



# Jahresbericht **CriticalW**

## Teil Ackerbau - 2024

### Autoren und Autorinnen

F. Argento, A. Schwarz<sup>1</sup>, W. A. Bischoff<sup>1</sup>, R. Hug<sup>2</sup>, F. Liebisch

### Partner

<sup>1</sup>Gutachterbüro TerrAquat

<sup>2</sup>AfU – Kanton Solothurn

Mit Hilfe von Bildungszentrum Wallierhof – Kanton Solothurn  
und Inforama – Kanton Bern

«Dieser Bericht wurde mit Unterstützung des **BAFU**  
und **BLW** verfasst»



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF  
**Agroscope**



## Impressum

---

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich <a href="http://www.agroscope.ch">www.agroscope.ch</a>
Finanzierung	Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Landwirtschaft BLW
Auskünfte	<a href="#">Das Forschungsprojekt CriticalN</a> Aktuelle Daten aus Projekt (Kontakte)
Redaktion	F. Argento, F. Liebisch
Fotos	F. Argento
Titelbild	F. Argento
Download	PDF auf Anfrage erhältlich
Copyright	© Agroscope 2025
Kontakte	<a href="mailto:nitratprojekt@agroscope.admin.ch">nitratprojekt@agroscope.admin.ch</a> <a href="mailto:francesco.argento@agroscope.admin.ch">francesco.argento@agroscope.admin.ch</a> <a href="mailto:frank.liebisch@agroscope.admin.ch">frank.liebisch@agroscope.admin.ch</a>

---

### 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

<b>Inhalt</b>	<b>3</b>
<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>5</b>
1.1 Die Problematik in Kürze	5
1.2 Das Nitratprojekt und CriticalN	5
<b>2 Methoden im Projekt</b>	<b>7</b>
2.1 Düngungsmethoden	7
2.2 Versuchsdesign und Datenerhebung	9
2.3 Evaluationsindikatoren	10
<b>3 Stand der Forschungsarbeiten des Projekts</b>	<b>12</b>
3.1 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2022	12
3.2 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2023	13
3.3 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2024	15
<b>4 Ergebnisse – 2022</b>	<b>16</b>
4.1 Feldsaison 2022	16
<b>5 Ergebnisse – 2023</b>	<b>23</b>
5.1 Feldsaison 2023	23
<b>6 Ergebnisse – 2024</b>	<b>31</b>
6.1 Feldsaison 2024	31
<b>7 Allgemeine Diskussion und erste Schlussfolgerungen</b>	<b>45</b>
7.1 Wetterbedingungen	45
7.2 $N_{\min}$ Dynamik	45
7.3 N Düngempfehlungen	45
7.4 N-Bilanz und N-Auswaschung	46
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>47</b>
<b>9 Anhang</b>	<b>48</b>
9.1 Preisliste für Düngung bei Landor im Dezember 2022	48
9.2 Grundwasserstand im Gäu (Kestenholz) im 2022	49
9.3 Korrigierte $N_{\min}$ Werte mit Faktor x2 und berechnete Empfehlungen	50
9.4 Tabelle 8/9 - GRUD 2017	50

## Vorwort

Der folgende Bericht ist als iterativer Bericht für die gesamte Dauer des Projekts gedacht. Konkret bedeutet das, dass der Bericht jedes Jahr mit den neuen Daten und dem Stand des Projekts ergänzt wird, während bestimmte Teile, wie die Einleitung und die Methoden, im Wesentlichen gleichbleiben. Auf diese Weise werden die Leserinnen und Leser regelmässig mit neuen Informationen versorgt und am Ende ist die Projektentwicklung gut nachvollziehbar.

## Zusammenfassung

Die Region zwischen Niederbipp, Oensingen und Olten gehört zu den wichtigsten Trinkwasserressourcen im Kanton Solothurn. Gleichzeitig gehört der Talboden dieser Region auch zu den wichtigsten Acker- und Gemüsebaugebieten im Kanton. Aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung und der ungünstigen hydrogeologischen Gegebenheiten ist das Grundwasser in dieser Region übermässig mit Nitrat belastet, sodass das Qualitätsziel der eidg. Gewässerschutzverordnung (GSchV) für Grundwasser von 25 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup> vielerorts nicht eingehalten wird (Quelle: AfU SO, 2022). Seit dem Jahr 2000 wird deshalb das schweizweit grösste Nitratprojekt umgesetzt. Mit geeigneten und breit abgestützten Massnahmen sollen die Nitratwerte dauerhaft unter das gesetzliche Qualitätsziel für Grundwasser von 25 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup> gesenkt werden.

Das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten wird in der vierten Projektperiode vom Forschungsprojekt CriticalN wissenschaftlich begleitet. Das Wirkungsziel ist, durch angepasste Massnahmen die durchschnittlichen **N-Verluste ins Grundwasser** aus landwirtschaftlich genutzten Flächen unter **30 kg N ha<sup>-1</sup>** zu halten.

Agroscope und TerrAquat haben zusammen mit den Beratern des Kantons Solothurn (Bildungszentrum Wallierhof) und des Kantons Bern (Bildungszentrum Inforama) sowie dem Amt für Umwelt des Kantons Solothurn ein Betriebsnetzwerk aufgebaut. Im Jahr 2022 nahmen neun Betriebe an dem Projekt teil. So standen 20 Parzellen mit 6 verschiedenen Kulturen im Versuch. Im Jahr 2023 nahmen 16 Betriebe an dem Projekt teil. So standen 32 Parzellen mit 7 verschiedenen Kulturen im Versuch, hauptsächlich Winterweizen und Silo- und Körnermais (62%), aber auch Raps, Gerste, Dinkel, Zuckerrüben und Kunstwiese.

Gemäss den «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017) werden in der Schweiz, neben den GRUD-Normen der einzelnen Kulturen, zwei Methoden zur Berechnung einer angepassten N- Düngermenge verwendet: (i) die N<sub>min</sub>-Methode, (ii) die Methode der korrigierten Normen. Die Methoden werden in drei Arten von Feldanwendungen von geringem bis hohem Bedarf an Begleitung getestet. Wenn möglich ist eine Nullparzelle ohne Düngung im Feld angelegt, was der Kontrolle und Einschätzung der N-Nachlieferung dient.

Die Daten aus den Saisons 2022, 2023 und der grösste Teil der Saison 2024 liegen vor. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Witterung, die Fruchtfolge und die Düngestrategien einen erheblichen Einfluss auf Ertrag, Stickstoffeffizienz und Verluste haben. Winterweizen, als Hauptkultur, erreichte eine hohe Stickstoffnutzungseffizienz (85%) und stabile Erträge, während die Proteingehalte unter N<sub>min</sub>- und Korrigierte-Norm-Behandlungen etwas niedriger ausfielen. Andere Kulturen wie Silomais und Zuckerrüben zeigten stabile Erträge bei gleichzeitig geringen Auswaschungsverlusten, während Winterweizen nach spät geernteten Kulturen höhere Auswaschungsraten aufwies. Nullparzellen wiesen durchweg geringere Verluste auf. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung standortspezifischer Düngestrategien, um Erträge zu sichern und Umweltbelastungen zu minimieren.

# 1 Einführung

## 1.1 Die Problematik in Kürze

Die Grundwasserleiter der Region zwischen Niederbipp, Oensingen und Olten gehört zu den wichtigsten Trinkwasserressourcen im Kanton Solothurn. Gleichzeitig gehört der Talboden dieser Region auch zu den wichtigsten Acker- und Gemüsebaugebieten im Kanton.

Stickstoff, der hauptsächlich durch Düngung zugeführt wird, kann in Form von Nitrat ins Grundwasser ausgewaschen werden. Aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung und der ungünstigen hydrogeologischen Gegebenheiten ist das Grundwasser in dieser Region übermässig mit Nitrat belastet, sodass das Qualitätsziel der eidg. Gewässerschutzverordnung (GSchV) für Grundwasser von 25 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup> vielerorts nicht eingehalten wird (Quelle: AfU SO, 2022).

## 1.2 Das Nitratprojekt und CriticalN

Seit dem Jahr 2000 wird deshalb das schweizweit grösste Nitratprojekt umgesetzt. Mit geeigneten und breit abgestützten Massnahmen sollen die Nitratwerte im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, dauerhaft auf die gesetzliche Anforderung von 25 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup> gemäss GSchV gesenkt werden. Gleichzeitig soll die landwirtschaftliche Produktion erhalten und das Einkommen der Landwirtinnen und Landwirte gesichert werden. Für Nachteile, welche durch die getroffenen Massnahmen entstehen, werden die Landwirtinnen und Landwirte entschädigt.

Dank diesen Anstrengungen sind die Nitratwerte im Grundwasser nicht weiter angestiegen und weisen teilweise bereits rückläufige Trends auf. Sie liegen aber noch immer über 25 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup>. Der Grenzwert nach der TBDV für Trinkwasser von 40 mg Nitrat Liter<sup>-1</sup> wurde dank der Zusammenarbeit mit den Landwirtinnen und Landwirten aber in keiner der Trinkwasserfassungen jemals überschritten. (Quelle: AfU SO, 2022).

### 1.2.1 Die früheren Projektperioden 1.-3. 2000-2021

Die Massnahmen beschränkten sich auf den Ackerbau, da dieser den grössten Flächenanteil aufweist. Die Massnahmen bestanden aus der Stilllegung von produktivem Ackerland und nitratarmen Ackerbau nach den Vorgaben des Nitratindex (Fruchtfolge, Winterbegrünung, Bodenbearbeitung und Saatzeitpunkt im Spätsommer/Herbst). Mit Ausnahme eines Düngeverbotsfensters im Winter wurde die Düngung aber nicht als eigentliche Massnahmen einbezogen. (Quelle: AfU SO, 2022).

### 1.2.2 Das Forschungsprojekt NitroGäu 2017-2021

Die Untersuchungen dieses Forschungsprojekts zeigen, dass im Ausbringungsjahr von Hof- und Mineraldünger der von Pflanzen nicht aufgenommene Stickstoff hauptsächlich in der organischen Bodensubstanz eingebaut und gespeichert wird. Ein Teil dieses in der organischen Bodensubstanz gespeicherten Stickstoffs wird in den Folgejahren wieder in pflanzenverfügbares Nitrat umgewandelt (mineralisiert).

Der grosse Stickstoffvorrat im Boden und die spätere Nachlieferung von Nitrat aus diesem Bodenreservoir wurde bis anhin nicht für die Düngung berücksichtigt. Aus dieser Erkenntnis wurde abgeleitet, dass zur Zielerreichung prioritär eine standortangepasste Düngung erforderlich ist, welche die Nitratnachlieferung aus dem Bodenreservoir, die Nachlieferung aus Hofdüngern bzw. organischen Düngern selbst und die Vorfrucht künftig adäquat berücksichtigt. (Quelle: AfU SO, 2022; Frick, 2022).

### 1.2.3 Die aktuelle 4. Projektperiode 2022-2026 «Nitratprojekt NGO»

Die hydrogeologischen Untersuchungen und das Forschungsprojekt NitroGäu zeigten, dass die bisherigen Massnahmen nicht ausreichen, um das Qualitätsziel im Grundwasser dauerhaft zu erreichen. Deshalb setzt das Nitratprojekt in der vierten Projektperiode betriebsindividuelle Lösungen und Massnahmen um, deren Wirkung auf Felddaten und einer datenbasierten Beratung beruhen. Zusätzlich zur Stilllegung und zum Nitratindex im Ackerbau werden in der 4. Projektperiode folgende Massnahmen umgesetzt. Die Neuerungen der vierten Phase sind:

- **Erweiterung Niederbipp:** Nitratprojekt NGO (Niederbipp – Gäu – Olten). Der Kanton Bern ist durch die Erweiterung des Projektperimeters nun Teil der Projektträgerschaft und -umsetzung.
  - **Einführung von spezifischen Massnahmen im Gemüsebau:** Erstmals in der Schweiz werden Gemüsebau-Flächen in ein Nitratprojekt eingebunden.
  - **Neue Massnahmen Ackerbau:** Der im Boden bereits pflanzenverfügbare Stickstoff wird beim Ausbringen von Dünger besser berücksichtigt ( $N_{min}$ -Methode oder Methode der korrigierten Norm).

#### 1.2.4 Das Begleitprojekt CriticalN (2022-2026)

Das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten wird in der vierten Projektperiode vom Forschungsprojekt CriticalN wissenschaftlich begleitet. Ziel ist es, die Stickstoff-Überschüsse auf der Ebene Parzelle in der Düngung zu senken. Der Weg dahin ist, die Stickstoff-Effizienz durch angepasste Stickstoff-Düngung zu steigern. Dies ist - auf dem Hintergrund steigender Düngerpreise und knapper werdender Ressourcen – auch im Sinne der Landwirte und Landwirtinnen. Konkret soll das erreicht werden durch:

- **Regionaler Forschungsansatz:** Versuche und Untersuchungen gemeinsam mit den Landwirtinnen und Landwirten und auf den Flächen ihrer Betriebe im Projektgebiet.
- **Ermittlung und Bewertung der Stickstoff-Effizienz:** Messungen zur Stickstoff-Bilanzierung für wichtige Kulturen und Fruchtfolgen.
- **Dialog:** Verbesserungsvorschläge von Landwirtinnen und Landwirten können erprobt und mit Messungen bewertet werden.
- **Regionale Datenauswertung:** Wie weit ist die aktuelle Praxis auf dem Weg zum dauerhaften Grundwasserschutz? (Aktuelle N-Überschüsse vs. Ziel)

Das Gutachterbüro TerrAquat in D-Nürtingen (Projektleitung) ist für den Teil Gemüsebau zuständig. Agroscope Gruppe Gewässerschutz und Stoffflüsse ist für den Teil Ackerbau zuständig (Abb. 1). Das Forschungsteam arbeitet eng zusammen mit dem Amt für Umwelt Kanton Solothurn und den landwirtschaftlichen Beratungszentren Wallierhof (Solothurn) und Inforama (Bern).

Das Wirkungsziel ist durch angepasste Massnahmen den durchschnittlichen **N-Verlust ins Grundwasser** aus landwirtschaftlich genutzten Flächen unter **maximal 30 kg N ha<sup>-1</sup> pro Jahr** zu halten.



Abbildung 1: Das CriticalN Kernteam. (Links bis Recht) Frank Liebisch (Agroscope), Wolf Bischoff (TerrAquat, Projektleiter), David Williams (TerrAquat), Andreas Schwarz (TerrAquat), Francesco Argento (Agroscope). Hier auf einer gemeinsamen Unterbodenkartierung in der Region Oensingen zur Eignungsbewertung von Versuchsflächen für das Demoexperiment.

## 2 Methoden im Projekt

Die Begleitung des Nitratprojekts erfolgt durch Besprechungen, Empfehlungen für Düngungsmethoden sowie die Erhebung und Analyse von Boden- und Pflanzendaten. Innerhalb des Begleitungsprojekts werden ergänzend folgende Methoden eingesetzt:

- Kontakte mit Landwirtinnen und Landwirten um Parzellen zu suchen und über Düngungsstrategien zu diskutieren.
- Düngungsempfehlungen nach standortangepasster Düngepraxis.
- Verteilte repräsentative und wiederholte Erhebungen von Ertrag, N-Entzug und Erntequalität
- Messung der N-Verluste in das Grundwasser als Massstab für die Effizienz der Massnahmen und zur Schliessung der Feld-N-Bilanzen.
- Messung von potentiellen Düngeüberschüssen mit Hilfe von Nulldüngfenstern zur Erweiterung der Datengrundlage in der Fläche.
- Betriebsgespräche mit den beteiligten Landwirtinnen und Landwirte zur Umsetzbarkeit der Massnahmen und um Fragen und Ideen zur Verbesserung zu sammeln.
- Düngeplanung und Betriebsbilanzen regional einordnen und diskutieren.

### 2.1 Düngungsmethoden

Gemäss den «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017, Kapitel 8, Sinaj & Richner, 2017) in der Schweiz werden zwei Methoden zur Berechnung der angepasster N-Düngermenge verwendet: (i) die  $N_{\min}$ -Methode, (ii) die Methode der korrigierten Normen. In einer Studie von 2015 (Maltas et al. 2015) wurde gezeigt, dass nach beiden Methoden eine N-Düngermenge empfohlen wird, die nahe an der optimalen Menge liegt. Beide Methoden werden derzeit nicht standardmässig angewendet, auch weil das Wissen und das Vertrauen in diese Methoden in den Betrieben noch nicht vorhanden ist. Zudem werden sie vom ÖLN nicht gefordert. Zeitpunkt und Aufteilung der Düngergaben sind auch wichtig und Hinweise befinden sich auf die Tabelle 26, Seite 8/35 der GRUD. Einige kürzlich in der Schweiz durchgeführte Studien zeigten ebenfalls das Potenzial standortangepasster Methoden zur Optimierung der Stickstoffdüngung (Argento et al. 2022, Grossrieder et al. 2022) und Reduktion der N-Überschüsse.

#### 2.1.1 Düngung nach GRUD Norm und Betriebsstandard

Gemäss den «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017, Kapitel 8, Sinaj & Richner, 2017) in der Schweiz werden zwei Methoden zur Berechnung der angepasster N-Düngermenge verwendet: (i) die  $N_{\min}$ -Methode, (ii) die Methode der korrigierten Normen. In einer Studie von 2015 (Maltas et al. 2015) wurde gezeigt, dass nach beiden Methoden eine N-Düngermenge empfohlen wird, die nahe an der optimalen Menge liegt. Beide Methoden werden derzeit nicht standardmässig angewendet, auch weil das Wissen und das Vertrauen in diese Methoden in den Betrieben noch nicht vorhanden ist. Zudem werden sie vom ÖLN nicht gefordert. Zeitpunkt und Aufteilung der Düngergaben sind auch wichtig und Hinweise befinden sich auf die Tabelle 26, Seite 8/35 der GRUD. Einige kürzlich in der Schweiz durchgeführte Studien zeigten ebenfalls das Potenzial standortangepasster Methoden zur Optimierung der Stickstoffdüngung (Argento et al. 2022, Grossrieder et al. 2022) und Reduktion der N-Überschüsse.

#### 2.1.2 Düngung nach $N_{\min}$

Diese Methode zur Berechnung der erforderlichen N-Menge beruht auf der Messung des mineralischen N im Boden. Die  $N_{\min}$ -Bestimmung berücksichtigt das in verschiedenen Bodenschichten (0 – 90 cm) enthaltene N in Form von Nitrat- ( $N-NO_3$ ) und Ammonium-Stickstoff ( $N-NH_4$ ) (Abb. 2). Diese werden unter Berücksichtigung der Steingehalte und Bodendichte in  $N_{\min}$  umgerechnet nach der Agroscope Referenzmethode (Bürge und Agroscope, 2020). Der Vorteil gegenüber einem festen Wert wie der Norm, ist, dass  $N_{\min}$  im Boden gemessen werden kann. Die zu düngende N-Menge wird durch einen Referenzwert für jede Kultur berechnet. Die Nachteile sind die Kosten und der Aufwand für die Beprobung und Analyse.



Abbildung 2: Mechanische  $N_{min}$ -Probenahme. Pro Feld oder Sektor werden 12-15 Einstiche auf der Fläche in drei Horizonten (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm) vorgenommen. Probenahme am 25.02.2022 durch Sven Schönmann (Briner AG), Probenehmer im Nitratprojekt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Arbeitsablauf eingerichtet, um sicherzustellen, dass von der Bestellung der Proben bis zur Düngeempfehlung max. 72 Stunden vergehen (Abb. 3). Die Proben werden von einem "Probenehmer" gesammelt und gleichentags an ein Labor in der Region geliefert.

### Workflow $N_{min}$

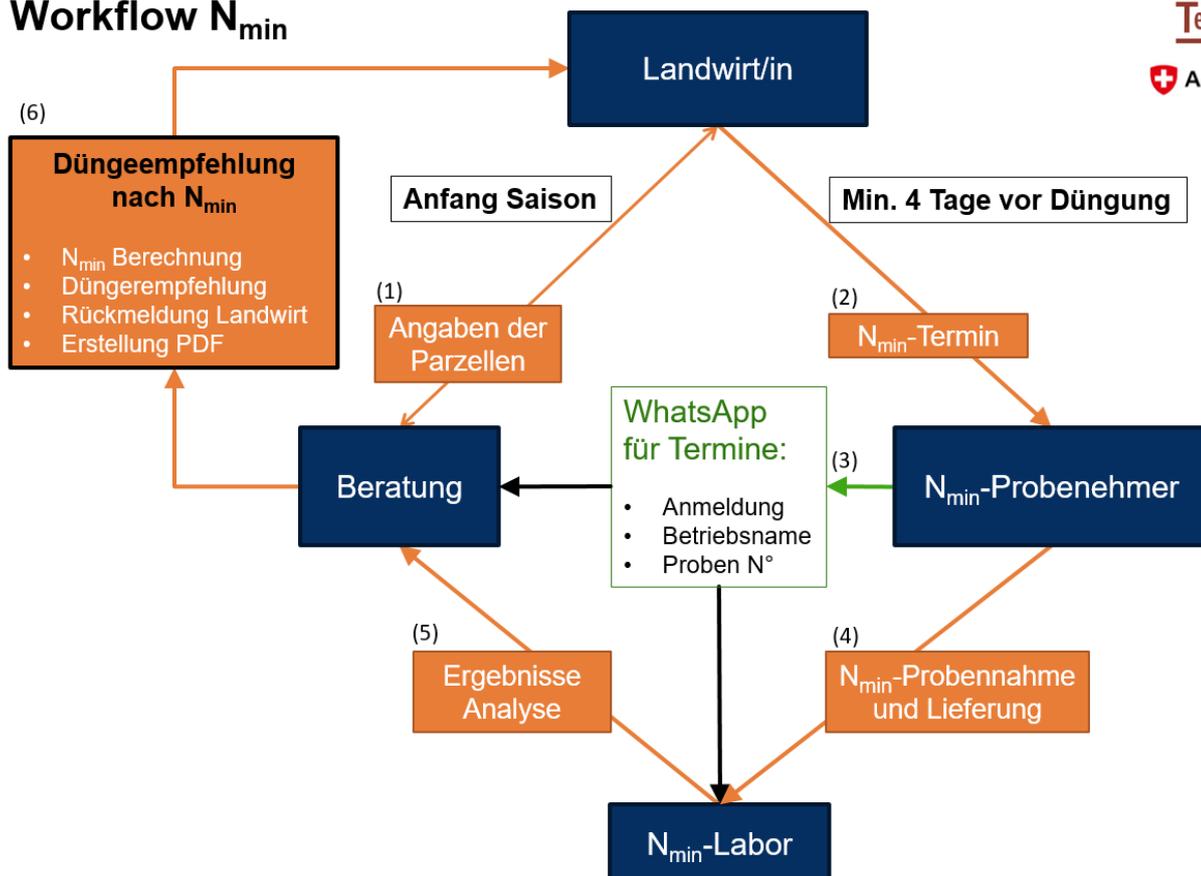


Abbildung 3:  $N_{min}$  Arbeitslauf im Projekt im Ackerbau. (1) Die Beratung und die Landwirtinnen und Landwirte am Anfang Saison diskutieren die Angaben der Parzellen (2) Min. 4 Tage vor der Düngung ist die Probenahme beim Probenehmer in Auftrag gegeben, der mit Partnern und Labor die Probenahme per WhatsApp oder Mail meldet. (4) Die Proben werden gesammelt und im Labor abgegeben. (5) Die Analysen werden an die Beratung weitergeleitet, eine Düngeempfehlung wird berechnet und (6) an den Landwirtinnen und Landwirte zurückgemeldet.

