remote Sensing*, 12(12), 1949. <https://doi.org/10.3390/rs12121949>
- Rockström, J., Donges, J. F., Fetzer, I., Martin, M. A., Wang-Erlandsson, L., & Richardson, K. (2024). Planetary Boundaries guide humanity's future on Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(11), 773–788. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00597-z>
- Rosas, F., Babcock, B. A., & Hayes, D. J. (2015). Nitrous oxide emission reductions from cutting excessive nitrogen fertilizer applications. *Climatic Change*, 132(2), 353–367. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1426-y>
- Schulte-Uebbing, L. F., Beusen, A. H. W., Bouwman, A. F., & de Vries, W. (2022). From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature*, 610(7932), 507–512. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05158-2>
- Sinaj, S., & Richner, W. (Hrsg.). (2017). *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD)* (Spezialpublikation, Bd. 6). Agroscope.
- Tanner, E., Liebisch, F., & Bretscher, D. (2024). N-Düngereinsparungen mittels der korrigierten Normen: Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO₂ncept. *Agrarforschung Schweiz*, 15, 304–312. <https://doi.org/10.34776/AFS15-304G>
- Wang, C., Amon, B., Schulz, K., & Mehdi, B. (2021). Factors That Influence Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils as Well as Their Representation in Simulation Models: A Review. *Agronomy*, 11, 770. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040770>
- Wiesmeier, M., Burmeister, J., Garcia-Franco, N., & Sümmerner, M. (2025). Long-term changes (1986–2016) in soil organic carbon and nitrogen in agricultural soils of Bavaria. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 394, 109874. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109874>
- Yara. (2023). *Integrated Report 2023: Building resilience and a nature-positive food future*. Yara. <https://www.yara.com/sites-as-sets/investors/057-reports-and-presentations/annual-reports/2023/yara-integrated-report-2023.pdf>