### 2.1.3 Düngung nach korrigierter Norm

Die Methode der korrigierten Normen schätzt die erforderliche N-Düngermenge, wobei eine Referenzmenge aufgrund von Boden-, Klima- und Anbaubedingungen des Standorts korrigiert wird (Abb. 4). Dabei kommen sieben mögliche Korrekturfaktoren, die negative oder positive Werte annehmen können, zur Anwendung:

$$X = \text{Norm} + (f_{\text{Ertrag}} + f_{\text{OSB}} + f_{\text{VF}} + f_{\text{NOD}} + f_{\text{Regen}} + f_{\text{Hacken}} + f_{\text{Fr}})$$

Der Faktor Ertrag ( $f_{\text{Ertrag}}$ ) schätzt die Korrektur des N-Bedarfs, wenn ein höherer oder tieferer Ertrag im Vergleich zum Referzertrag angestrebt wird (höhere Ertrag in 62a Gebieten nicht zulässig, [Suisse-Bilanz](#) Seite 4-5, Punkt 2.17). Der Faktor  $f_{\text{OSB}}$  berücksichtigt die Auswirkungen des Gehalts an Organische Substanz (OS) und des Tongehalts des Bodens auf die Mineralisierung der OS,  $f_{\text{VF}}$  berücksichtigt den Einfluss der Vorfrucht und des Zeitpunkts ihrer Einarbeitung in den Boden auf die Mineralisierung der Ernterückstände,  $f_{\text{NOD}}$  bezeichnet den Anteil des mit organischen Düngern ausgebrachten N, der im zweiten Jahr nach der Ausbringung pflanzenverfügbar ist,  $f_{\text{Regen}}$  schätzt den Einfluss von Regen auf die N-Verluste durch Auswaschung während Winter und Frühling,  $f_{\text{Hacken}}$  simuliert den positiven Effekt von wiederholtem Hacken auf die Mineralisierung der OS und  $f_{\text{Fr}}$  berücksichtigt, die Auswirkungen der Bedingungen im Frühling (Feuchtigkeit und Temperatur) auf die N-Verfügbarkeit.

Der Vorteil von dieser Methode ist, dass sie keine Analysenkosten verursacht und viele wichtige Anbau- und Umweltfaktoren einbezieht. Der Nachteil ist, dass die Berechnung nicht selbsterklärend ist und relative mehr Zeit für die Sammlung der Daten und der Korrekturfaktoren in verschiedene Tabellen benötigt. Dieser Aufwand ist aber als gering einzustufen und kann durch digitale Tools vereinfacht werden.

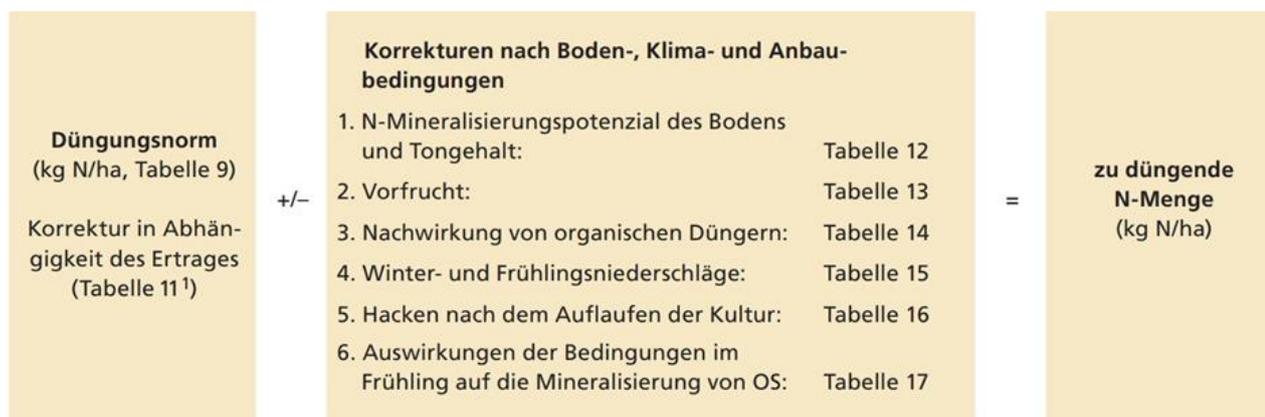


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Methode der korrigierten Normen und der Korrekturfaktoren aus Kapitel 8/24 der GRUD 2017 (Sinaj & Richner, 2017).

## 2.2 Versuchsdesign und Datenerhebung

Die Varianten werden in drei Arten von Feldversuchen in der Reihenfolge von geringem bis hohem Bedarf an fachlicher Begleitung getestet. Wenn möglich ist eine Nullparzelle ohne Düngung, zur Kontrolle und Einschätzung der N-Nachlieferung, im Feld angelegt. Im Einzelfeld testen Betriebe eine Variante auf ihrem Feld (mit oder ohne Nullparzelle). In einem direkten Vergleich wird eine Variante mit der Norm oder dem Betriebsstandard getestet (mit oder ohne Nullparzelle). Im Demoversuch werden alle Methoden auf einer Parzelle getestet und mit einer Nullparzelle verglichen. Sowohl in der Forschung als auch in der Umsetzung können bei Handlungsbedarf experimentelles Design und Massnahmen angepasst werden (Abb. 5).

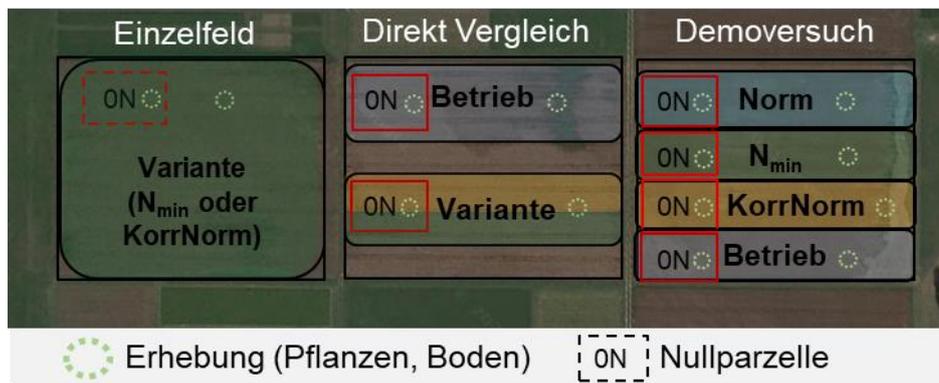


Abbildung 5: Überblick über die drei Möglichkeiten für landwirtschaftliche Versuchsfelder in CriticalN: das Einzelfeld, der direkte Vergleich oder der Demoversuch.

Die Daten der Betriebe und Felder werden von der Beratung und Agroscope zusammengetragen. Die Feldkalender liefern die Bewirtschaftungsdaten, die Suisse-Bilanz allenfalls Betriebskenngrößen. Die gemessenen Parameter über die Saison sind:

- **N<sub>min</sub>:** Düngeberatung und Teil der Erforschung der N-Dynamik bei unterschiedlicher Landnutzung und Standortverhältnissen
- **Ertrag:** Vergleich der Verfahren (Körner und Stroh) und Erkennen allfälliger Ertragseinbussen
- **N-Aufnahme:** Berechnung der Stickstoff-Nutzungseffizienz
- **Qualität:** Proteingehalt (Getreide), Qualitätssicherung, andere Parameter für andere Kulturen
- **NO<sub>3</sub>-Auswaschung (Demoversuch):** Messung der Nitrat auswaschung ins Grundwasser mit Selbst-Integrierenden Akkumulatoren (SIA)

## 2.3 Evaluationsindikatoren

Die zunächst isolierten Daten aus Umsetzung und Forschung werden zu lokalen N-Bilanzdatensätzen verbunden, die Auskunft über Effizienz, Verbesserungen und Probleme der vorangegangenen Messperioden geben. Die Bewertung wird durch Ertrag und Qualität, N-Nutzungseffizienz (scheinbare Ausnutzungseffizienz und Körner-Produktionseffizienz), N-Speicheränderung und N-Verlustpotential (N-Bilanzmethode) vollzogen. Die Nullparzellen (Abb. 6) sind als Kontrolle und zum Verständnis der N-Nachlieferung des Bodens sehr wichtig. Sie werden auch zur Berechnung der Indikatoren für Effizienz und N-Bilanz verwendet.



Abbildung 6: Nullparzellen in Weizen- und Gerstenfeldern (2022). Mitte April war der Unterschied zu den gedüngten Parzellen deutlich sichtbar.

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Indikatoren für die Effizienz des Stickstoffeinsatzes und der Körnerproduktion, sowie der Umweltverträglichkeit und der Wirtschaftlichkeit. Die Formeln werden angegeben, um zu verdeutlichen, welche Parameter aus den Felddaten für die Berechnung verwendet werden.

**Tabelle 2.1:** Indikatoren für die Effizienz des Stickstoffeinsatzes und der Körnerproduktion, die Umweltverträglichkeit und die Wirtschaftlichkeit mit Abkürzungen und Formel.

Indikator		Formel
Scheinbare Ausnutzungseffizienz	SAE	$\frac{(N \text{ Ab Düng} - N \text{ Ab Null})}{N \text{ Düng}} * 100$
Produktionseffizienz	PE	$\frac{\text{Ertrag}}{N \text{ Düng}}$
N Saldo*	-	$N \text{ Düng} - N \text{ Ab} - N \text{ Auswaschung}$
N Verlustpotential	-	$N \text{ Düng} + N \text{ Nachlieferung} - N \text{ Ab} + N_{\text{min Ernte}}$
Saldo	-	$K_p * \text{Ertrag} - N_p * N \text{ Düngung}$

\* N Auswaschung = wenn verfügbar.

N Ab = N Abfuhr: Gesamte Feldabfuhr Körner (+ Stroh, falls abgefahren)  $K_p$ ;  $N_p$  = Körnerpreis und Stickstoffpreis respektive.

$N_{\text{min Ernte}}$  =  $N_{\text{min}}$  im Boden zum Zeitpunkt der Ernte

### 3 Stand der Forschungsarbeiten des Projekts

#### 3.1 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2022

Agroscope hat im Jahr 2022 angefangen, zusammen mit den Beratern des Kantons Solothurn (Bildungszentrum Wallierhof) und des Kantons Bern (Bildungszentrum Inforama) sowie dem Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, ein Betriebsnetzwerk aufzubauen (Abb. 7). Im Rahmen dieses Netzwerks werden gemeinsam mit den Landwirtinnen und Landwirte der Region verschiedene Methoden zur Optimierung der Stickstoffdüngung "on-farm" getestet. Die Betriebsdaten werden gesammelt und für die Auswertung der verschiedenen Methoden verwendet.



Abbildung 7: Projekt Perimeter vom Nitratprojekt NGO (Niederbipp–Gäu–Olten). Die Fläche der beiden Kantone: Kanton Solothurn (orange) und Kanton Bern (rot), sowie die Versuchsflächen (gelbe Polygone) sind dargestellt.

Im Jahr 2022 nahmen neun Betriebe an dem Begleitungsprojekt CriticalN teil. So standen 20 Parzellen mit 6 verschiedenen Kulturen im Versuch, hauptsächlich Winterweizen und Mais (60%), aber auch Raps, Gerste, Zuckerrüben und Kunstwiese (Abb. 8, Kulturen). Insgesamt wurden rund 40 ha Ackerland untersucht. Die Parzellen wurden mit drei verschiedenen Düngeverfahren nach «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017, Kapitel 8, Sinaj & Richner, 2017) gedüngt, die meisten davon mit der N<sub>min</sub>-Methode mit 32.4 ha (Details in Abschnitt 2 Methoden im Projekt). Die Methode der korrigierten Norm wurde auf rund 3.8 ha angewendet, der Rest der Flächen waren Kontrollflächen (nach GRUD Norm oder Betriebsstandard) (Abb. 8, Düngungsmethode). Agroscope lieferte die Empfehlungen für die Landwirte und 4 Parzellen mit insgesamt 6 ha wurden enger begleitet.

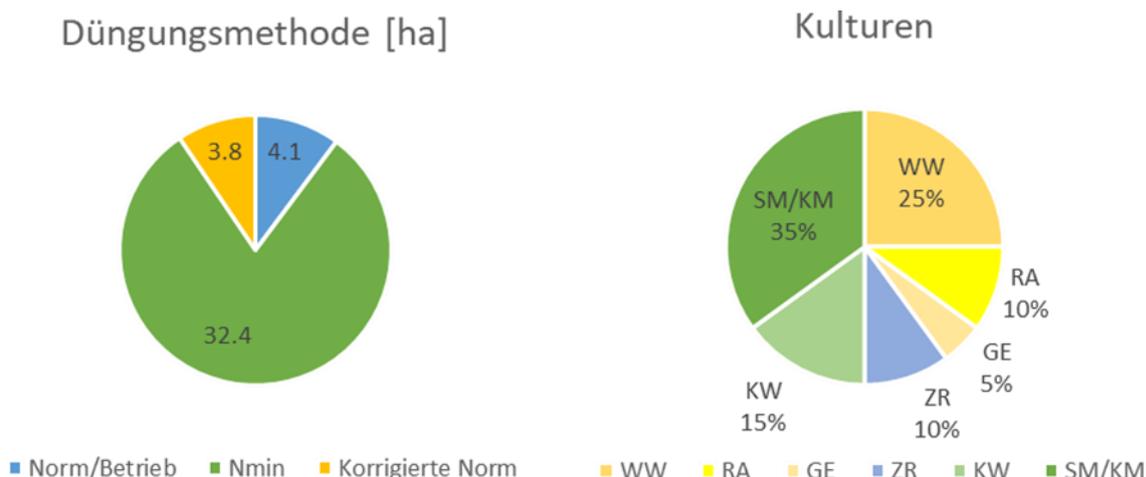


Abbildung 8: Übersicht über die 2022 untersuchten Parzellen im Projekt. Auf der linken Seite sind die drei Düngeverfahren pro Flächeneinheit (ha) dargestellt. Rechts zeigen die Diagramme die sechs verschiedenen Kulturen, die in diesem Jahr untersucht wurden (% der Parzellen): Winterweizen (WW), Silo- und Körnermais (SM/KM), Raps (RA), Gerste (GE), Zuckerrüben (ZR) und Kunstwiese (KW).

Das Jahr 2022 war das erste operative Jahr mit Feldexperimenten des Ackerbauteils im Projekt, und das Ziel bestand darin, laufende Arbeitsabläufe mit dem Netzwerk der Landwirte und allen anderen beteiligten Akteuren zu etablieren.

Für das Jahr 2023 wurde das Ziel verfolgt, weitere Betriebe und Flächen in das Projekt einzubeziehen und die Beprobung und Arbeitsabläufe zu verbessern.

### 3.1.1 Stand und Herausforderungen - 2022

Die Feldexperimente im Jahr 2022 waren notwendig und wichtig, um die Abläufe des Projekts zu entwickeln und zu etablieren, wie zum Beispiel den Austausch zwischen den Projektpartnern und die Kommunikation mit den Landwirtinnen und Landwirten. Während der Austausch innerhalb des Projektteams in Form eines zweiwöchentlichen "Jour-Fix" und bilateraler Kommunikation bei Bedarf gut organisiert ist, gestaltete sich die Kommunikation mit den Landwirtinnen und Landwirten und vor allem die Rekrutierung von Teilnehmern zu den wissenschaftlichen Fragestellungen teilweise schwierig. Die Kontaktaufnahme mit neuen Landwirtinnen und Landwirten ist ein zentrales Element des Projektes und sehr wichtig für die Aussagekraft der erhobenen Daten und damit für den Erfolg des Projektes. Allerdings ist das Projekt für die Landwirte nicht immer attraktiv. Es wird gemeinsam mit der Projektleitung und den Partnern nach Lösungen gesucht. Der Wallierhof hat das Personal für 2023 bereits verstärkt.

Erwähnenswert ist auch, dass bei einem Vergleich mit verschiedenen Labors in der Schweiz und in Deutschland ein systematischer Fehler bei der  $N_{min}$ -Messung im Labor festgestellt wurde. Die Analysenergebnisse des Labors im Nitratprojekt lagen im Durchschnitt zwischen 50 und 60% unter denen anderer Labore. Das Labor wurde von der Projektleitung darauf angesprochen und hat bereits Massnahmen ergriffen, um die Analyseverfahren zu verbessern und einen höheren Qualitätsnachweis durch Ringvergleiche mit anderen Labors im kommenden Jahr zu gewährleisten.

## 3.2 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2023

Im Jahr 2023 nahmen 16 Betriebe an dem Projekt teil. So standen 32 Parzellen mit 7 verschiedenen Kulturen im Versuch, hauptsächlich Winterweizen und Silo- und Körnermais (62%), aber auch Raps, Gerste, Dinkel, Zuckerrüben und Kunstwiese (Abb. 9, Kulturen). Insgesamt wurden rund 58 ha Ackerland untersucht was ca. 6% der ausgewiesenen Ackerfläche im Projektperimeter entspricht. Die Parzellen wurden mit drei verschiedenen Düngeverfahren nach «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017, Kapitel 8, Sinaj & Richner, 2017) gedüngt, die meisten davon mit der  $N_{min}$ -Methode mit rund 49 ha. Die Methode der korrigierten Norm wurde auf rund 7 ha angewendet, der Rest der Flächen waren Kontrollflächen (nach GRUD Norm oder Betriebsstandard) (Abb. 9, Düngeverfahren). Agroscope lieferte die Düngeempfehlungen und 5 Parzellen mit insgesamt 9.4 ha wurden enger begleitet.

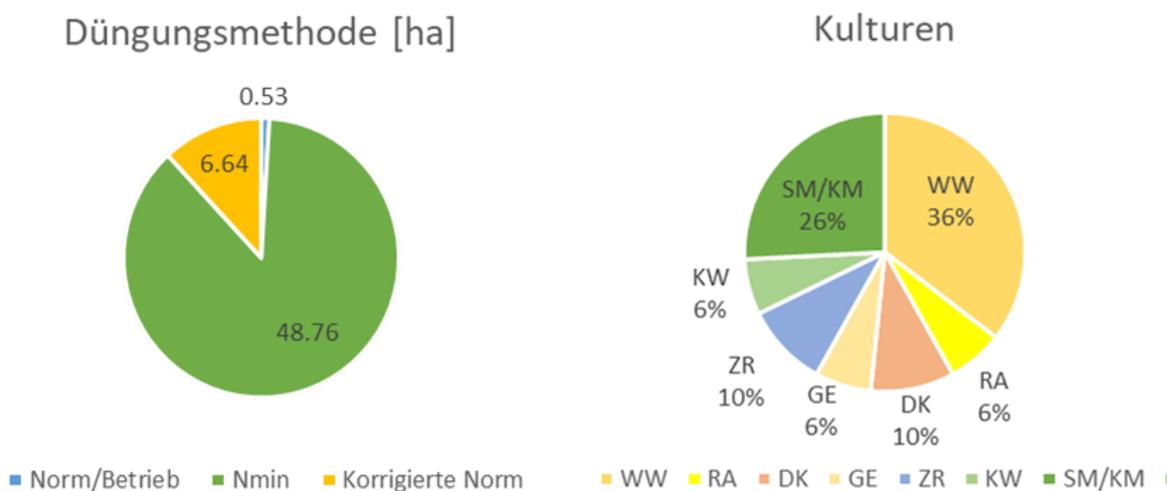


Abbildung 9: Übersicht über die 2023 untersuchten Parzellen im Projekt. Auf der linken Seite sind die drei Düngeverfahren  $N_{min}$  (48.76 ha), Korrigierte Norm (6.64 ha) und Kontrollflächen (Norm/Betrieb, 0.53 ha) pro Flächeneinheit dargestellt. Rechts zeigen die Diagramme die sechs verschiedenen Kulturen, die in diesem Jahr untersucht wurden (% der Parzellen): Winterweizen (WW), Silo- und Körnermais (SM/KM), Raps (RA), Dinkel (DK), Gerste (GE), Zuckerrüben (ZR) und Kunstwiese (KW).

### 3.2.1 Stand und Herausforderungen - 2023

Was die Herausforderungen des Vorjahres (2022) anbelangt, so wurden die Qualitätsprobleme der  $N_{\min}$ -Analyse vom Labor verbessert, indem die Methoden angepasst, ein Vergleich der Analysen mit einem externen Labor in Deutschland organisiert und eine Veranstaltung mit den Landwirtinnen und Landwirten durchgeführt wurde, um die Transparenz der Prozess von Beprobung bis  $N_{\min}$  Wert zu erhöhen. Die Methoden und der Ablauf wurden vorgestellt und erläutert.

Die Unterstützung durch die Berater war während der Saison sehr gut. Ein «Highlight» dieses Jahres war der  $N_{\min}$ -Workshop im September auf dem Wallierhof, bei dem ein Excel-Tool für  $N_{\min}$ -basierte Düngeempfehlungen vorgestellt wurde. Dieses Tool wurde von Agroscope und TerrAquat entwickelt und wird in einem separaten Bericht vorgestellt und erläutert, der in 2024 erhältlich sein wird. Ziel des Tools ist es, die Berechnung der  $N_{\min}$ -basierten Düngerempfehlungen für die Berater zu vereinfachen und zu automatisieren (ähnlich wie der korrigierte Norm Prozess) - die ab 2024 beginnen werden den Düngeempfehlungsprozess zu übernehmen, aber weiterhin durch Agroscope unterstützt wird.

Eine der grossen Herausforderungen im Projekt ist die Modellierung der N-Nachlieferung durch Mineralisierung während der Vegetationsperiode. Zu diesem Zweck hat das CriticalN-Team ein gemeinsames Experiment mit Feldlysimetern am Versuchsstandort in Oensingen etabliert, um die N- Freisetzung von acker- und gemüsebaulich genutzten Böden im Gäu besser zu verstehen. Der Versuchsaufbau, die Methode und die Daten werden zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt, da die Auswertung noch nicht abgeschlossen ist. Die heftigen Niederschläge im Herbst haben dazu geführt, dass das Experiment mit Wasser überflutet wurde. Der Versuch wird nun abgebaut. Zusätzlich wurde eine Porbenhamekampagne zur Messung von organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff in verschiedenen repräsentativen Böden durchgeführt. Diese Daten sollten dazu dienen, das Verständnis des N-Mineralisierungspotenzials zu verbessern.



Abbildung 10: Installation von Feldlysimetern in Oensingen im Mai 2023. Vier verschiedene Böden (zwei aus dem Ackerbau und zwei aus dem Gemüsebau) werden viermal in 25 cm tiefen Lysimeter repliziert.

Schliesslich wurde eine umfangreiche Feldbeprobungskampagne geplant, um die Wirkung des mineralischen Stickstoffs im Boden im Herbst als Indikator für Stickstoffreste nach der Saison zu testen. Leider war diese Kampagne nicht sehr erfolgreich, was zum einen an der nicht optimalen Organisation zwischen den beteiligten Parteien (Agroscope, Labor und Probenehmer), zum anderen an der Dimension der Kampagne (über 60 zu beprobende Standorte) und vor allem an den Feldbedingungen (zwischen Ende Oktober und Dezember extrem intensive und häufige Niederschläge, die das Befahren der Felder mit dem Probenahmefahrzeug nahezu unmöglich machten oder gar verunmöglichten) lag. Nur 15 Standorte konnten schlussendlich beprobt werden. Die verbliebenen Felder werden zu Beginn des Jahres 2024 beprobt. Aufgrund der starken Auswaschung durch die intensiven Niederschläge können diese  $N_{\min}$ -Gehalte nicht mehr als Herbst- $N_{\min}$ -Gehalt genutzt werden. Sie werden jedoch ein gutes und sehr nützliches Abbild der  $N_{\min}$ -Basiswerte in der Region geben, um einen regionalen  $N_{\min}$ -Hintergrundgehalt abschätzen zu können. Dieser wird benötigt, um die Interpretation der Herbst- $N_{\min}$ -Werte abzustützen.

### 3.3 Betriebsnetzwerk Ackerbau 2024

Im Jahr 2024 nahmen 22 Betriebe an dem Projekt teil. So standen 57 Parzellen mit 9 verschiedenen Kulturen im Versuch, hauptsächlich Winterweizen und Silo- und Körnermais (68%), aber auch Winterraps, Wintergerste, Urdinkel, Zuckerrüben, Sonnenblumen und Kunstwiese (Abb. 11, Kulturen). Insgesamt wurden rund 122 ha Ackerland untersucht, was ca. 13% der ausgewiesenen Ackerfläche im Projektperimeter entspricht. Die Parzellen wurden mit drei verschiedenen Düngeverfahren gedüngt: nach korrigierter Norm,  $N_{min}$  aus den «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD 2017, Kapitel 8, Sinaj & Richner, 2017) und Betriebsüblich bzw. nach Norm. Die meisten davon wurden mit der  $N_{min}$ -Methode, insgesamt rund 68 ha, gedüngt. Die Methode der korrigierten Norm wurde auf rund 10 ha angewendet, der Rest der Flächen waren Kontrollflächen (nach GRUD Norm oder Betriebsstandard) (Abb. 11, Düngungsmethode). Agroscope und Wallierhof lieferten die Düngeempfehlungen und 15 Parzellen mit insgesamt 35 ha wurden enger begleitet.

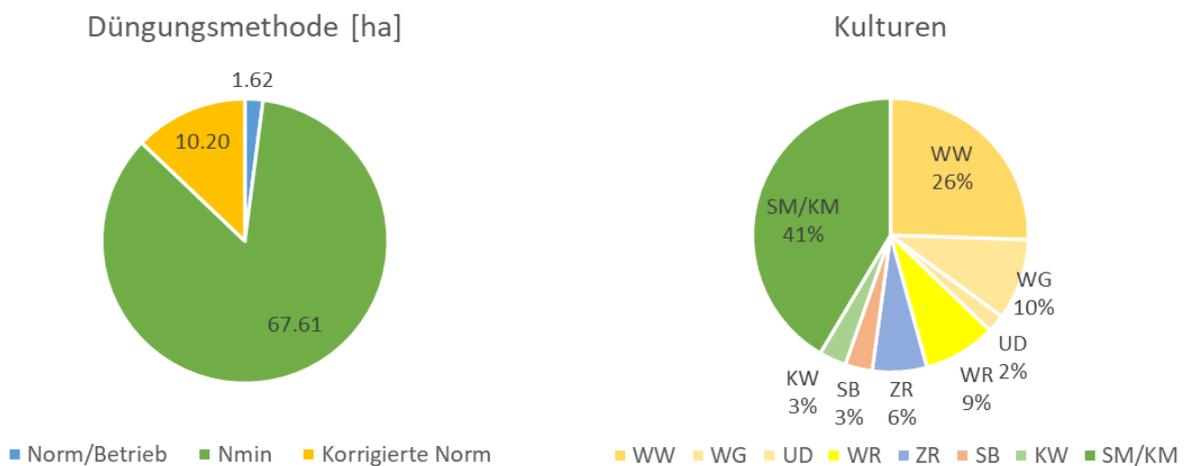


Abbildung 11: Übersicht über die 2024 untersuchten Parzellen im Projekt. Auf der linken Seite sind die drei Düngeverfahren  $N_{min}$  (67.61 ha), Korrigierte Norm (10.20 ha) und Kontrollflächen (Norm/Betrieb, 1.62 ha) pro Flächeneinheit dargestellt. Rechts zeigen die Diagramme die neun verschiedenen Kulturen, die in diesem Jahr untersucht wurden (% der Parzellen): Winterweizen (WW), Wintergerste (WG), Urdinkel (UD), Winterraps (WR), Zuckerrüben (ZR), Sonnenblumen (SB), Kunstwiese (KW) und Silo- und Körnermais (SM/KM).

#### 3.3.1 Stand und Herausforderungen - 2024

Die Unterstützung durch die kantonale Beratung wurde vergrössert. Damit hat sich die Anzahl der Parzellen im Projekt im Vergleich zu 2023 fast verdoppelt, und ein guter Teil der Düngeempfehlungen wurde durch die Beratung übernommen. Es wurde eine neue, erweiterte Version des Excel-Tools für  $N_{min}$ -basierte Düngeempfehlungen erstellt. Dieses Tool wurde von Agroscope und TerrAquat weiterentwickelt und wird in einem separaten Bericht vorgestellt und erläutert. Ziel des Tools ist es, die Berechnung von  $N_{min}$ -basierten Düngeempfehlungen für die Beratung zu vereinfachen und stark zu automatisieren (ähnlich wie für die Düngung nach korrigierter Norm, siehe Tanner et al., 2024).

Das Jahr 2024 war aufgrund der intensiven und anhaltenden Niederschläge zu Beginn des Jahres und erneut im Frühherbst ein sehr schwieriges Jahr für den Ackerbau, insbesondere für Winterkulturen.

## 4 Ergebnisse – 2022

### 4.1 Feldsaison 2022

Die Ergebnisse der ersten Feldsaison 2022 liegen fast vollständig vor. Die Sammlung der Feld- Kalenderdaten von den Landwirtinnen und Landwirten ist noch am Laufen, zusammen mit der Beratung. In diesem Bericht sind die vorläufigen Ergebnisse der "Einzelfelder" in Bezug auf die Empfehlung nach  $N_{\min}$  und Korr. Norm, im Vergleich zur GRUD Norm, dargestellt. Die Streifenversuche und der Demoversuch mit Silomais gezeigt werden mit detaillierten Daten auch gezeigt.

#### 4.1.1 Wetter

Die Wetterbedingungen in der Vegetationsperiode 2022 (Okt-21 bis Okt-22) waren gekennzeichnet durch eine kumulative Niederschlagsmenge von 1064 mm, die leicht über dem regionalen Jahresmittelwert (1170 mm, bodenmessnetz.ch 2011-2022, Kestenholz) lag, und einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 11 °C (Abb. 12). Die Niederschläge waren gut über die Saison verteilt, mit Ausnahme des Monats März, der mit nur 20 mm kumulativem Niederschlag der trockenste Monat der Saison war. Im Allgemeinen waren die Bedingungen für die Vegetationsperiode im Durchschnitt gut, ohne dass es zu extremen Ereignissen kam (wie z. B. langanhaltende Dürreperioden wie im Jahr 2020 oder hohe Niederschlagsmengen wie im Sommer 2021).

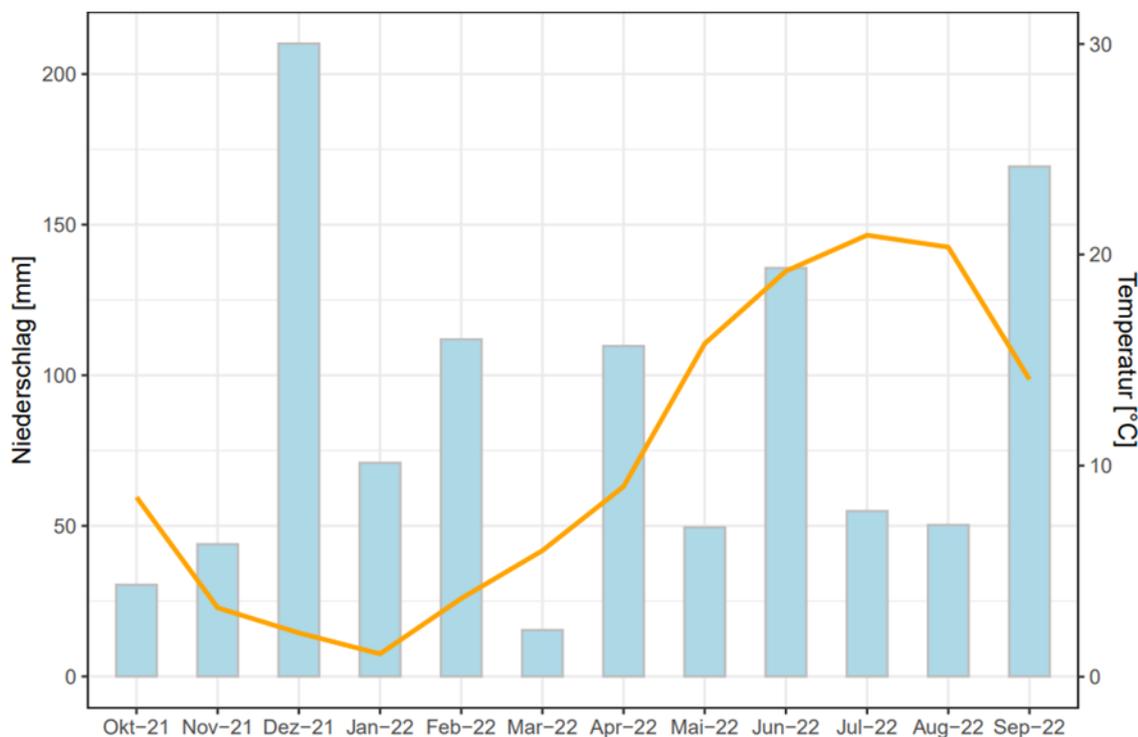


Abbildung 12: Monatliche Niederschlagssumme (mm) und Temperaturmittelwerte (°C) in der Vegetationsperiode 2022 (Okt-21 bis Okt-22) im Gäu. Datenquelle: Wetterstation Kestenholz – [Bodenmessnetz \(meteotest.ch\)](https://bodenmessnetz.ch).

Der Grundwasserstand in Kestenholz schwankte zwischen 428 und 426 m ü. M. mit einem Höchststand im März und einer stetig sinkenden Tendenz gegen Ende des Jahres (Abb. 13).



Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes (m ü. M.) im Jahr 2022 in der Messstelle Kestenholz. Datenquelle: Amt für Umwelt Kt. Solothurn, Hydrometrie - [Hydrometrie - Daten - Umweltdaten - Kanton Solothurn](#).

#### 4.1.2 Allgemeine Darstellung der Düngung und $N_{min}$ für verschiedene Kulturen

Die laufende Saison war durch relativ niedrige  $N_{min}$ -Werte charakterisiert auch aufgrund der fehlerhaften Analyseergebnisse (Siehe Sektion 3.2). In Weizenfeldern lagen die Werte im Februar zwischen 25 und 50 kg N ha<sup>-1</sup> (Abb. 14, b). Bei Winterweizen war die Abweichung von der Norm (Norm WW ist 140 kg N ha<sup>-1</sup>) grösser, hier lagen die Empfehlungen 5-30% unter der Norm. Die korrigierten Daten (geschätzt Faktor x2) sind im Annex 7.3 abgebildet. Bei Weizen veränderte sich die korrigierte Empfehlung im Vergleich zu den empfohlenen Mengen (5-40% weniger als die Norm).

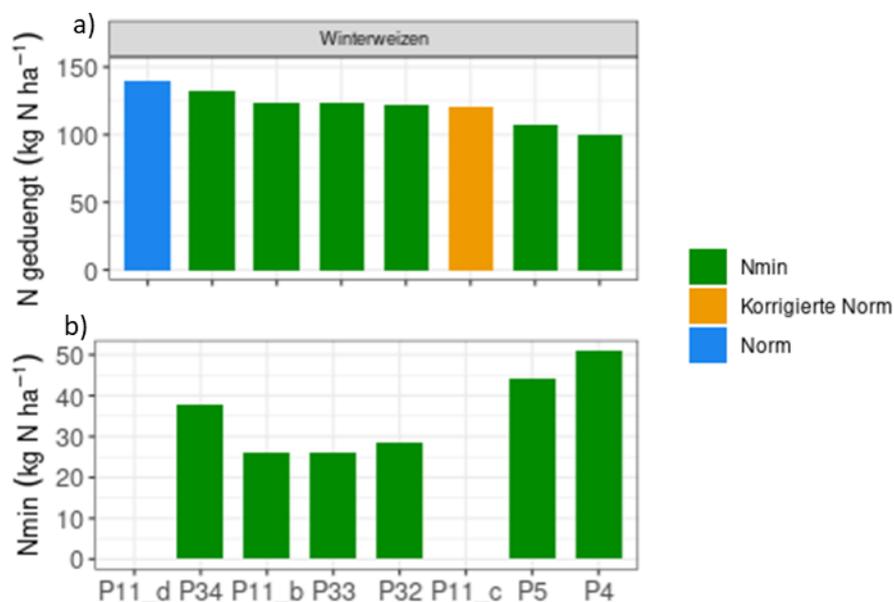


Abbildung 14: Vergleich der Düngempfehlung (a) nach der  $N_{min}$ -Methode, Korrigierte Norm und der Norm/Betrieb in den verschiedenen Parzellen (P1...Pn) für Winterweizen. Der entsprechende  $N_{min}$ -Wert ist in der darunterliegenden Grafik (b) dargestellt. Die Farben entsprechen die Düngungsvariante. Die Buchstaben \_a, \_b, \_c, \_d bezeichnen verschiedene Varianten in der gleichen Parzelle.

Auf den Feldern mit Mais (2 Silomais und 2 Körnermais) lagen die gemessenen  $N_{min}$ -Gehalte im Mai zwischen 40 und 80 kg N ha<sup>-1</sup> (Abb. 15, b). Die Empfehlungen nach der  $N_{min}$ -Methode unterschieden sich daher nicht wesentlich von der Norm (Norm Mais ist 110 kg N ha<sup>-1</sup>). Die Düngeempfehlungen lagen gleich oder etwa 5-10% niedriger als die Norm. Bei Mais (sowohl Silo als auch Körner) lagen die berichtigten Empfehlungen um ca. 30-60% unter der Norm. Bei der Korr. Norm waren die Düngeempfehlungen zwischen 60 und 100 kg N / ha.

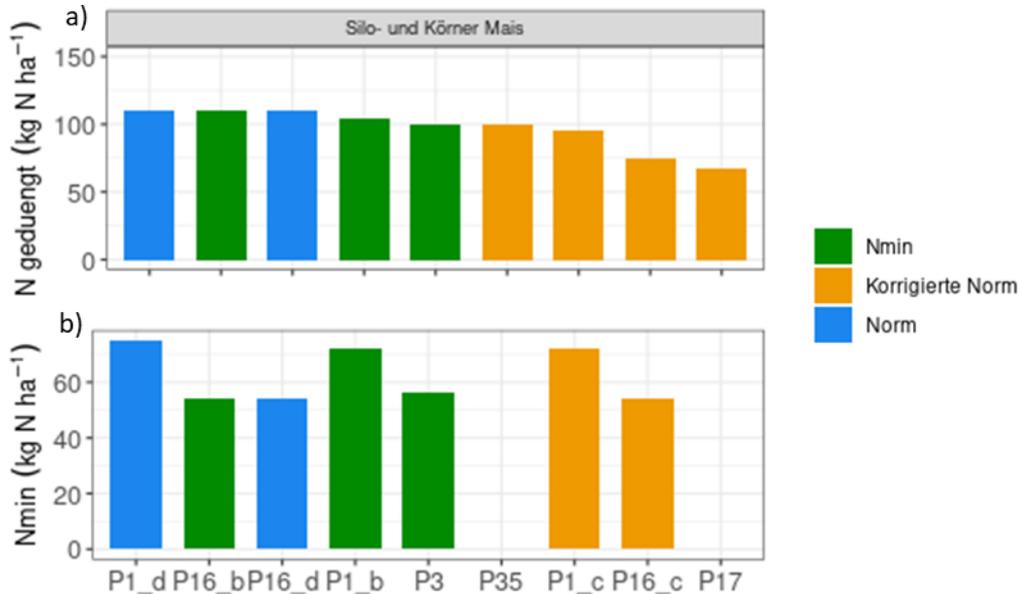


Abbildung 15: Vergleich der Düngeempfehlung (oben) nach der  $N_{min}$ -Methode, Korrigierte Norm und der Norm/Betrieb in den verschiedenen Parzellen ( $P_1 \dots P_n$ ) für Silo- und Körnermais. Der entsprechende  $N_{min}$ -Wert ist in der darunterliegenden Grafik dargestellt. Die Farben entsprechen der Düngungsvariante. Die Buchstaben *\_a*, *\_b*, *\_c*, *\_d* bezeichnen verschiedene Varianten in der gleichen Parzelle.

Bei Wintertraps schliesslich lagen die Empfehlungen ebenfalls um 5-10% niedriger (Daten nicht im Bild dargestellt). Auf diesen Feldern wurde keine direkte Ertragsbewertung vorgenommen, es kam aber auch zu keinen sichtbaren Ertragsunterschieden.

### 4.1.3 Direkter Vergleich und Demoversuch

Im Jahr 2022 wurden neben dem Haupt-Demoversuch drei weitere Streifenversuche durchgeführt.

Auswertung Streifenversuch Winterweizen

Das Feld, ca. 1.5 ha gross, wurde in 5 Unterparzellen unterteilt: die drei GRUD-Methoden (Norm, N<sub>min</sub> und Korrigierte Norm), eine Nullparzelle und ein Teil, der betriebsüblich gedüngt wurde (Abb. 16, links). Das Feld wurde mit Brotweizen der Sorte «Montalbano» (Schweiz) am 15.10.2021 gesät und am 18.07.2022 gedroschen. Für die Analyse wurden Handproben vor der Ernte genommen (Abb. 16, rechts).

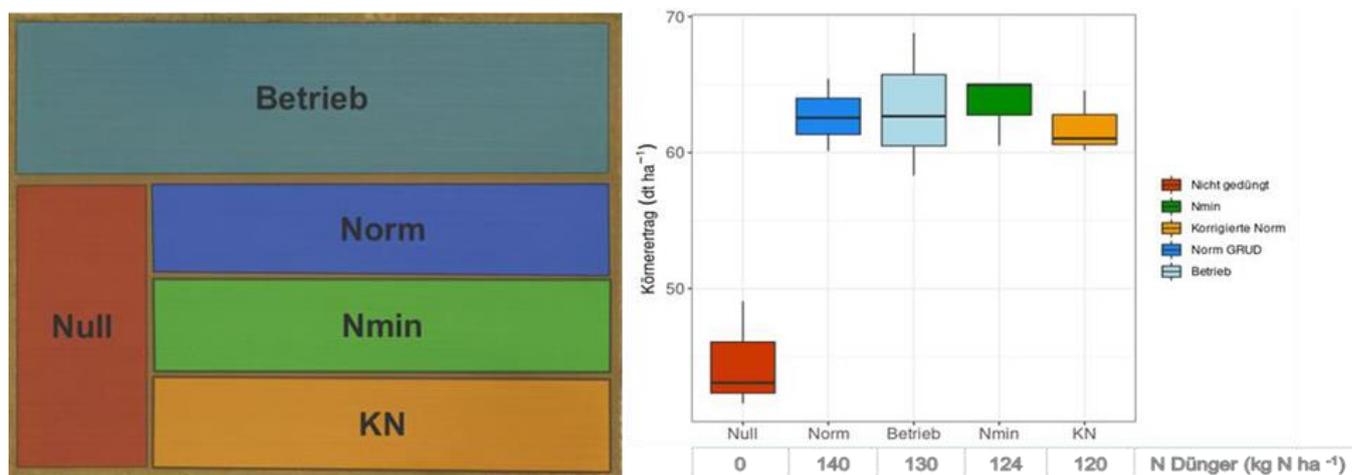


Abbildung 16: Aufbau des Weizenfeldes (links) mit den 5 Parzellen: Norm, N<sub>min</sub>, Korrigierte Norm, Betrieb und Null, und die Ergebnisse der Ertragsanalyse basierend auf Handproben vor der Ernte (dt ha<sup>-1</sup>, rechts) pro Variante (n = 3). Unter jede Variante ist die entsprechende Menge des ausgebrachten N-Düngers (kg N ha<sup>-1</sup>) angegeben.

Der Düngereinsatz wurde bei der «unkorrigierten» N<sub>min</sub>- und Korrigierten Norm-Variante um 10 beziehungsweise 15% der Norm für Winterweizen reduziert. Dies ohne einen signifikanten Unterschied im Ertrag zwischen den gedüngten Varianten. Die Nullparzelle war signifikant ertragsärmer, was zu einer Gesamt-N-Aufnahme von 116 kg N ha<sup>-1</sup> führte (Tab. 4.1).

**Tabelle 4.1:** Parameter, die während der Saison und bei der Ernte auf dem Feld erhoben werden: Ausgebrachter N-Dünger, Ertrag, N<sub>min</sub>, N- Abfuhr und Berechnung des Wirkungsgrads. Die Werte für Output und Effizienz sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

Variante	Input	N <sub>min</sub>		Output		Effizienz	
	N Düngung	Frühjahr	Ernte	Ertrag	N Abfuhr	SAE	PE
	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	%	kg kg N <sup>-1</sup>
<b>Null</b>	0	18	57	4.46	116	-	-
<b>N<sub>min</sub></b>	124	23	76	6.35	224	81	51
<b>KN</b>	120	15	56	6.19	210	77	52
<b>Norm</b>	140	23	72	6.27	225	85	45
<b>Betrieb</b>	130	23	70	6.33	238	94	45

Dies deutet auf das potenzielle N-Angebot hin, das hauptsächlich aus dem Boden und der atmosphärischen Deposition stammt. Aufgrund des Einsatzes von Mineraldünger (Ammonsalpeter 27% N) in Kombination mit einer guten Saison mit konstanten Niederschlägen und optimalen Temperaturen war die Effizienz in Bezug auf die

scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) bei allen Varianten hoch und lag durchschnittlich im Bereich von 70-90%, was als optimal angesehen wird. Betrachtet man die Produktionseffizienz (PE), so scheinen die Varianten mit reduzierter Düngergabe eine effizientere Kornproduktion pro kg ausgebrachtem N zu haben.

Zur Berechnung des potenziellen N-Verlustes und der Nettoveränderungen des N-Pools auf der Grundlage der N-Düngung und der N- Abfuhr aus dem Feld durch die Pflanzen wurde die in den Methoden beschriebene N-Bilanzmethode verwendet (Tab. 4.2). Das Verlustpotenzial umfasst auch den  $N_{\min}$  bei der Ernte. Die Werte zeigen, dass das Verlustpotenzial bei der Variante Norm am höchsten war, während es bei den anderen Varianten unter  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  lag. Die nicht gedüngte Parzelle hatte wie erwartet das geringste Verlustpotenzial. Die negativen Veränderungen im N-Pool (N Saldo) deuten darauf hin, dass eine Lücke zwischen dem gedüngten und dem vom Feld entnommenen N bestand. Diese Lücke wird durch N-Nachlieferung aus dem Boden geschlossen (Mineralisierung).

**Tabelle 4.2:** Indikatoren für die ökologische und wirtschaftliche Bewertung. Die Werte sind als Mittelwert angegeben ( $n = 3$ ).

Variante	Umwelt		Ökonomie		
	N Verlustpotential kg N ha <sup>-1</sup>	N Saldo kg N ha <sup>-1</sup>	Protein Gehalt %	Saldo1* CHF ha <sup>-1</sup>	Saldo2** CHF ha <sup>-1</sup>
<b>Null</b>	57	-116	10.7	2318	2318
<b>N<sub>min</sub></b>	92	-100	12.8	3251	2853
<b>KN</b>	82	-90	12.9	3169	2784
<b>Norm</b>	126	-85	13.4	3202	2753
<b>Betrieb</b>	88	-108	13.7	3231	2818

\* Körner Erlöse – N Kosten (Durchschnittliche Dünger Preise 2018-2021 = 42.5 CHF 100 kg<sup>-1</sup>)

\*\* Körner Erlöse – N Kosten (Aktuelle Dünger Preise Dezember 2022 = 93.3 CHF 100 kg<sup>-1</sup>). Sieht Anhang.

Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt durch einen relativ einfachen Vergleich des Saldos, der sich aus dem Bruttoertrag abzüglich der Düngemittelkosten errechnet. Zwei verschiedene Saldos mit unterschiedlichen Düngemittelpreisen (Durchschnitt der Preise 2018-2021-Saldo1) und der aktuellen Preise-Saldo2). In beiden Fällen sind die Unterschiede zwischen den Varianten nicht signifikant. Bei den aktuellen Preisen ist der Saldo2 jedoch um 350-450 CHF ha<sup>-1</sup> tiefer. Mit höheren Düngerkosten sind die angepassten Varianten leicht mehr profitabel: z.B. ist der Saldo1 der N<sub>min</sub>-Variante ist 1.6% höher als Saldo1 der Norm und der Saldo2 ist 3.6% höher als Saldo2 der Norm.

Zusammengefasst zeigt der Vergleich, dass sich die angepassten Varianten in diesem Jahr positiv auswirkten und die potenziellen N-Verluste verringerten, ohne den Ertrag und die Wirtschaftlichkeit für den Landwirt zu beeinträchtigen. In diesem Jahr und auf diesem Feld schnitt auch der Betriebsstandard sehr gut ab. Wenn weitere Daten über mehr Felder und Jahre vorliegen, können weitere Schlussfolgerungen gezogen werden.

### Demoversuch Silomais

Das Feld, ca. 3 ha gross (Abb. 17, links), wurde in 4 Unterparzellen unterteilt: die drei GRUD-Methoden (Norm,  $N_{min}$  und Korrigierte Norm) und eine Nullparzelle. Zusätzlich wurde ein Teil als Standard vom Betrieb gedüngt. Das Feld wurde mit Silomais am 06.05.2022 gesät und am 18.09.2022 siliert. Für die Analyse wurden Handproben vor der Ernte genommen (Abb. 17, rechts).

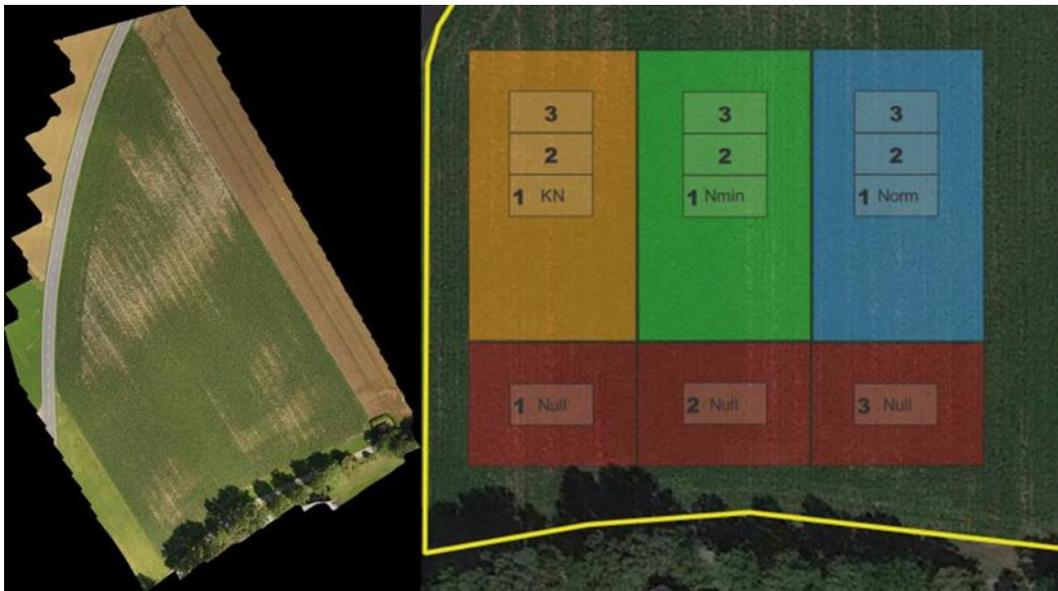


Abbildung 17: Luftbild von Demoversuch (links) mit den 4 Parzellen: Norm,  $N_{min}$ , Korrigierte Norm, und Null (rechts). Die kleinen Polygone entsprechen den Teilflächen, auf denen die Biomasseproben entnommen und die Auswaschung gemessen wurde.

Der Düngereinsatz wurde bei der  $N_{min}$ - und Korrigierten Norm-Variante um 5 beziehungsweise 12% der Norm für Mais reduziert, ohne einen signifikanten Unterschied im Ertrag (gesamte Biomasse) zwischen den gedüngten Varianten. Die Erträge der angepassten Varianten erscheinen höher als die der Norm und des Betriebs. Dies wird eher auf die In-Field-Variabilität als auf die Düngieranwendung zurückgeführt (Abb. 17, links). Die Nullparzelle war signifikant ertragsärmer, was zu einer Gesamt- Biomasse von  $19 \text{ t N ha}^{-1}$  führte (Abb. 18). Dies deutet auf das potenzielle N-Angebot hin, das hauptsächlich aus dem Boden und der atmosphärischen Deposition stammt.

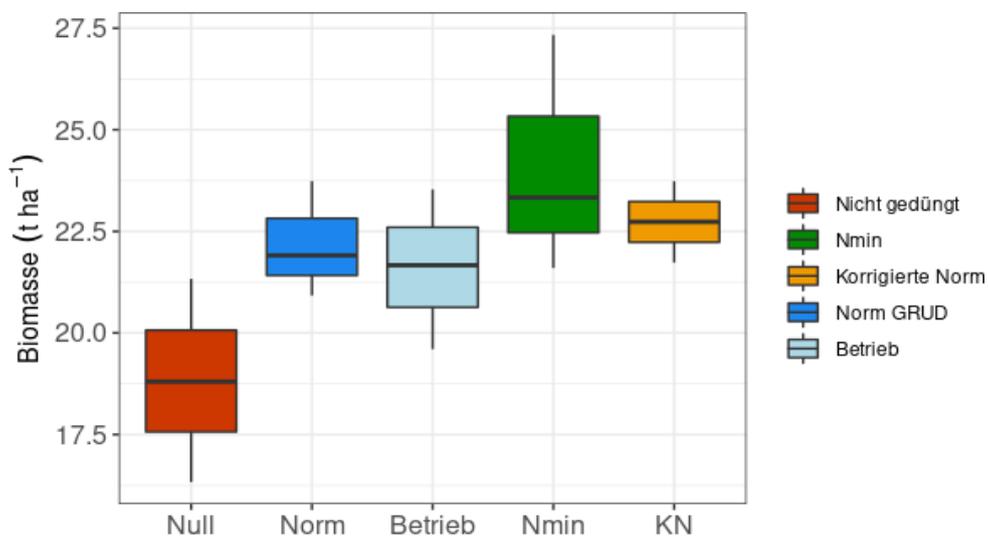


Abbildung 18: Ergebnisse der Ertragsanalyse basierend auf Handproben im Silomais vor der Ernte ( $\text{t ha}^{-1}$ ) pro Variante ( $n = 3$ ).

Die scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) war bei allen Varianten hoch und lag durchschnittlich bei 90-180%, was auf den hohen Einfluss der N-Nachlieferung des Bodens hinweist. Betrachtet man die Produktionseffizienz (PE), so scheinen die Varianten mit reduzierter Düngergabe eine effizientere Kornproduktion pro kg ausgebrachtem N zu haben.

**Tabelle 4.3:** Parameter, die während der Saison und bei der Ernte auf dem Feld erhoben werden: ausgebrachter N-Dünger, Ertrag, N-Abfuhr, scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) und Produktionseffizienz (PE) für die Berechnung des Wirkungsgrads und Indikatoren für die ökologische Bewertung: N Verlustpotential und N-Auswaschung (nur Sommer berücksichtigt). Die Werte für Output, Effizienz und Umwelt sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

Verfahren	Input	Output		Effizienz		Umwelt	
	N Düngung	Ertrag	N Abfuhr	SAE	PE	N Verlustpotential	N Auswaschung
	kg N ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	%	kg kg N <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	kg NO <sub>3</sub> -N ha <sup>-1</sup>
<b>Null</b>	0	19	209	-	-	98	3
<b>N<sub>min</sub></b>	104	24	350	115.0	101.1	45	4
<b>KN</b>	96	24	241	180.9	109.0	3	2
<b>Norm</b>	110	22	186	98.7	81.0	69	3
<b>Betrieb</b>	110	22	171	87.6	83.2	81	NA

Zur Berechnung des potenziellen N-Verlustes und der Nettoveränderungen des N-Pools auf der Grundlage der N-Düngung und der N- Abfuhr aus dem Feld durch die Pflanzen wurde die in den Methoden beschriebene N-Bilanzmethode verwendet (Tab. 4.3). Das Verlustpotenzial umfasst auch den N<sub>min</sub> bei der Ernte. Die Werte zeigen, dass das Verlustpotenzial bei der Variante Null am höchsten war, während es bei der Variante KN um 3 kg N ha<sup>-1</sup> lag. Die nicht gedüngte Parzelle hatte das höchste Verlustpotenzial, wegen eines höheren N<sub>min</sub>-Gehaltes nach der Ernte. Die N-Auswaschung war in allen Verfahren sehr gering < 10 kg Nitrat-N ha<sup>-1</sup> (Tab. 4.3), wobei zu bedenken ist, dass in der Vegetationsperiode sehr wenig Wassersickerung stattfindet, und daher auch der Nitrataustrag sehr gering ist. Die Hauptauswaschungen im Ackerbau wird im Winter verbunden mit der erheblichen Grundwasserneubildung von ca. 400 mm erwartet.

## 5 Ergebnisse – 2023

### 5.1 Feldsaison 2023

In diesem Jahresbericht sind die vorläufigen Ergebnisse der "Einzelfelder", Streifenversuche und der Demoversuch in Bezug auf die Düngeempfehlungen nach  $N_{min}$  und Korrigierte Norm, im Vergleich zur GRUD Norm und/oder Variante Betrieb, dargestellt.

#### 5.1.1 Wetter

Die Wetterbedingungen in der Vegetationsperiode 2023 (Okt-22 bis Sep-23) waren charakterisiert durch eine kumulative Niederschlagsmenge von 966 mm, die leicht unter dem regionalen Jahresmittelwert (1190 mm, bodenmessnetz.ch 2011-2023, Kestenholz) lag, und einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 11 °C (Abb. 19). Die Niederschläge waren gut über die Saison verteilt, mit Ausnahme des Monats Februar, der mit nur 15 mm kumulativem Niederschlag der trockenste Monat der Saison war. Der Frühling war durch intensive Niederschläge charakterisiert. Im Juni verursachten einige heftige Stürme in den fast reifen Kulturen wie Winterweizen, Dinkel und Gerste einige Lagerschäden.

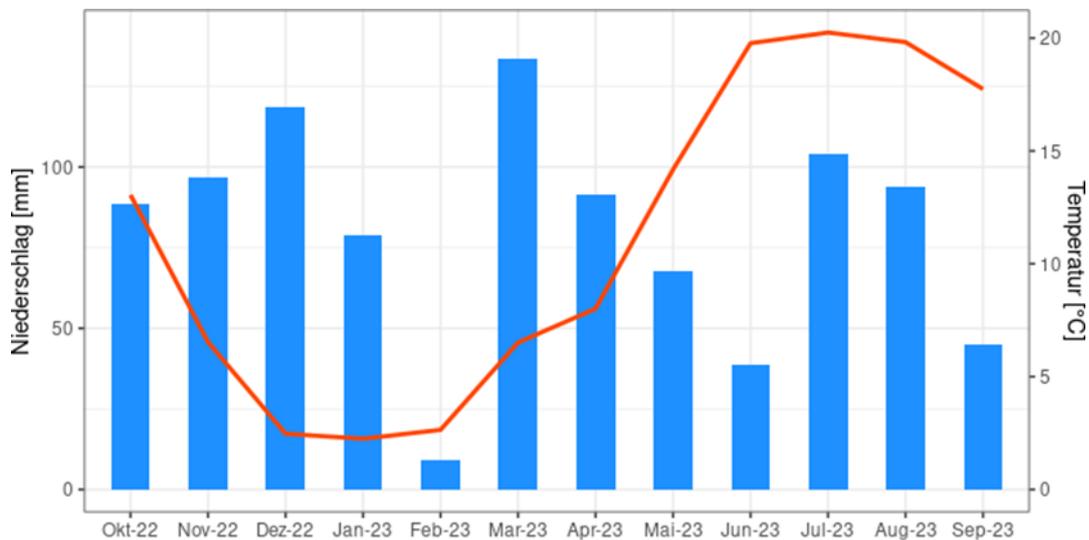


Abbildung 19: Monatliche Niederschlagssumme (mm) und Temperaturmittelwerte (°C) in der Vegetationsperiode 2023 (Okt-22 bis Sep-23) im Gäu. Datenquelle: Wetterstation Kestenholz – [Bodenmessnetz \(meteotest.ch\)](https://www.bodenmessnetz.ch).



Abbildung 20: Grundwasserstand (m ü. M.) im Jahr 2023 in der Messstelle Kestenholz. Datenquelle: Amt für Umwelt Kt. Solothurn, Hydrometrie - [Hydrometrie - Daten - Umweltdaten - Kanton Solothurn](https://www.umwelt.kt.ch/hydrometrie).

Der Grundwasserstand in Kestenholz schwankte zwischen 425 und 427 m ü. M. mit einem Höchststand im März und Juni, einer stetig sinkenden Tendenz gegen Ende des Jahres (Abb. 20).

### 5.1.2 Allgemeine Darstellung der Düngung und $N_{min}$ für verschiedene Kulturen

Die standortangepasste Empfehlung in verschiedenen Winterweizenparzellen lag in diesem Jahr im Bereich von 100-135 kg N/ ha gegenüber der Norm von 140 kg N/ ha (Abb. 21, a). Die  $N_{min}$ -Werte im Frühjahr, die für die Empfehlung der  $N_{min}$ -Düngung verwendet wurden, lagen zwischen 20 und 64 kg N/ha (Abb. 21, b).

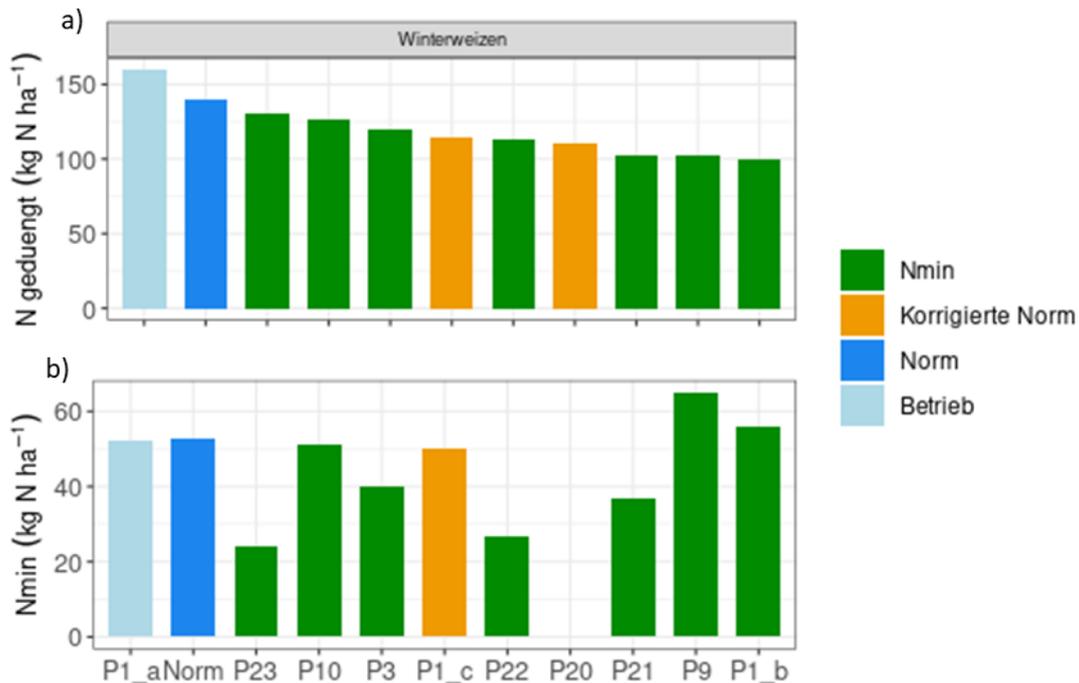


Abbildung 21: Vergleich der Düngempfehlung (a) nach der  $N_{min}$ -Methode, Korrigierte Norm und der Norm/Betrieb in den verschiedenen Parzellen ( $P_1 \dots P_n$ ) für Winterweizen. Der entsprechende  $N_{min}$ -Wert ist in der darunterliegenden Grafik (b) dargestellt. Die Farben entsprechen die Düngungsvariante. Die Buchstaben *\_a*, *\_b*, *\_c* bezeichnen verschiedene Varianten in der gleichen Parzelle.

Für Silo- und Körnermais lagen die Düngempfehlungen in diesem Jahr im Bereich von 55-120 kg N/ ha gegenüber der Norm von 110 kg N/ ha (Abb. 22, a, Seite 25). Die  $N_{min}$ -Werte im Frühjahr, die für die Empfehlung der  $N_{min}$ -Düngung verwendet wurden, lagen zwischen 50 und 160 kg N/ ha (Abb. 22, b, Seite 24). In diesem Beispiel (Parzelle P24) wird auch gezeigt, wie die Düngempfehlung zu höheren Werten als der in Norm führen kann, wenn die  $N_{min}$ -Werte niedrig sind und der Düngebedarf also tatsächlich grösser ist.

In den Zuckerrüben lagen die Empfehlungen in diesem Jahr im Bereich von 50-75 kg N/ ha gegenüber der Norm von 100 kg N/ ha (Abb. 23, a, Seite 24). Die  $N_{min}$ -Werte im Frühjahr, die für die Empfehlung der  $N_{min}$ -Düngung verwendet wurden, lagen zwischen 100 und 155 kg N/ha (Abb. 23, c, Seite 24). Im Raps lagen die Empfehlungen zwischen 100 und 130 kg N/ ha (Abb. 23, b, Seite 24) und die  $N_{min}$ -Werte im Frühjahr zwischen 34 und 64 kg N/ ha (Abb. 23, d, Seite 25).

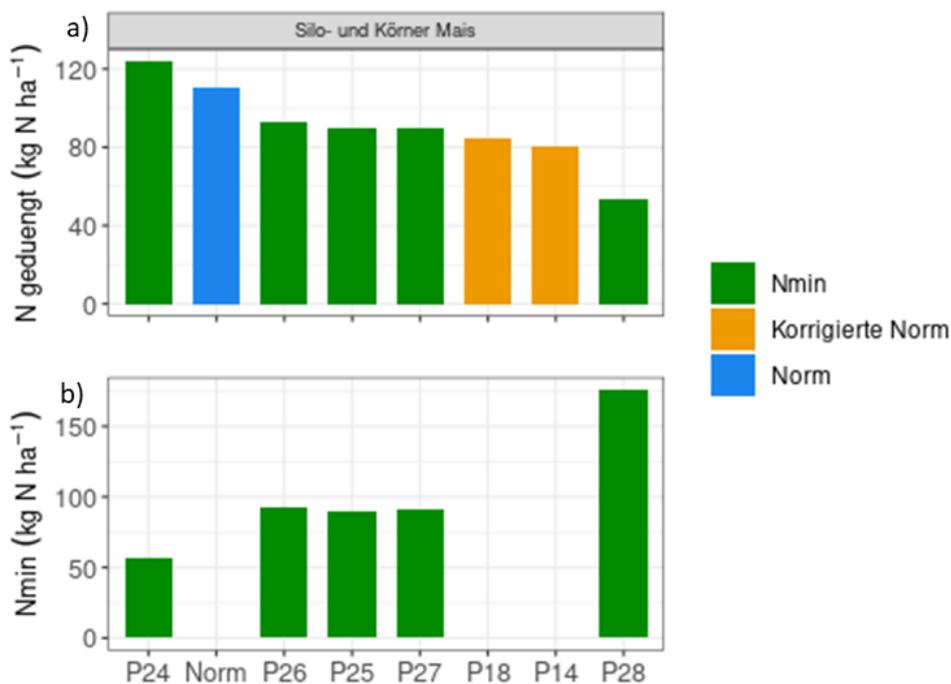


Abbildung 22: Vergleich der Düngempfehlung (oben) nach der  $N_{min}$ -Methode, Korrigierte Norm und der Norm/Betrieb in den verschiedenen Parzellen ( $P_1 \dots P_n$ ) für Silo- und Körnermais. Der entsprechende  $N_{min}$ -Wert ist in der darunterliegenden Grafik dargestellt. Die Farben entsprechen der Düngungsvariante. Die Buchstaben  $_a$ ,  $_b$ ,  $_c$  bezeichnen verschiedene Varianten in der gleichen Parzelle.

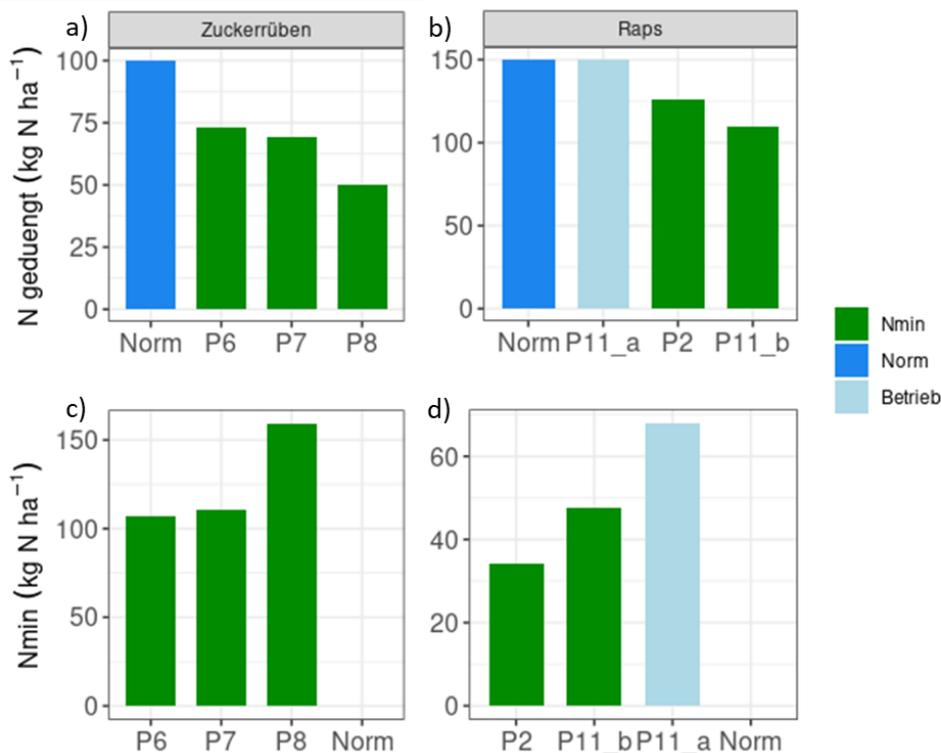


Abbildung 23: Vergleich der Düngempfehlung in den verschiedenen Parzellen ( $P_1 \dots P_n$ ) nach der  $N_{min}$ -Methode für Zuckerrüben (links) und Raps (rechts). Der entsprechende  $N_{min}$ -Wert ist in der darunterliegenden Grafik dargestellt. Die Farben entsprechen der Düngungsvariante. Die Buchstaben  $_a$ ,  $_b$ ,  $_c$  bezeichnen verschiedene Varianten in der gleichen Parzelle.

### 5.1.3 Direkter Vergleich und Demoversuch

Im Jahr 2022 wurden neben dem Haupt-Demoversuch sechs weitere Streifenversuche durchgeführt.

#### Streifenversuche

Die Streifenversuche hatten eine Kombination aus einer oder mehreren Varianten mit mindestens einer Nullparzelle. Die untersuchten Kulturen waren Raps, Hartweizen und Gerste im Versuchsareal Oensingen (Abb. 24). Zusätzlich wurden Dinkel, Winterweizen und Zuckerrüben bei drei anderen Betrieben untersucht.



Abbildung 24: Luftaufnahme von 3 Streifenversuchen in Oensingen, in denen  $N_{min}$ , korrigierte Norm, Betrieb und Null über die Saison getestet wurden. Die Variabilität im Feld aufgrund der zugrundeliegenden Bodeneigenschaften scheint einen wesentlichen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung zu haben

In Tabelle 5.1 sind die In- und Output-Flüsse sowie die  $N_{min}$ -Messungen der verschiedenen Betriebe (B2-B5) und Düngevarianten gezeigt. Der Input an ausgebrachtem N-Dünger war in den standortangepassten Varianten im Allgemeinen geringer als in der Norm und im Betrieb (wenn der Vergleich möglich war). Die einzige Ausnahme war Dinkel (eigentlich Urdinkel), wo die betriebliche Ausbringung niedriger war als die Norm. Im Allgemeinen wird Dinkel in dieser Region viel weniger gedüngt als von der aktuellen Düngeempfehlung vorgeschlagen und dies legt daher eine Überarbeitung der Düngeempfehlung nahe. Der nach der Ernte gemessene  $N_{min}$ -Wert war höher als die Werte im Frühjahr, ein Trend, der auch bei anderen Projekten mit ähnlichen Versuchen beobachtet wurde (z. B. Maisnet). Die Werte wiesen auch eine gewisse Variabilität zwischen den Varianten auf demselben Feld auf.

Bei einer allgemeinen Beschreibung der Output ist festzustellen, dass in fast allen Fällen die Nullparzellen, also der Verzicht auf Düngemittel, einen signifikanten Unterschied im Ertrag und in der Qualität der Ernte bewirkten. Die einzige Ausnahme ist Raps in B2, der keine signifikanten Unterschiede aufwies. Es sollte jedoch hinzugefügt werden, dass das gesamte Feld einschliesslich der Nullparzelle im Herbst ca. 30 kg N/ ha erhielt. Bei Hartweizen schien die Verringerung der Düngemittelmenge zu einer erheblichen Ertragsminderung zu führen. Diese Kultur war jedoch weder für die Region noch für die Schweiz typisch, was darauf hindeutet, dass die Empfehlung wahrscheinlich nicht auf die tatsächlichen Bedürfnisse der Kultur zugeschnitten war.

**Tabelle 5.1:** Parameter, die während der Saison 2023 und bei der Ernte auf dem Feld erhoben werden: ausgebrachter N-Dünger, Ertrag, N-Abfuhr. Die Werte für Output, Effizienz und Umwelt sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

Betrieb	Kultur	Variante	Input	N <sub>min</sub>		Output	
			N Düngung	Frühjahr	Ernte	Ertrag	N-Abfuhr
			kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>
B2	RA	<b>Null</b>	0	86	195	5.37	205
B2	RA	<b>N<sub>min</sub></b>	140	48	128	5.20	195
B2	RA	<b>Betrieb</b>	150	68	150	5.22	205
B2	HW	<b>Null</b>	0	n.a.	n.a.	4.80	126
B2	HW	<b>KN</b>	115	n.a.	n.a.	6.59	250
B2	HW	<b>Betrieb</b>	128	n.a.	n.a.	8.22	243
B2	GE	<b>Null</b>	0	26	n.a.	5.46	93
B2	GE	<b>N<sub>min</sub></b>	110	26	223	6.45	135
B3	DK	<b>Null</b>	0	41	92	3.61	110
B3	DK	<b>N<sub>min</sub></b>	61.5	39	96	4.07	148
B3	DK	<b>Betrieb</b>	50.5	50	75	4.03	190
B4	WW	<b>Null</b>	0	n.a.	n.a.	6.15	197
B4	WW	<b>KN</b>	110	n.a.	n.a.	6.23	204
B4	WW	<b>Betrieb</b>	140	n.a.	n.a.	6.67	223
B5	ZR	<b>Null</b>	0	111	n.a.	75.34	177
B5	ZR	<b>N<sub>min</sub></b>	69	111	n.a.	79.00	210

In Tabelle 5.2 sind die Indikatoren für die Effizienz sowie die Umwelt- und Qualitätsbewertung aufgeführt. Die Effizienzwerte zeigen im Allgemeinen den starken Einfluss einer hohen Mineralisierung und N-Nachlieferung, die sich in relativ hohen Erträgen in den Nullparzellen manifestierte. Aufgrund der hohen N<sub>min</sub>-Werte bei der Ernte sind die Werte für das N-Verlustpotenzial im Allgemeinen recht hoch. In Bezug auf die Qualität gibt es dagegen nur wenige, nicht signifikante Unterschiede zwischen den gedüngten Varianten.

**Tabelle 5.2:** Indikatoren für scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) und Produktionseffizienz (PE, kg Körnertrag kg N<sup>-1</sup>) für die Berechnung des Wirkungsgrads und Indikatoren für die ökologische und Bewertung und Qualität: N-Verlustpotential und N Saldo, sowie Protein- bzw. Zuckergehalt. Die Werte für Effizienz, Umwelt und Qualität sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

Betrieb	Kultur	Variante	Effizienz		Umwelt		Qualität
			SAE	PE	N Verlustpotential	N Saldo	Proteingehalt
			%	kg* kg N <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>	%
B2	RA	<b>Null</b>	-	-	195	-205	n.a.
B2	RA	<b>N<sub>min</sub></b>	-7.1	37.2	278	-55	n.a.
B2	RA	<b>Betrieb</b>	0.1	34.8	299	-55	n.a.
B2	HW	<b>Null</b>	-	-	n.a.	-126	10.5
B2	HW	<b>KN</b>	107.9	57.3	n.a.	-135	14.5
B2	HW	<b>Betrieb</b>	91.2	64.2	n.a.	-115	12.9
B2	GE	<b>Null</b>	-	-	n.a.	-93	7.6
B2	GE	<b>N<sub>min</sub></b>	99.6	58.6	403	-25	9.3
B3	DK	<b>Null</b>	-	-	187	-110	10.8
B3	DK	<b>N<sub>min</sub></b>	61.3	66.1	214	-86	11.7
B3	DK	<b>Betrieb</b>	157.9	79.7	141	-139	12.8
B4	WW	<b>Null</b>	-	-	n.a.	-197	11.7
B4	WW	<b>KN</b>	5.6	56.6	n.a.	-94	12.5
B4	WW	<b>Betrieb</b>	18.5	47.6	n.a.	-83	12.7
							<b>Zuckergehalt</b>
							%
B5	ZR	<b>Null</b>	-	-	n.a.	-177	20.6
B5	ZR	<b>N<sub>min</sub></b>	48.6	1144.9	n.a.	-141	19.5

\*kg Ertrag (z.B. Körner oder Rüben)

## Demoversuch

Die Parzelle wurde, wie im 2022, in 4 Unterparzellen unterteilt: die drei GRUD-Methoden (Norm,  $N_{\min}$  und Korrigierte Norm) und eine Nullparzelle (Abb. 25, a). Zusätzlich wurde ein Teil als Standard vom Betrieb gedüngt. Das Feld wurde mit **Winterweizen** für Saatgut am 15.10.2022 gesät und am 18.07.2023 gedroschen. Für die Analyse wurden Handproben vor der Ernte genommen.

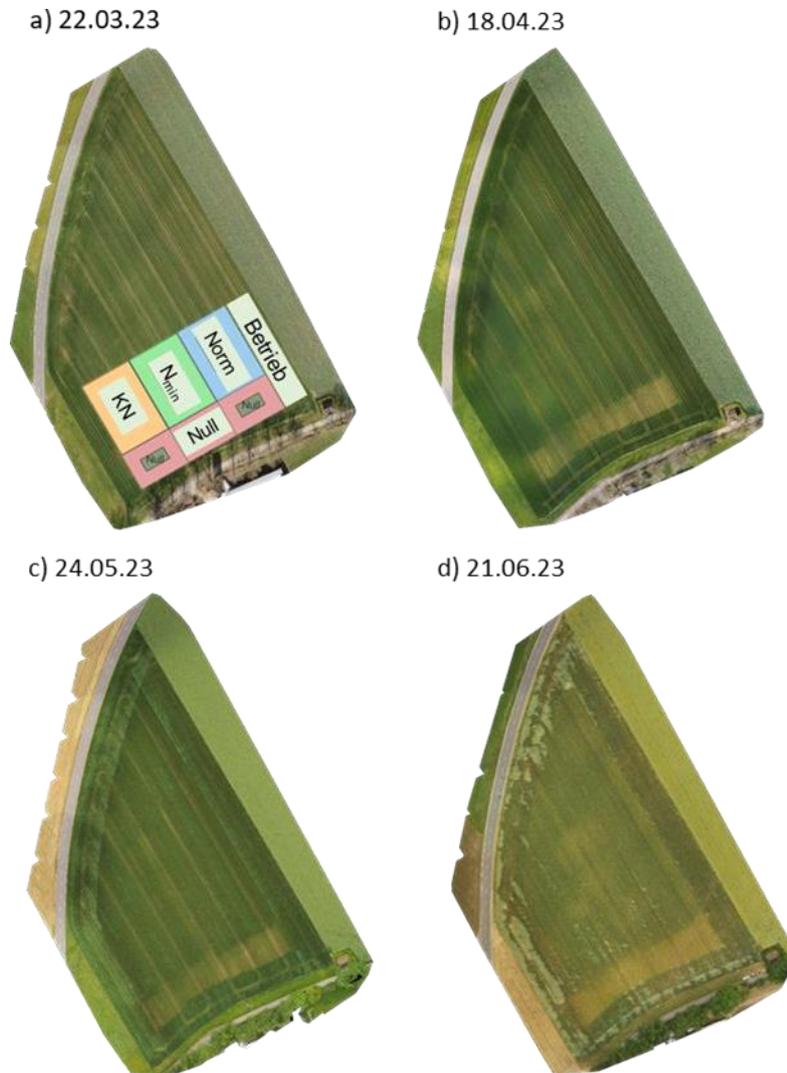


Abbildung 25: Luftbild von Demoversuch mit den 5 Parzellen: Norm,  $N_{\min}$ , Korrigierte Norm (KN), Betrieb und Null (a) über die Saison in März (a), April (b), Mai (c) und Juni (d).

Der Düngereinsatz wurde bei der  $N_{\min}$ - und Korrigierten Norm-Variante um 30 beziehungsweise 20% der Norm für Winterweizen reduziert, ohne einen signifikanten Unterschied im Ertrag (gesamte Biomasse) zwischen den gedüngten Varianten (Tabelle 5.1). Der Ertrag bei der  $N_{\min}$ -Variante scheint etwas niedriger zu sein. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die vom Labor erhaltenen  $N_{\min}$ - Gehalte leider einen Fehler aufwiesen und die Berechnung der Düngbedarf auf der Grundlage von Werten durchgeführt wurde, die um den Faktor 10 höher waren als die tatsächlichen Werte. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die Reduktion bei der  $N_{\min}$ -Variante über der optimalen Grenze lag. Bei der Variante mit korr. Norm war dieses Muster jedoch nicht zu beobachten.

Die Nullparzelle war signifikant ertragsärmer, was zu einer Gesamt-Biomasse von  $4.8 \text{ t N ha}^{-1}$  führte. Dies deutet auf das potenzielle N-Angebot hin, das hauptsächlich aus dem Boden und der atmosphärischen Deposition stammt.

**Tabelle 5.3:** Parameter, die während der Saison und bei der Ernte auf dem Feld erhoben werden: ausgebrachter N-Dünger, Ertrag, N-Abfuhr und N-Auswaschung. Die Werte für Output, Effizienz und Umwelt sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

	Input	N <sub>min</sub>			Output		
	N Düngung kg N ha <sup>-1</sup>	Frühjahr kg N ha <sup>-1</sup>	Ernte kg N ha <sup>-1</sup>	Herbst kg N ha <sup>-1</sup>	Ertrag t ha <sup>-1</sup>	N-Abfuhr kg N ha <sup>-1</sup>	N-Auswaschung kg N ha <sup>-1</sup>
<b>Null</b>	0	60	62	66	4.77	101	30
<b>Norm</b>	140	53	47	76	7.11	224	46
<b>N<sub>min</sub></b>	95	56	47	65	6.80	180	98
<b>KN</b>	110	50	62	105	7.87	229	57
<b>Betrieb</b>	155	53	77	79	7.04	239	NA

Die Scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) war bei allen Varianten hoch und lag durchschnittlich bei 83-116%, was auf den hohen Einfluss der N-Nachlieferung des Bodens hinweist. Betrachtet man die Produktionseffizienz (PE), so scheinen die Varianten mit reduziertem Dünger eine effizientere Kornproduktion pro kg ausgebrachtem N zu haben.

**Tabelle 5.4:** Parameter, die während der Saison und bei der Ernte auf dem Feld erhoben werden: scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) und Produktionseffizienz (PE, kg Körnertrag kg N<sup>-1</sup>) für die Berechnung des Wirkungsgrads und Indikatoren für die ökologische Bewertung: N-Verlustpotential und N Saldo (ohne Auswaschung, die Analyse sind noch im Lauf). Die Werte für Effizienz, Umwelt und Ökonomie sind als Mittelwert angegeben (n = 3).

	Effizienz		Umwelt		Ökonomie	
	SAE %	PE kg Ertrag kg N <sup>-1</sup>	N Verlustpotential kg N ha <sup>-1</sup>	N Saldo kg N ha <sup>-1</sup>	Protein Gehalt %	Saldo CHF ha <sup>-1</sup>
<b>Null</b>	-	-	62	-101	9.8	2481
<b>Norm</b>	87.7	50.8	65	-84	11.3	3641
<b>N<sub>min</sub></b>	83.0	71.6	64	-85	12.5	3497
<b>KN</b>	116.2	71.6	44	-119	13.4	4047
<b>Betrieb</b>	88.7	45.4	94	-84	14.2	3596

Zur Berechnung des potenziellen N-Verlustes und der Nettoveränderungen des N-Pools auf der Grundlage der N-Düngung und der N- Abfuhr aus dem Feld durch die Pflanzen wurde die in den Methoden beschriebene N-Bilanzmethode verwendet (Tab. 5.4). Das N-Verlustpotential umfasst auch den N<sub>min</sub> bei der Ernte. Die Werte zeigen, dass das Verlustpotential relativ hoch war (44 bis 94 kg N ha<sup>-1</sup>). Der Proteingehalt lag nur in zwei Varianten (Null und Norm) unter dem Grenzwert von 12.5 % für Qualität Zuschlag/Abzug im Brotweizen. In diesem Fall wurde der Weizen jedoch nicht für die Brotherstellung, sondern als Saatgut verkauft. Die wirtschaftlichen Auswirkungen sind daher in den Saldos, in denen die Unterschiede nicht signifikant sind, geringer.

## 6 Ergebnisse – 2024

### 6.1 Feldsaison 2024

In dieser Sektion werden die vorläufigen Ergebnisse aus CriticalN der letzten 3 Jahre (2022–2024) in Bezug auf die Düngeempfehlungen nach  $N_{\min}$  und korrigierter Norm, im Vergleich zur Düngung nach Norm und/oder Betrieb, dargestellt.

#### 6.1.1 Wetter

Die Wetterbedingungen in der Vegetationsperiode 2024 (Okt-23 bis Nov-24) waren charakterisiert durch eine kumulative Niederschlagsmenge von 1711 mm. Die Summe über das Jahr 2024 (ohne Dez-2024) war 1130 mm, und lag bei dem regionalen Jahresmittelwert (1170 mm, bodenmessnetz.ch 2013–2023, Kestenholz). Die durchschnittliche Lufttemperatur lag bei 10.5 °C (Abb. 26). Die Niederschläge waren also sehr hoch im Spätherbst und Winter mit rund 600 mm kumulativem Niederschlag über 3 Monate (Nov-2023 bis Jan-2024). Der Frühling war auch durch intensive Niederschläge charakterisiert.

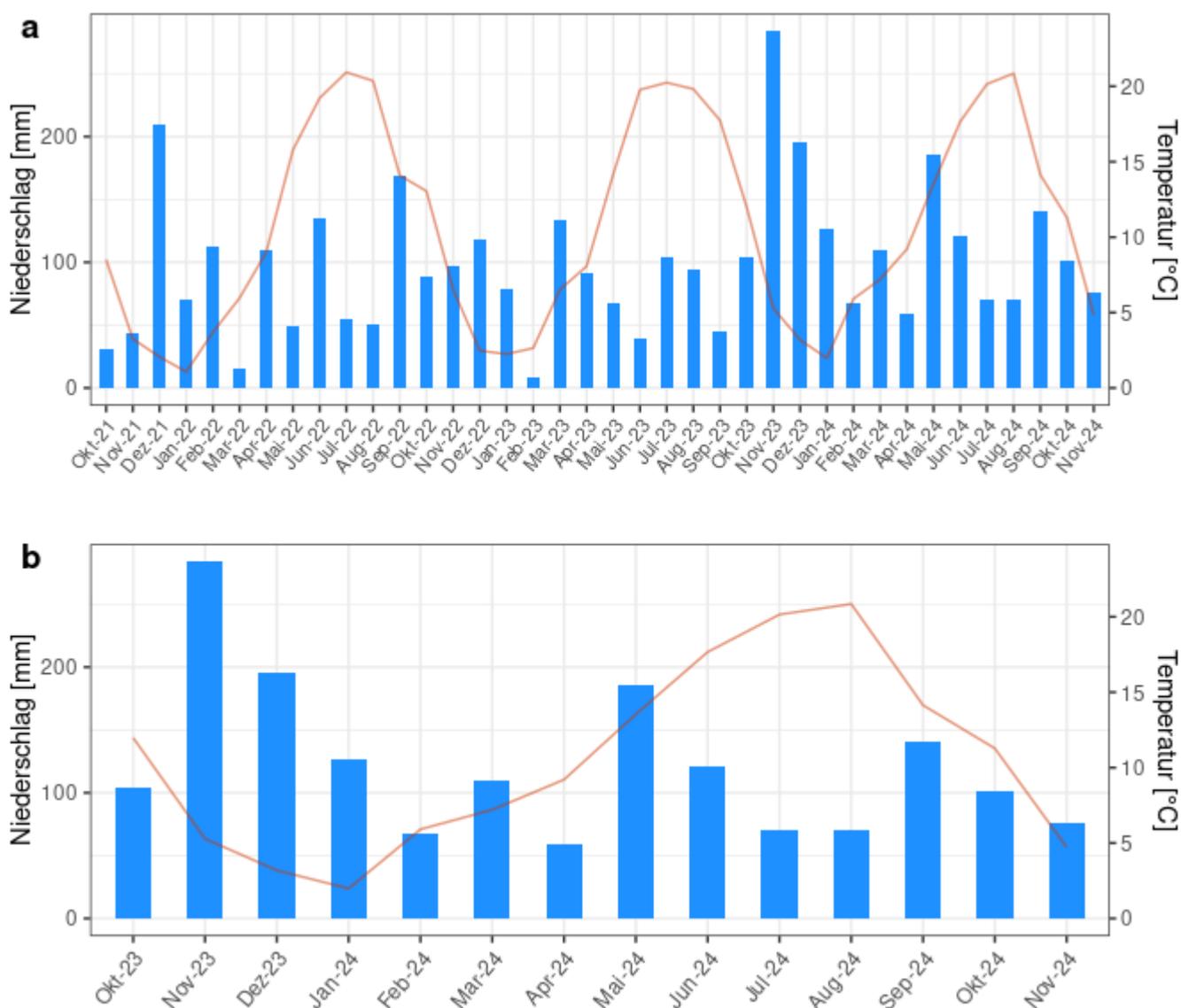


Abbildung 26: Monatliche Niederschlagssumme (mm) und Temperaturmittelwerte (°C) in der Vegetationsperiode 2022–2024 (a, Okt-21 bis Nov-24) und detaillierte Ansicht in der Vegetationsperiode 2024 (b, Okt-23 bis Nov-24) im Gäu. Datenquelle: Wetterstation Kestenholz – [Bodenmessnetz \(meteotest.ch\)](https://www.bodenmessnetz.ch).

Der Grundwasserstand in Kestenholz schwankte in den letzten 3 Jahren zwischen 425 und 429 m ü. M. mit einem Höchststand im Frühjahr 2024 als Folge der oben genannten Niederschläge. (Abb. 27).

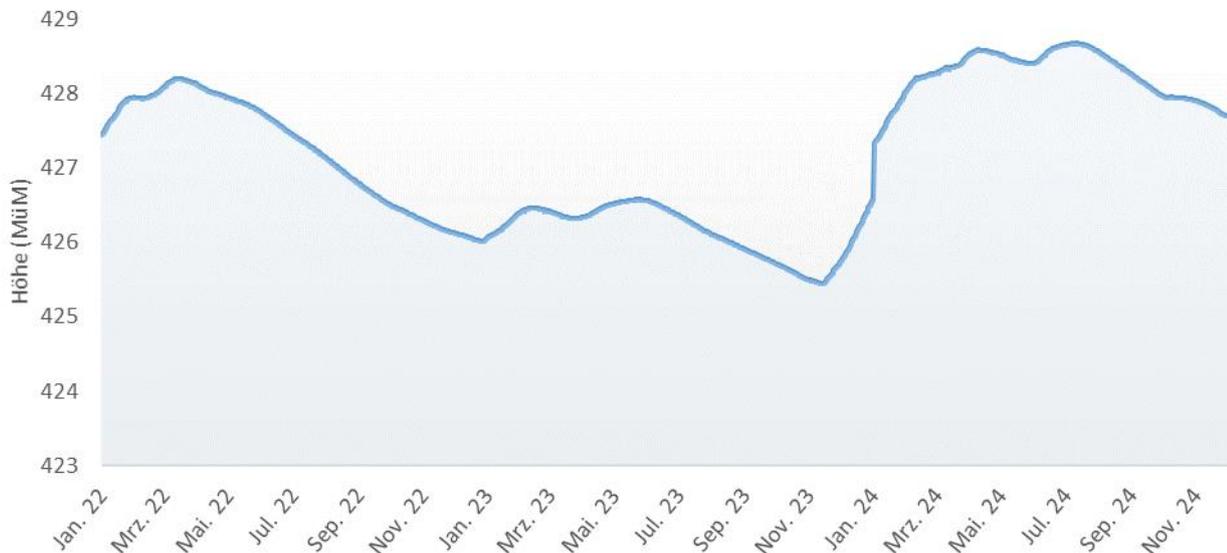


Abbildung 27: Grundwasserstand (m ü. M.) über drei Jahre 2022–2024 in der Messstelle Kestenholz (HBSOa-4008-02-00). Datenquelle: Amt für Umwelt Kt. Solothurn, Hydrometrie - [Hydrometrie - Daten - Umweltdaten - Kanton Solothurn](#).

### 6.1.2 Entwicklung der $N_{min}$ -Werte und Einblicke in den Herbst- $N_{min}$

Die  $N_{min}$ -Dynamik im Boden (0-90 cm) im Zeitverlauf über 3 Jahre (dargestellt als zweimonatliche Medianwerte, Abb. 28) zeigte, dass die Werte auf regionaler Ebene zwischen Winter- und Sommerperioden schwankten und dass die  $N_{min}$ -Messwerte in extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen (Stilllegungsflächen) erwartungsgemäss niedriger sind als in Ackerbauflächen.

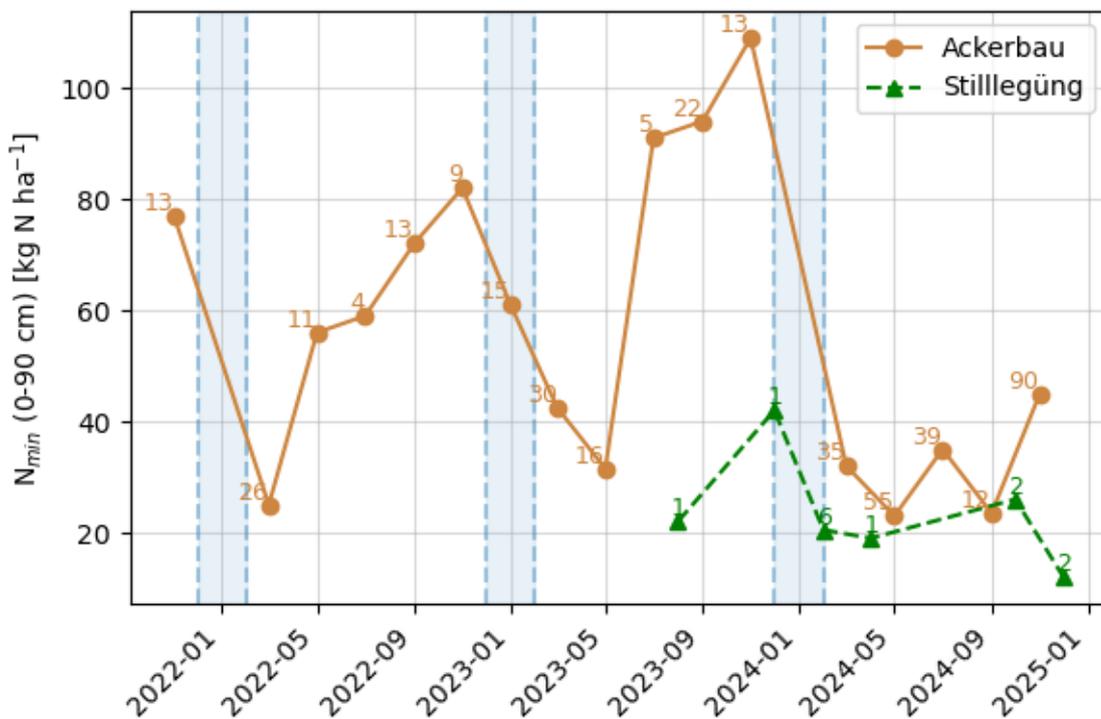


Abbildung 28:  $N_{min}$ -Dynamik im Zeitverlauf 2021–2024 als zweimonatliche Medianwerte (0-90 cm;  $kg N ha^{-1}$ ) aller  $N_{min}$ -Analysen (ca. 700). Die extensiv bewirtschafteten Flächen (Stilllegungsflächen) sind grün dargestellt. Die Zahlen über dem Symbol geben die Anzahl der Werte für jeden Punkt an. Die blauen Rechtecke stellen die Winterperioden zwischen dem 01. November und dem 01. Februar dar.

Zwischen Herbst 2023 und Frühjahr 2024 sanken die  $N_{min}$ -Werte von einem Median von etwa 86 kg N ha<sup>-1</sup> auf einen Median von 32 kg N ha<sup>-1</sup> (Abb. 29). Ein deutlicher Rückgang der  $N_{min}$ -Gehalte über den Winter weist darauf hin, dass ein Grossteil des Stickstoffs ins Grundwasser ausgewaschen wurde.

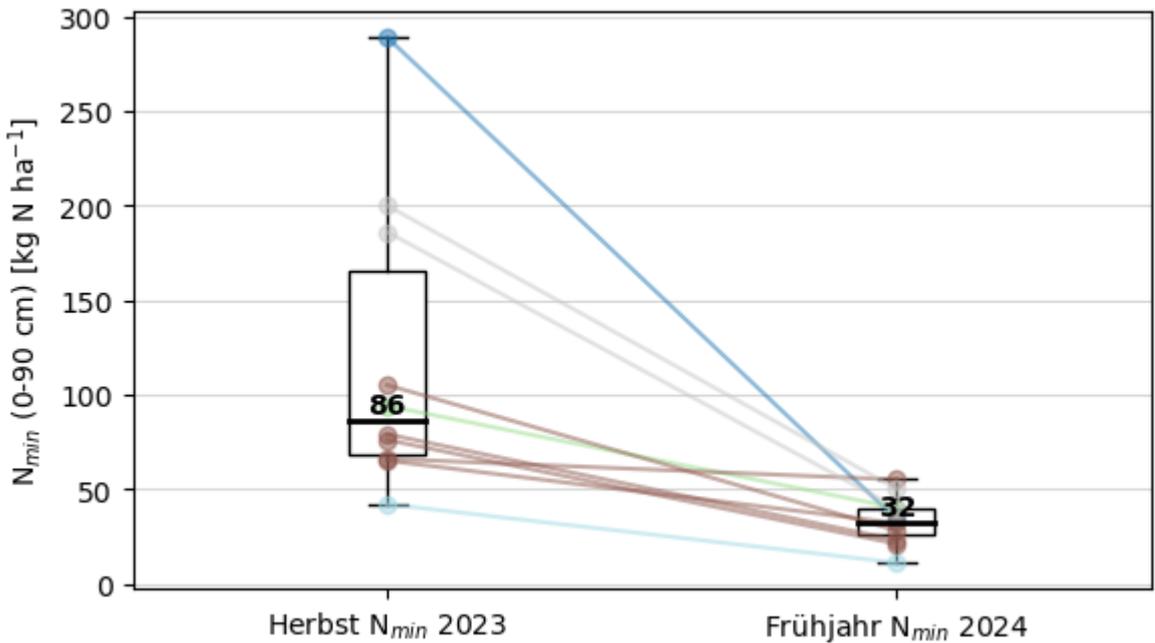


Abbildung 29:  $N_{min}$ -Medianwerte (kg N ha<sup>-1</sup>) von gleichen Parzellen im Herbst 2023 (Ende Oktober) und Frühjahr 2024 (Februar).

Die Herbstkampagne 2024 war die bisher grösste, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurde. Die Abbildung 30 gibt den Mittelwert und den Medianwert des  $N_{min}$  in allen untersuchten Feldern an, wobei die Nullparzellen (Null) und die extensiv bewirtschafteten Flächen (EW) separat dargestellt sind. Der Mittelwert und der Medianwert lagen bei etwa 50 kg N ha<sup>-1</sup> für die allgemeinen Werte (Alle ausser Null und EW), bei etwa 35 kg N ha<sup>-1</sup> für die Nullparzellen mit einer viel geringeren Variation und bei etwa 20 kg N ha<sup>-1</sup> für die extensiven Wiesen (mind. 5 Jahre ohne Düngung).

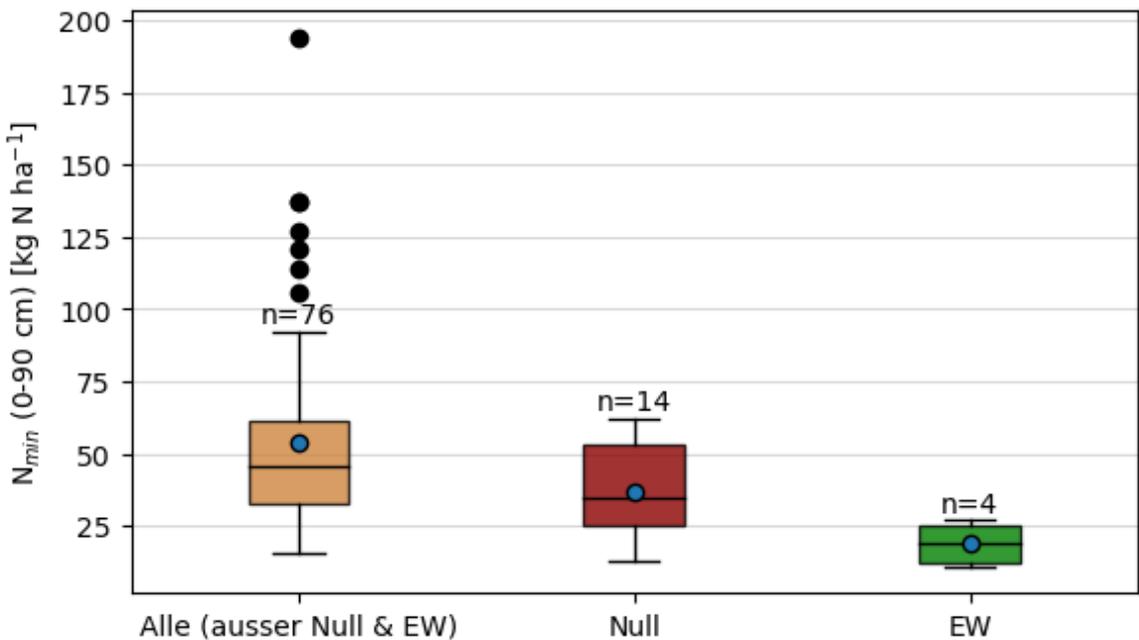


Abbildung 30: Mittelwert und den Medianwert des  $N_{min}$  (kg N ha<sup>-1</sup>) in allen untersuchten Feldern (Alle, n = 76) an, wobei die Nullparzellen (Null, n = 14) und die extensiv bewirtschafteten Flächen (EW, Grün, n = 4) separat dargestellt sind.

$N_{min}$  ist ein pünktliches Mass für dynamische Prozesse und daher zeitlich variabel. Im Rahmen der  $N_{min}$ -Kampagne wurden 12 Proben in denselben Feldern zu Beginn der Kampagne (20. Okt bis 5. Nov) und erneut am Ende (15. Nov bis 18. Nov) analysiert. Der Medianwert änderte sich zwischen den frühen  $N_{min}$ -Proben (39 kg N ha<sup>-1</sup>) und der Kontrolle (47 kg N ha<sup>-1</sup>) nicht signifikant. Die Proben der meisten Parzellen waren relativ stabil oder stiegen leicht an, nur zwei Proben in derselben Parzelle zeigten einen drastischen Rückgang.

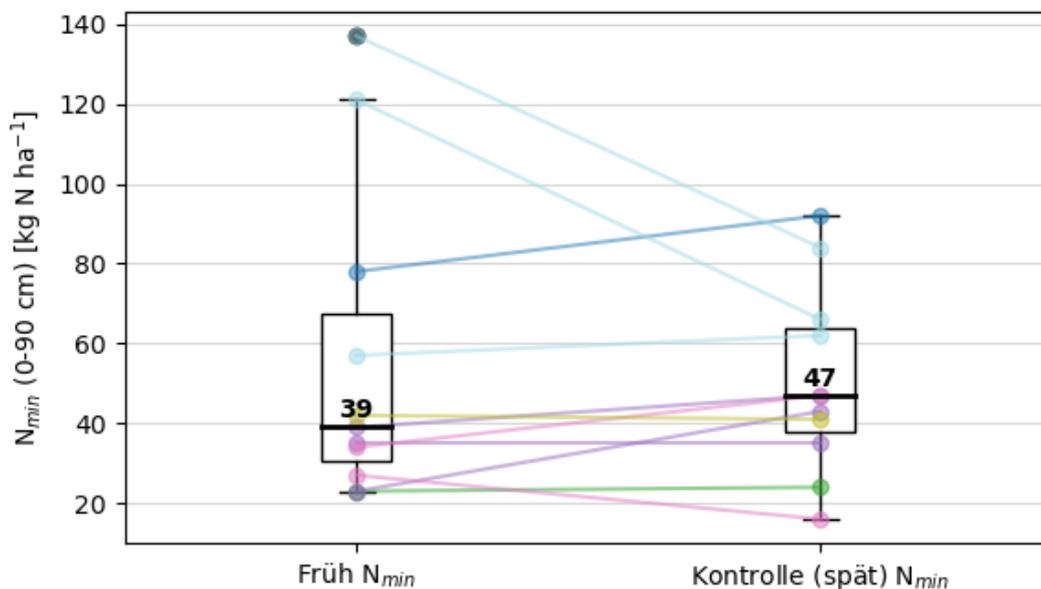


Abbildung 31: Mittelwert und Medianwert des  $N_{min}$  (kg N ha<sup>-1</sup>) von gleichen Parzellen im Herbst 2024, die zunächst im Rahmen der Kampagne analysiert wurden (20. Okt bis 5. Nov) und später erneut als Kontrolle (15. Nov bis 18. Nov).

### 6.1.3 Erhöhte Hofdüngeranrechnung im Nitratprojekt

Im Rahmen des Projekts wurde beschlossen, eine neue Massnahme einzuführen, bei der die Anrechnung des Pflanzenverfügbaren N (N<sub>verf</sub>) im Hofdünger um 10% erhöht wird. Die Idee besteht darin, die Mittelfristige N-Verfügbarkeit in % des Gesamt-N-Gehaltes in Hofdüngern besser zu berücksichtigen und dem Stickstoff aus Hofdüngern mehr Gewicht zu verleihen. Nach GRUD, Kapitel 4, basiert die Anrechnung entweder auf den Werten aus Tabelle 4/6, Spalte 6 (N<sub>verf</sub>), angepasst an Verdünnungsfaktoren, oder auf Tabelle 4/7, Spalte 2 (Mittelfristige N Verfügbarkeit in % des Gesamt-N-Gehaltes). Im Projekt werden die Werte der Tabelle 4/7 genommen und mit einem absoluten Zuschlag von 10% erhöht. Z.B. wird für Rindergülle der aktuelle Mittelwert von 60% auf 70% erhöht, so dass bei 100 kg Gesamt-N, 70 kg N<sub>verf</sub> statt 60 kg N<sub>verf</sub> angerechnet werden. Alternativ zu den Richtwerten, wird die Hofdüngersanalyse herangezogen, wobei der anrechenbare Stickstoff als Summe aus NH<sub>4</sub>-N und zusätzlichen 10% des Gesamtstickstoffs berechnet wird.

**Tabelle 6.1:** Beschreibungen der Indikatoren für den Gesamtgehalt, den verfügbaren Anteil und die berechnete Stickstoff- (N-) Nachlieferung aus Hofdünger (Rinder-Vollgülle), die zur Berechnung der potenziellen Erhöhung des angerechneten verfügbaren N nach Analyse oder aus dem Leitfaden der GRUD-Werte verwendet wurden.

N-Gehalt	Beschreibung
Gesamt-N	Basiert auf Gesamt-N Gehalt
N <sub>verf_1a</sub>	basiert auf Ammonium-N Gehalt
N <sub>verf_1+b</sub>	basiert auf Ammonium-N Gehalt + 10% von Gesamt N
N <sub>verf_2c</sub>	Mittelfristige N-Verfügbarkeit in % des Gesamt-N-Gehaltes basiert auf <b>GRUD Tabelle 4_6/7 – Mittelwert: 60%</b>
N <sub>verf_2+d</sub>	Mittelfristige N-Verfügbarkeit in % des Gesamt-N-Gehaltes +10% basiert auf <b>GRUD Tab. 4_7 – Mittelwert: 70%</b>
N-Nachlieferung	Anteil des ausgebrachten Gesamtstickstoffs, der im zweiten Jahr pflanzenverfügbar wird (bei Rindergülle 10%)

Abbildung 32 und Tabelle 6.1 zeigen ein Beispiel für diese neue Anrechnung basierend auf der Analyse von Rinder-Vollgülle über 2 Jahre (n = 12, Gesamt-N = 59 kg N ha<sup>-1</sup>) mit einer durchschnittlichen Mehranrechnung im verfügbaren N von 6 kg N ha<sup>-1</sup> bzw. 15-20%. Hier spielt die Varianz des Ammoniumanteils eine entscheidende Rolle. Im Vergleich dazu führt die Anrechnung nach GRUD-Richtwerten ebenfalls zu einer Mehranrechnung von 6 kg N/ha, jedoch nur um 15 % im Durchschnitt. Absolut betrachtet fallen die Werte bei der GRUD-Methode höher aus, was möglicherweise durch die fehlende Berücksichtigung des Nitratanteils bedingt ist.

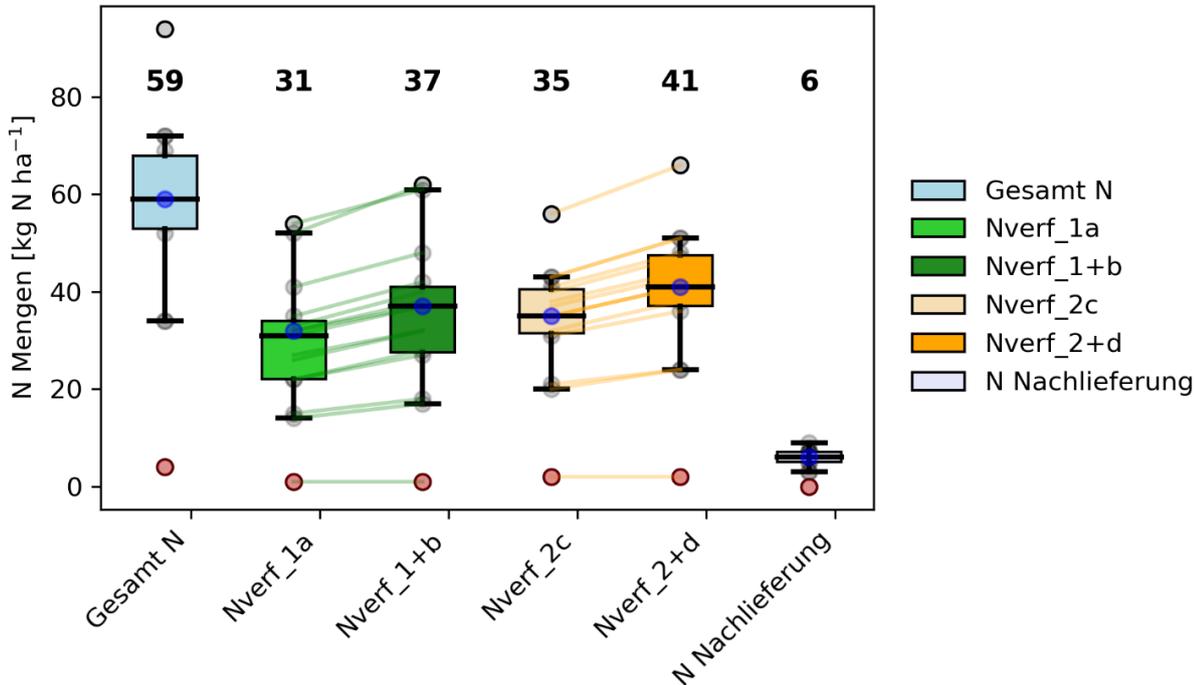


Abbildung 32: Anrechnung der N-Mengen (kg N ha<sup>-1</sup>) basierend auf der Analyse von Rinder-Vollgülle über 2 Jahre (n = 12). Die verschiedenen Indikatoren sind in der Tabelle 6.1 unten beschrieben.

Der Gesamt-N-Gehalt in der analysierten Rinder-Vollgülle (n = 12) wies bei gleichem Trockensubstanzgehalt im Vergleich zu den GRUD-Richtwerten einen durchschnittlich leicht höheren N-Gehalt auf, während der Median der absoluten Werte des Gesamt-N gut mit dem GRUD-Richtwert von 3.9 kg N / m<sup>3</sup> FS übereinstimmte. (Abb.33).

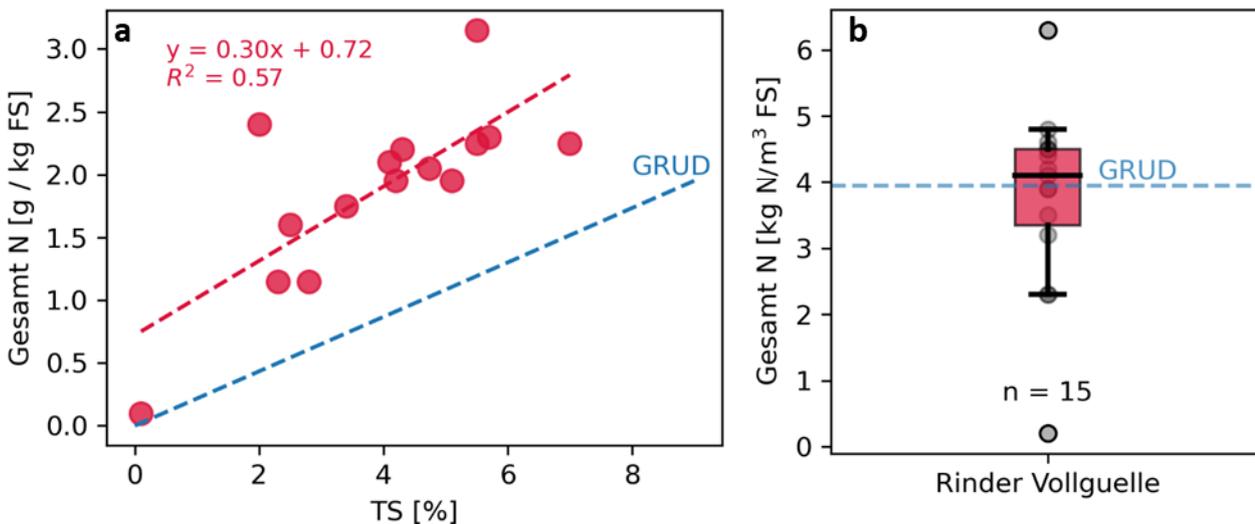


Abbildung 33: a) Verhältnis zwischen Gesamt-N (g / kg FS) und Trockensubstanz (in %) in Rinder-Vollgülle aus Daten von 2 Jahren (n = 12) im Vergleich zu den GRUD-Richtwerten und b) Gesamt-N-Gehalt in Rinder-Vollgülle (kg N / m<sup>3</sup> FS).

### 6.1.4 Darstellung der Düngeempfehlungen für verschiedene Kulturen

#### Winterweizen

Die über drei Jahre für Winterweizen in der Region berechneten N-Düngeempfehlungen zeigten eine grosse Spannweite von 100 bis 180 kg N ha<sup>-1</sup> (Abb. 34). Um die Vorgaben der Wegleitung der Suisse-Bilanz für Nitratprojekte nach Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes einzuhalten (Wegleitung SuiBi V1.17; BLW und Agridea, 2024), wurden im Projekt die praktischen Empfehlungen auf die GRUD-Norm (140 kg N ha<sup>-1</sup> für Winterweizen) begrenzt (SuiBi-62a), um den Düngebedarf auf das Niveau der Standarderträge zu begrenzen (Entscheidung im Projekt CriticalN).

Die Empfehlungen erstreckten sich auf einen Bereich von 100 bis 180 kg ha<sup>-1</sup>. Die Begrenzung gemäss SuiBi-62a spiegelt die effektive Düngeempfehlungen wieder. Hier lagen die Werte zwischen 100 und 140 kg N ha<sup>-1</sup>, wobei viele Parzellen unterhalb der Medianwertes lagen. Der Medianwert für die N<sub>min</sub>-Empfehlungen lag tatsächlich bei 137 kg N ha<sup>-1</sup> (berechnet) bzw. bei 135 kg N ha<sup>-1</sup> (begrenzt gemäss SuiBi-62a), also in der Grössenordnung der Norm. Die korrigierte Norm (berechnet) lag mit 150 kg N ha<sup>-1</sup> ca. 7% über der Norm und bei genau 140 kg N ha<sup>-1</sup> nach SuiBi-62a Begrenzung.

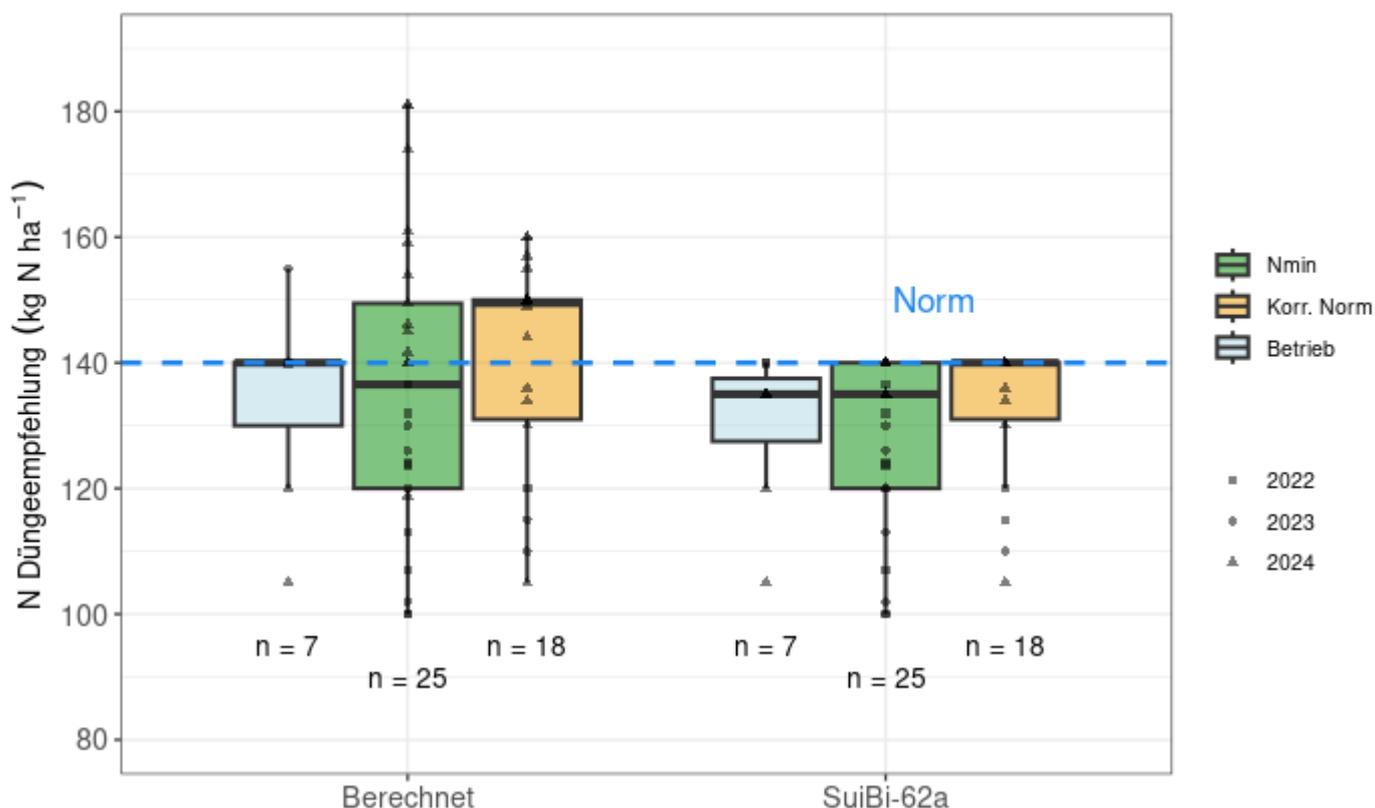


Abbildung 34: N-Düngeempfehlung nach Betrieb, N<sub>min</sub> und korrigierter Norm für Winterweizen über 3 Jahre (2022–2024). Links die berechneten Werte ohne Begrenzung und rechts mit Begrenzung auf die GRUD-Norm (140 kg N ha<sup>-1</sup>) nach der projektspezifischen Interpretation der Wegleitung Suisse-Bilanz in Nitratprojekten nach Artikel 62a (SuiBi-62a).

Die Verteilungen der Empfehlungen, sowohl in Bezug auf die Menge als auch die Anzahl der Empfehlungen, unterschieden sich deutlich zwischen den Jahren: Während in den Jahren 2022 und 2023 ein Reduktionspotenzial von 11–20% erkennbar war, wiesen die standortangepassten Methoden im Jahr 2024 Medianwerte (berechnet) von ca. 150 kg N ha<sup>-1</sup> auf, was rund 7% über der GRUD-Norm liegt (Abb. 35). Die hohen Niederschläge über Winter 2023–2024 führten zu einer starken N-Auswaschung, was zu niedrigen N<sub>min</sub>-Werten und somit zu geringeren Abzügen bei der Düngung führte.

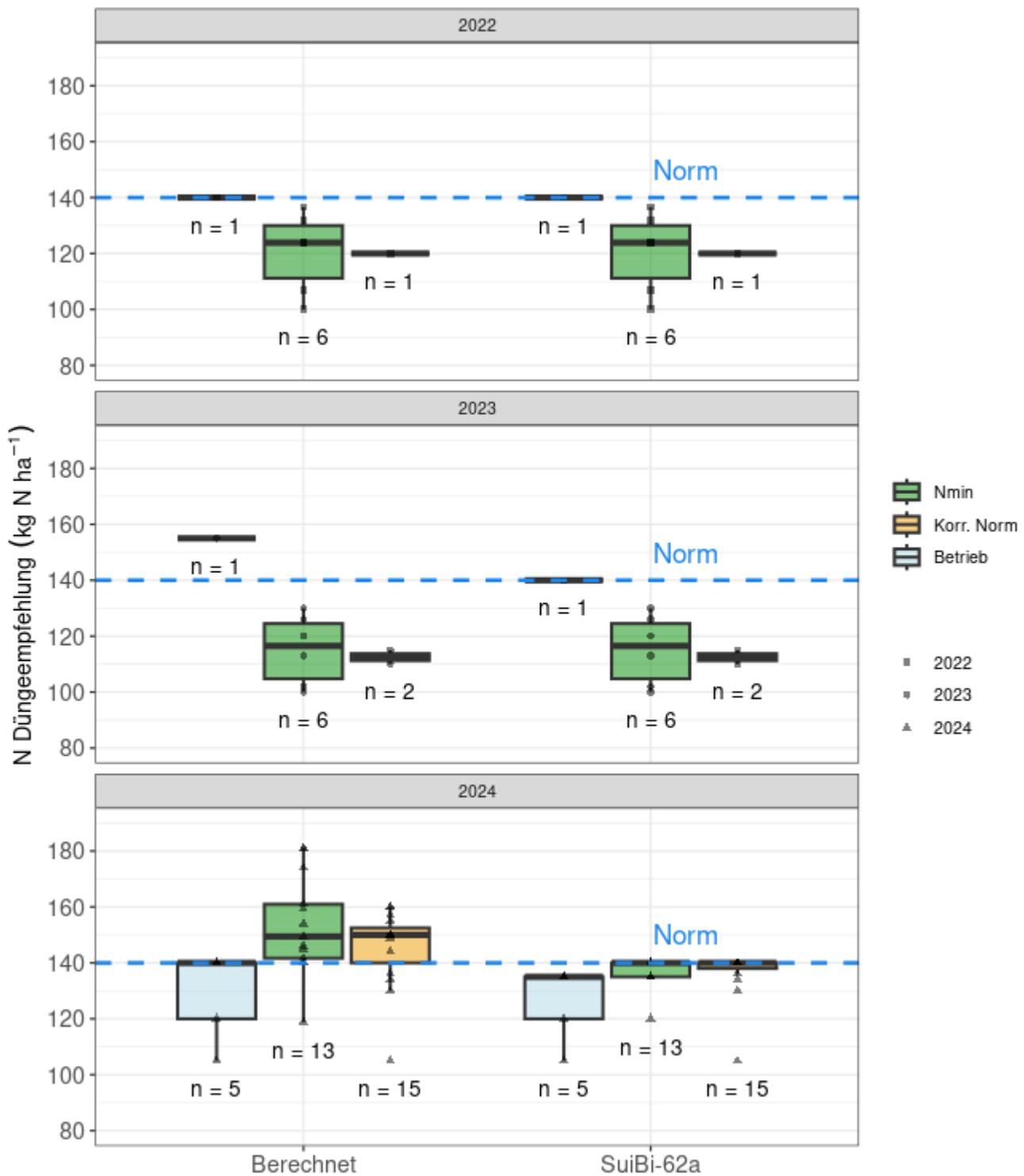


Abbildung 35: N-Düngempfehlung (berechnet) nach Betrieb, Nmin und korrigierter Norm für Winterweizen über die Jahre 2022–2024. Werte ohne und mit Begrenzung gemäss Suisse-Bilanz in 62a-Nitrprojekten (SuiBi-62a) auf die GRUD-Norm (140 kg N ha<sup>-1</sup>).

## Silomais

Die berechneten N-Düngeempfehlungen für Silomais für die drei Jahre in der Region zeigten eine Spannweite von 35 bis 185 kg N ha<sup>-1</sup> (Abb. 36). Um die Vorgaben der SuiBi in 62a-Nitratprojekten einzuhalten, wurden auch für Silomais die praktischen Empfehlungen auf 110 kg N ha<sup>-1</sup> begrenzt. Der Medianwert für die N<sub>min</sub>-Empfehlungen (berechnet) lag bei 120 kg N ha<sup>-1</sup>, was 11% über der Norm lag, und bei 110 kg N ha<sup>-1</sup>, also genau bei der Norm, mit der Begrenzung gemäss SuiBi-62a. Die korr-Norm lag mit 90 kg N ha<sup>-1</sup> ca. 18% unter der Norm.

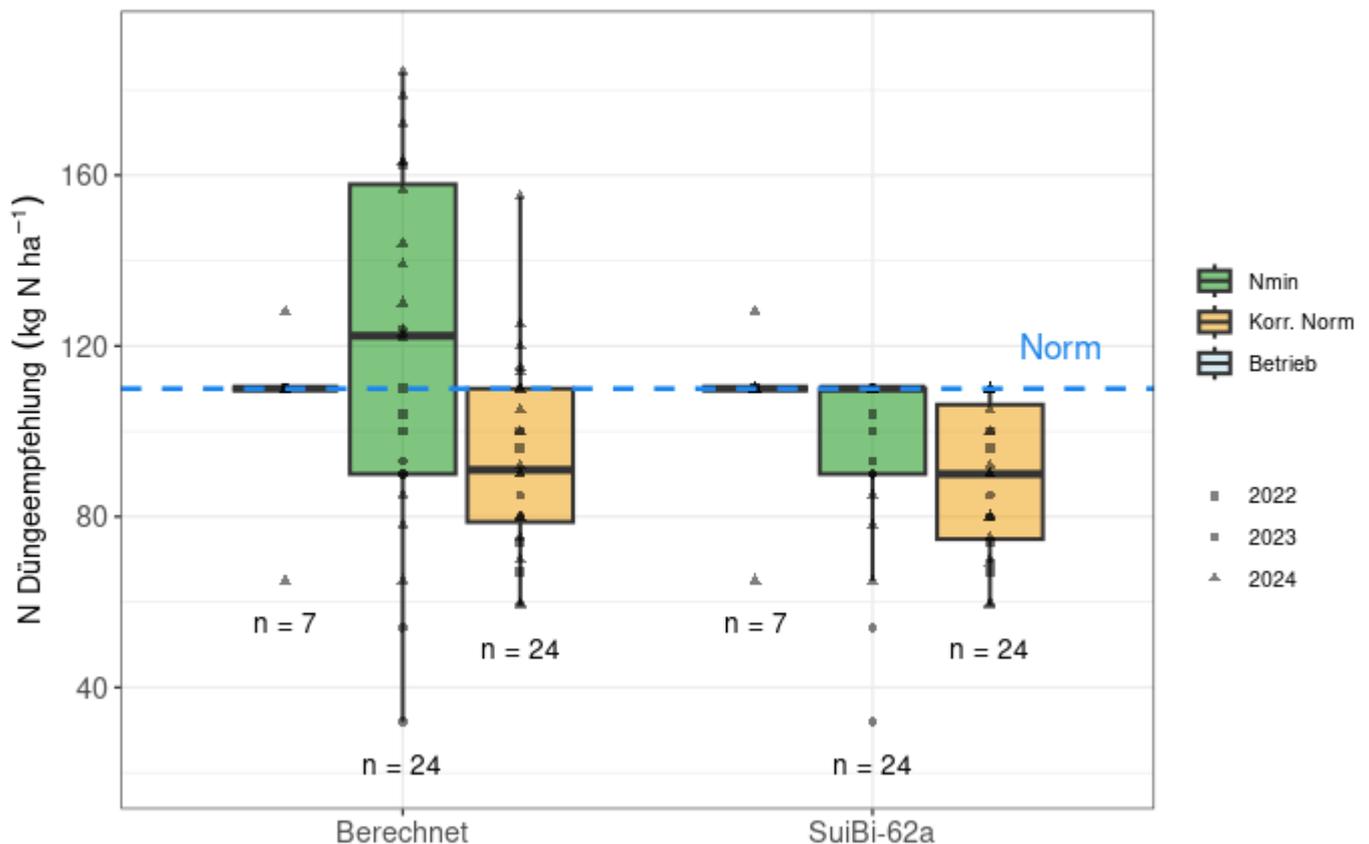


Abbildung 36: N-Düngeempfehlung nach Betrieb, N<sub>min</sub> und korrigierter Norm für Silomais über 3 Jahre (2022–2024). Links die berechneten Werte ohne Begrenzung und rechts mit der Begrenzung auf die GRUD-Norm (110 kg N ha<sup>-1</sup>), nach der projektspezifischen Interpretation der Wegleitung Suisse-Bilanz in Nitratprojekten nach Artikel 62a (SuiBi-62a).

Die Verteilungen der Empfehlungen, sowohl in Bezug auf die Menge als auch die Anzahl der Empfehlungen, unterschieden sich auch hier deutlich zwischen den Jahren: Während in den Jahren 2022 und 2023 ein Reduktionspotenzial von 5–22 % erkennbar war, wies die N<sub>min</sub>-Methode im Jahr 2024 ein Medianwert (ohne Begrenzung) von ca. 144 kg N ha<sup>-1</sup> auf, was rund 30 % über der GRUD-Norm liegt (Abb. 37). Die korrigierte Norm, die ebenfalls hohe Werte aufwies, hatte trotzdem einen Median von 95 kg N ha<sup>-1</sup>, was rund 12% unter der Norm lag.

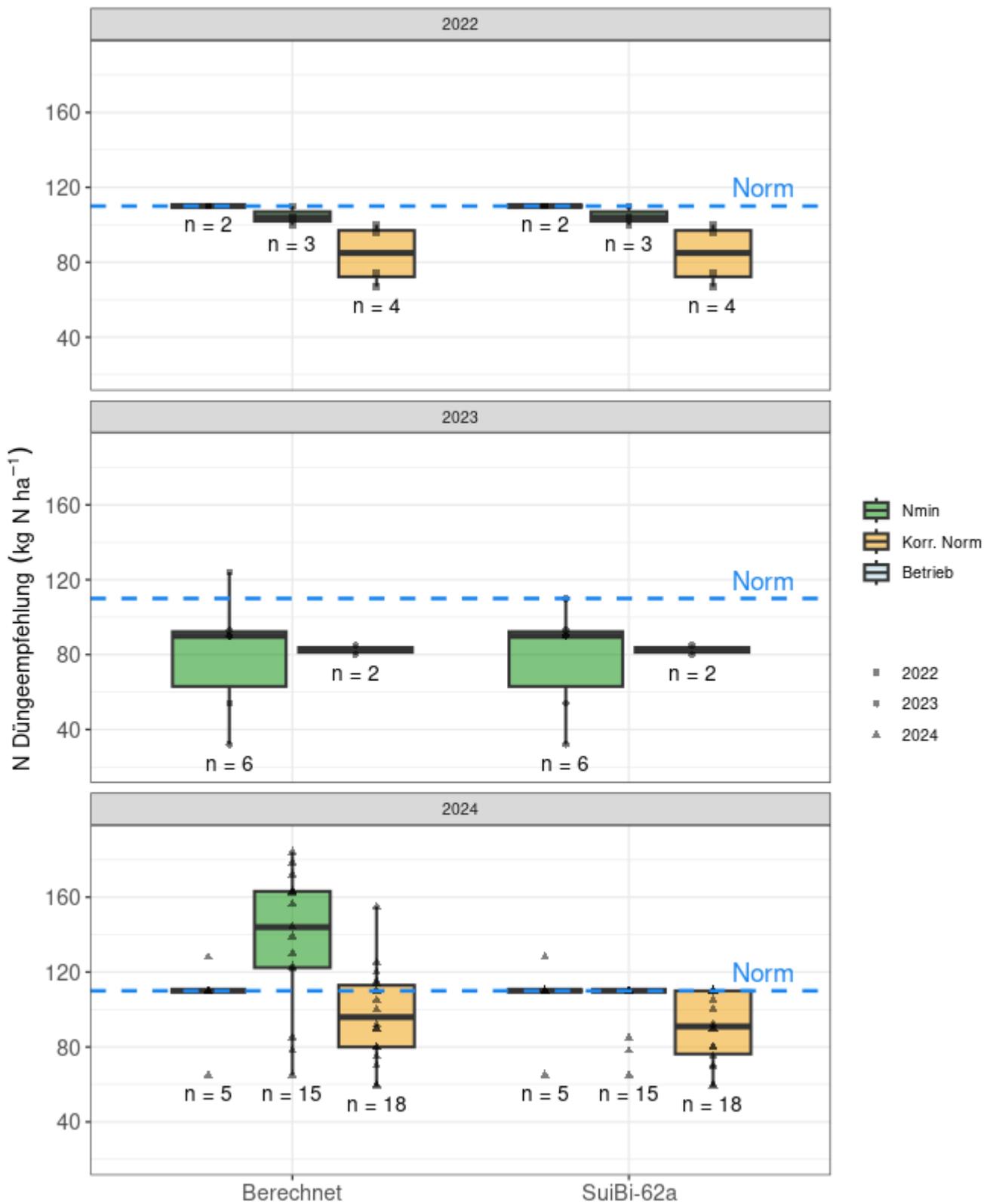


Abbildung 37: N-Düngempfehlung nach Betrieb, Nmin und korrigierter Norm für Silomais über 3 Jahre (2022–2024). Werte ohne und mit Begrenzung gemäss Suisse-Bilanz in 62a-Nitrprojekten (SuiBi-62a) auf die GRUD-Norm (110 kg N ha<sup>-1</sup>).

Wintergerste, Urdinkel, Winterraps und Zuckerrüben

Die über drei Jahre für Wintergerste, Urdinkel, Winterraps und Zuckerrüben berechneten N-Düngeempfehlungen zeigten unterschiedliche Spannweiten (Abb. 38). Um die Vorgaben nach SuiBi-62a einzuhalten, wurden auch bei diesen Kulturen die praktischen Empfehlungen auf die Norm begrenzt (Wintergerste = 110 kg N ha<sup>-1</sup>, Urdinkel (Norm für Dinkel) = 110 kg N ha<sup>-1</sup>, Winterraps 150 kg N ha<sup>-1</sup> und Zuckerrüben 100 kg N ha<sup>-1</sup>). Bei diesen Kulturen ist der Datensatz kleiner als bei Winterweizen und Silomais. Das Einsparpotenzial scheint bei diesen Kulturen dennoch relevant zu sein, mit Ausnahme der korrigierten Norm bei Zuckerrüben. Insbesondere bei Urdinkel lagen die Empfehlungen sowie der Standard oft deutlich unter der Norm, wobei bereits in der Praxis oft wenig bis gar kein Dünger ausgebracht wurde. Auch die Düngeempfehlung im Winterraps scheint niedriger zu sein als die Norm.

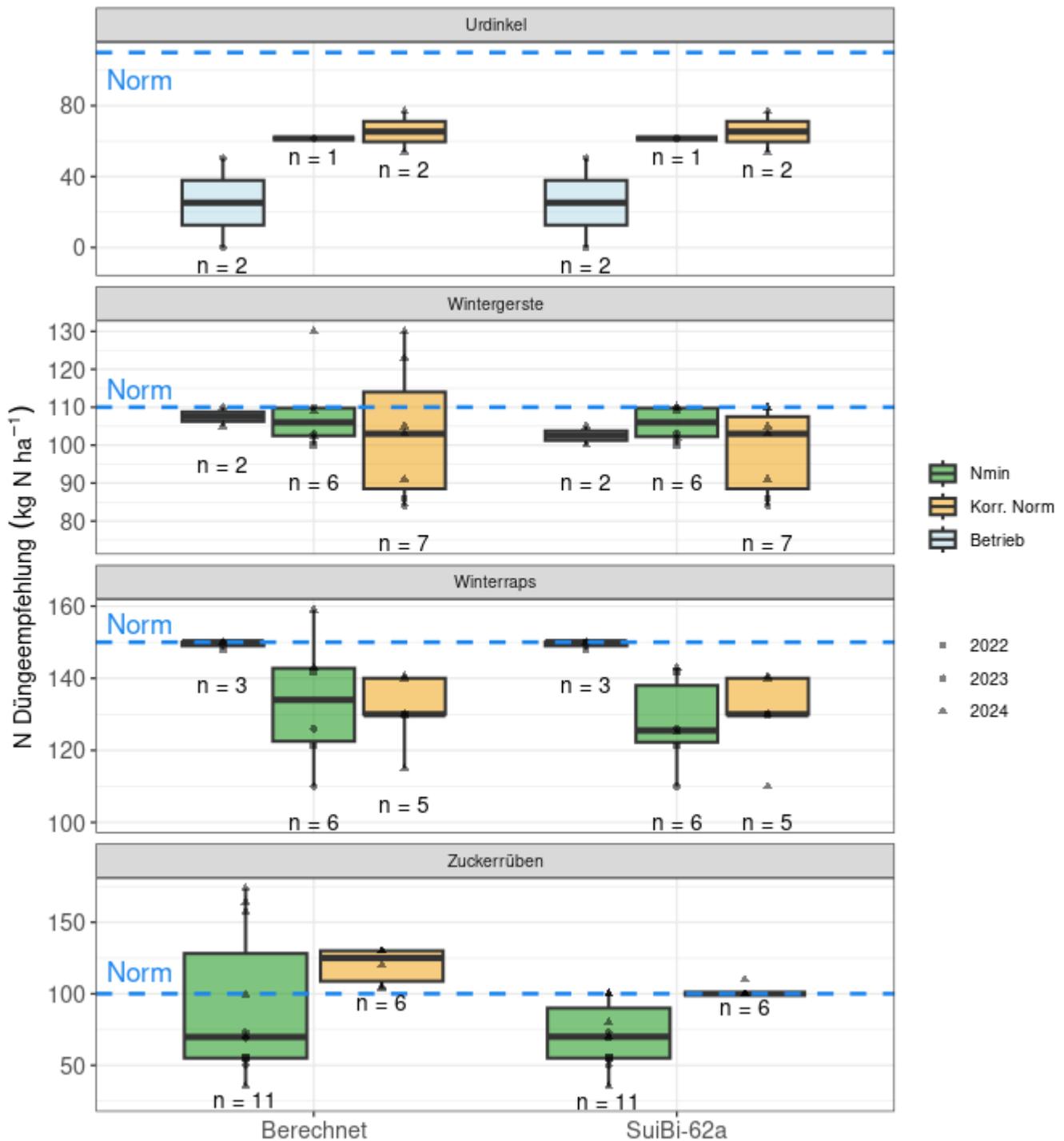


Abbildung 38: N-Düngeempfehlung nach Betrieb, Nmin und korrigierter Norm für Wintergerste, Winterraps und Zuckerrüben über 3 Jahre (2022–2024). Links die berechneten Werte und rechts mit SuiBi-62a Einschränkung auf die GRUD-Norm (Wintergerste = 110 kg N ha<sup>-1</sup>, Urdinkel (Norm für Dinkel) = 110 kg N ha<sup>-1</sup>, Winterraps 150 kg N ha<sup>-1</sup> und Zuckerrüben 100 kg N ha<sup>-1</sup>).

### 6.1.5 N-Bilanz und N-Auswaschung

Die in diesem Abschnitt **gezeigten Daten stammen nur aus den Streifenversuchen und dem dreijährigen Demo-Versuch**. Diese Daten wurden gemeinsam analysiert, um den Ertrag und die N-Bilanz für verschiedene Kulturen im Projekt zu ermitteln. Es sollte also beachtet werden, dass 1) bei der Betrachtung der Daten die drei Jahre erheblich voneinander abwichen und die aggregierten Daten daher eine grosse Varianz aufweisen, 2) bei den Versuchen auf dem Bauernhof nicht alle Behandlungen in jedem Jahr in gleicher Anzahl wiederholt wurden. Die Boxplots werden verwendet, um die Verteilung der Daten darzustellen und den Median für verschiedene Behandlungen zu vergleichen. Der Winterweizen war die Kulturpflanze, für die die meisten Daten gesammelt wurden, und wird daher detaillierter dargestellt. Im Allgemeinen können wir in Abbildung 39 sehen, dass der Ertrag und der Stickstoffzug bei den gedüngten Behandlungen und der Parzelle mit einem höheren Wert als in der Nulldüngung in einem ähnlichen Bereich lagen, wobei ohne Düngung in 2023 immer noch ein Ertrag von bis zu 6 t ha<sup>-1</sup> erzielt wurde.

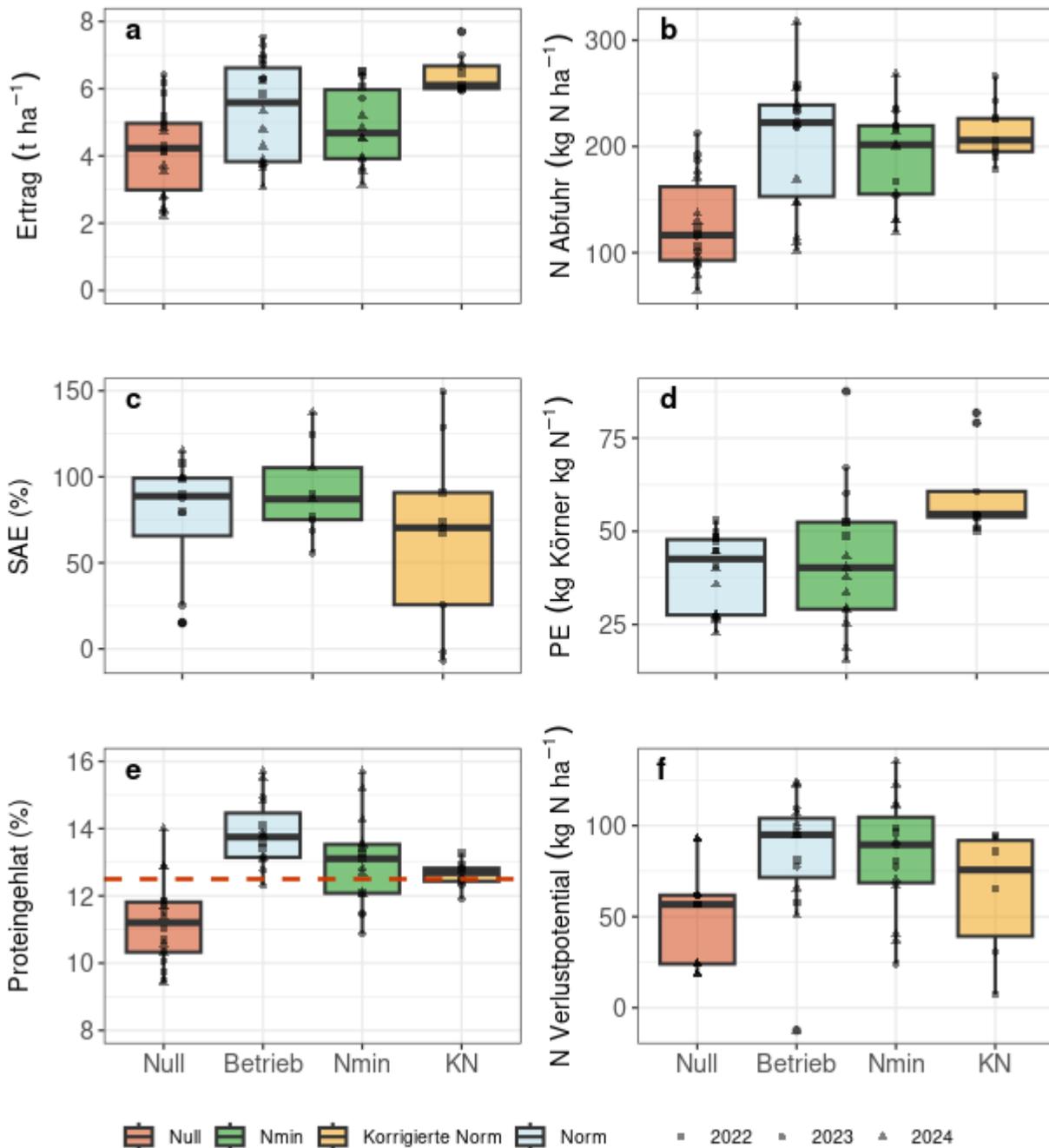


Abbildung 39: Parameter zur Bewertung der Ertragsleistung und N-Bilanz für Winterweizenfelder über drei Jahre (2022–2024): a) Ertrag (t ha<sup>-1</sup>), b) N-Abfuhr (kg N ha<sup>-1</sup>), c) scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE, %), d) Produktionseffizienz (PE, kg Körner kg N ha<sup>-1</sup>), e) Proteingehalt (%), die rote Linie zeigt das Qualitätsminimum für Backweizen, f) N-Verlustpotential (kg N ha<sup>-1</sup>).

Das Jahr 2024 war im Allgemeinen ein schlechtes Jahr für Getreide und senkte den Median von viele Parametern für alle Varianten (mit Ausnahme der KN, das in diesem Jahr diese Variante in keinem Versuch getestet wurde). Die Effizienz war insgesamt vergleichsweise hoch mit einem Median von etwa 85% für die scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) und eine Produktionseffizienz (PE) zwischen 45 und 55 kg Körner kg N<sup>-1</sup>. In Bezug auf die Qualität scheint der Proteingehalt jedoch für Nmin und KornNorm (über der 12.5%-Grenze für Brotweizenqualität) im Vergleich zum Standard des Landwirts niedriger zu sein, was den Trend eines niedrigeren Gehalts – verursacht durch reduzierte Stickstoffdüngung – bestätigt (Sommer & Knuden, 2021). Das Verlustpotenzial (ausgebrachte Düngemittel + Boden-N-Nachlieferung + N<sub>min</sub> bei der Ernte) zeigt letztlich einen Trend zu etwas höheren Werten für den Standard, aber trotzdem zeigen alle Behandlungen zeigen Median zwischen 75 und 100 kg N ha<sup>-1</sup>.

Der Ertrag von Körnermais (Körnerertrag, Abb. 40, a) und Silomais (Biomasseertrag, Abb. 40, b) zeigte einen ähnlichen Trend, wobei es für Körnermais keinen Versuch mit der korrigierten Norm gab. Die Daten der Saison 2024 werden jedoch noch analysiert und später aktualisiert. Der Trend ist auch bei den übrigen Kulturen sichtbar, obwohl der Datensatz hier limitiert ist (Abb. 41).

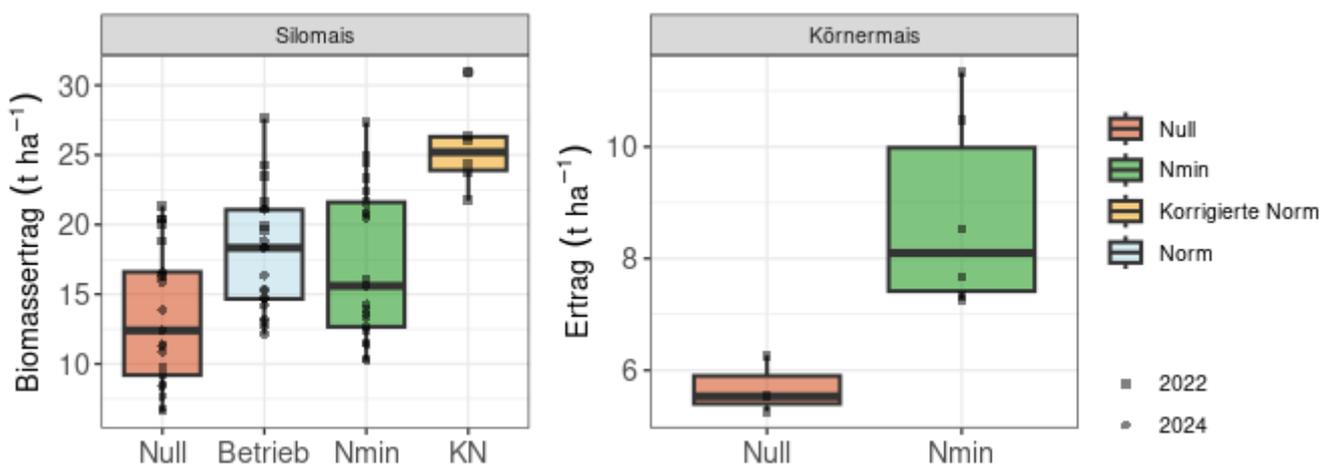


Abbildung 40: Parameter zur Bewertung der Ertragsleistung für Maisfelder über zwei Jahre (2022 und 2024): a) Körnerertrag für Körnermais (t ha<sup>-1</sup>), b) Biomasse Ertrag für Silomais (t ha<sup>-1</sup>).

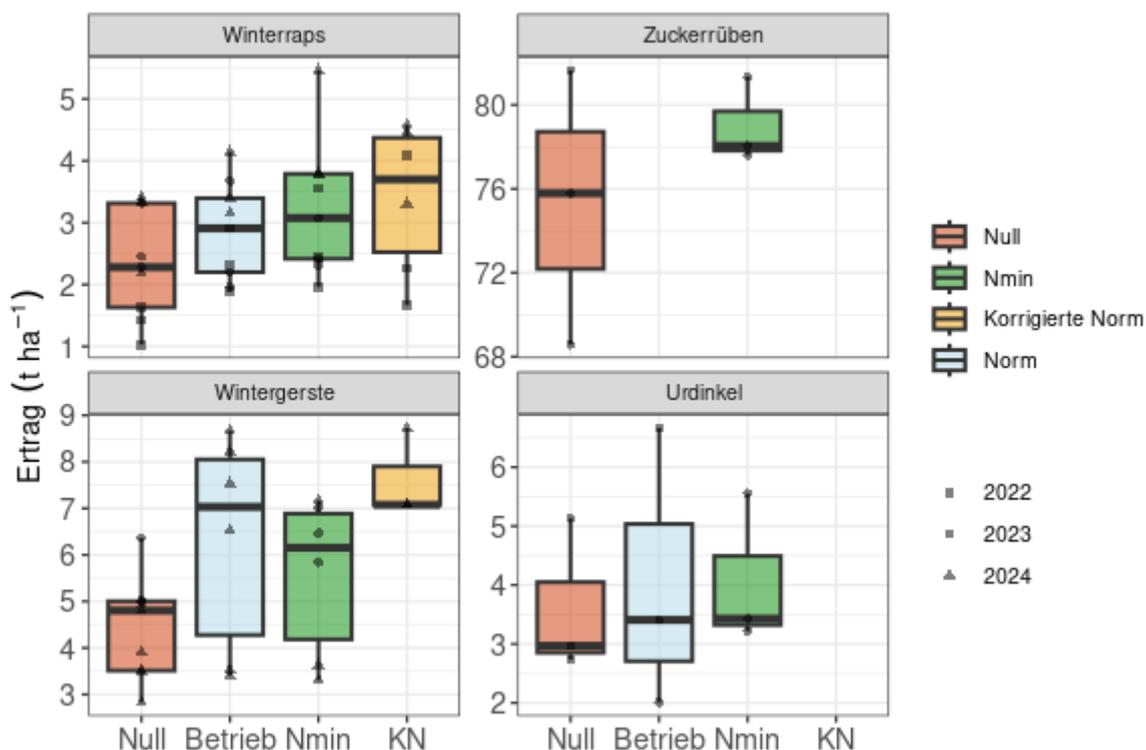


Abbildung 41: Parameter zur Bewertung der Ertragsleistung (t ha<sup>-1</sup>) über drei Jahre (2022–2024)) für a) Winterraps, b) Zuckerrüben, c) Wintergerste und d) Urdinkel.

Wir konnten beobachten, dass bei Winterraps der Unterschied zu den Nullparzellen geringer ist als bei Winterweizen und Mais (Abb. 41, a). Wir sollten darauf hinweisen, dass die Nullparzellen einjährig sind und der Raps oft noch von im Herbst stattgefundenen Gülleausbringungen profitierte. Die Düngung im Herbst wird oft noch als Teil des Managements der Vorkultur wahrgenommen, also bevor die neue Kultur auf der Parzelle ausgesät wird. Die Nullparzellen zeigen also nur, was in der Hauptsaison vom Boden ohne Düngung nachgeliefert wird. Sie sind dementsprechend nur im Frühjahr umgesetzt.

Zuckerrüben zeigten ähnliche Ergebnisse für  $N_{min}$  (keine korrigierte Norm oder Betrieb) (Abb. 41, b). Bei Wintergerste war die Situation ähnlich wie bei Winterweizen, und wir konnten 2024 einige sehr niedrige Erträge beobachten, die die Variation erhöhten (Abb. 41, c). Zuletzt zeigte Urdinkel (Abb. 41, d) nur geringe Unterschiede, was jedoch darauf zurückzuführen ist, dass fast kein Dünger ausgebracht wurde (siehe Abschnitt 6.1.4).

Der N-Versorgung war im Allgemeinen zwischen den Kulturgruppen (Getreide, Mais und Winterraps) vergleichbar (Abb. 42). Wir haben versucht, den N-Vorrat auf zwei verschiedene Arten zu berechnen: mit dem ausgebrachten Dünger, der dem  $N_{min}$  im Frühjahr hinzugefügt wurde (zum Zeitpunkt der Düngemittelausbringung, Abb. 42 oben), oder mit der N-Nachlieferung (gemessen anhand des N-Entzugs der Nullparzellen, Abb. 42 unten). Die auf der Bodenversorgung basierende N-Versorgung war höher als die auf  $N_{min}$  basierende. Die Beziehung zwischen der N-Abfuhr und der N-Versorgung zeigte, dass die N-Abfuhr bei Winterweizen und Winterraps kein Plateau erreichte (bei Mais nur geringfügig). Dieser Datensatz ist jedoch noch begrenzt und wird mit weiteren Daten integriert und mit dem N-Überschuss verglichen.

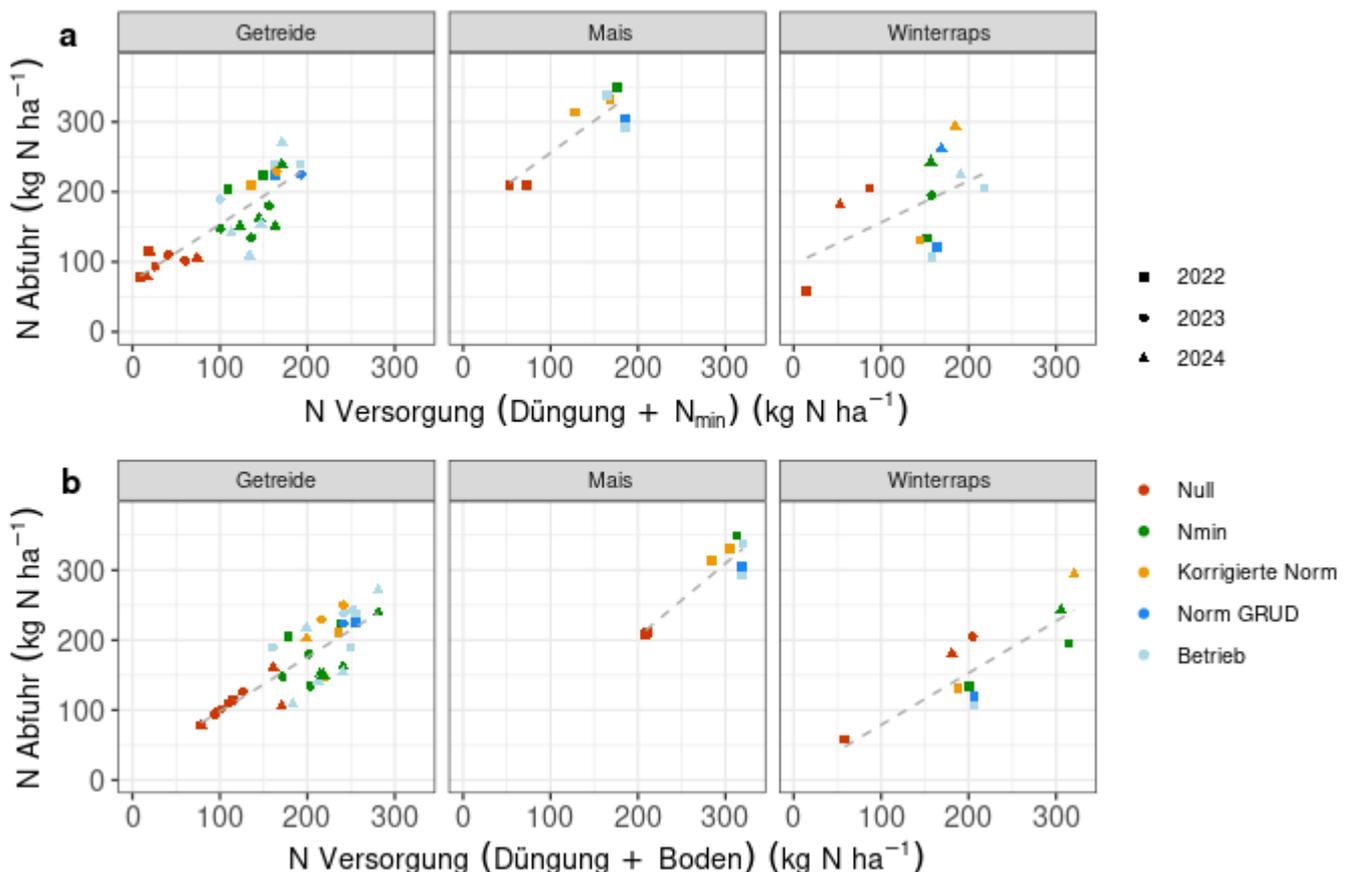


Abbildung 42: N-Abfuhr ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) gegen N-Versorgung ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) als a) Dünger +  $N_{min}$  im Frühjahr und b) Dünger + Boden N-Nachlieferung (Abfuhr der Nullparzelle) für Wintergetreide, Mais und Winterraps.

Die über drei Jahre hinweg auf zwei Feldern gemessene N-Auswaschung zeigte, dass die Auswaschung unter Silomais im Sommer und unter Raps nach Winterweizen während der gesamten Saison fast vernachlässigbar war und definitiv unter dem Überschuss von 30 kg N ha<sup>-1</sup> lag, der als kritischer N-Wert für die Region gilt (Abb. 43). Dagegen wurde unter Winterweizen nach einer spät geernteten Kultur (Silomais und Zuckerrüben) eine hohe Auswaschung festgestellt (50-120 N ha<sup>-1</sup>). Zu diesem Zeitpunkt war es aufgrund des begrenzten Datensatzes nicht möglich, signifikante Unterschiede zwischen den Düngemittelvarianten in Bezug auf die N-Auswaschung festzustellen. Die Nullparzellen zeigten jedoch eine geringere Auswaschung an.

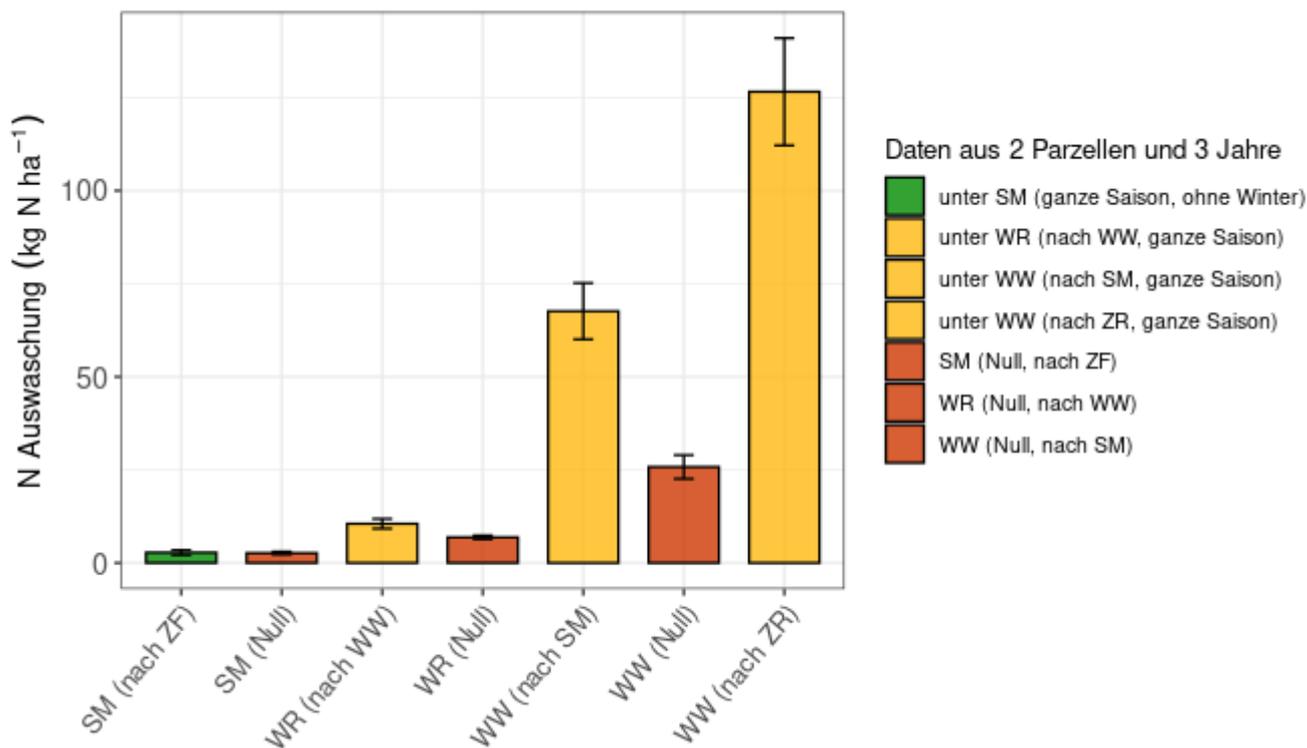


Abbildung 43: N-Auswaschung (kg N ha<sup>-1</sup>) unter drei Kulturen (Silomais, Winterraps und Winterweizen) in verschiedenen Fruchtfolgen auf zwei Feldern über drei Jahre mit entsprechenden Nullparzellen, sofern verfügbar.

## 7 Allgemeine Diskussion und erste Schlussfolgerungen

Nach drei Jahren Feldversuchen ermöglichen die Daten eine erste vorsichtige Bewertung und einige Schlussfolgerungen zu den vordefinierten Zielen des Projekts.

### 7.1 Wetterbedingungen

Die Wetterbedingungen während der Vegetationsperiode 2024 (Oktober 2023 bis November 2024) waren von extremen Niederschlagsmengen und moderaten Temperaturen geprägt. Die kumulierte Niederschlagsmenge in diesem Zeitraum betrug 1711 mm, wobei das Jahr 2024 (ohne Dezember) mit 1130 mm über dem regionalen Jahresmittelwert von 1170 mm lag. Besonders auffällig war die starke Niederschlagskonzentration im Spätherbst und Winter, mit insgesamt rund 600 mm in drei Monaten (November 2023 bis Januar 2024). Diese hohen Niederschläge führten zu einem signifikanten Anstieg des Grundwasserstands in Kestenholz, der im Frühjahr 2024 mit einem Höchststand von etwa 429 m ü. M. gipfelte. Der Frühling war ebenfalls durch intensive Regenfälle gekennzeichnet, die sowohl die Bodenfeuchtigkeit als auch die Nährstoffverfügbarkeit beeinflussten. Diese klimatischen Extrembedingungen hatten direkte Auswirkungen auf die Stickstoffdynamik im Boden, insbesondere auf die Mineralisierung und die Verfügbarkeit von  $N_{\min}$  für die Pflanzen.

### 7.2 $N_{\min}$ Dynamik

Die  $N_{\min}$ -Dynamik im Boden zeigte über die letzten drei Jahre hinweg deutliche saisonale Schwankungen, die in enger Beziehung zu den Wetterbedingungen standen. Die  $N_{\min}$ -Werte, die als zweimonatliche Medianwerte über 90 cm Bodentiefe dargestellt sind, variierten insbesondere zwischen den Winter- und Sommermonaten. In den extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen, die auch Stilllegungsflächen umfassten, lagen die  $N_{\min}$ -Werte erwartungsgemäß im unteren Bereich, was auf eine geringere mineralische N-Mineralisation aufgrund des niedrigen Nährstoffgehalts und der geringeren Bodenbearbeitung hindeutet. Zwischen Herbst 2023 und Frühjahr 2024 sanken die  $N_{\min}$ -Werte deutlich, von einem Median von etwa 86 kg N ha<sup>-1</sup> im Herbst auf 32 kg N ha<sup>-1</sup> im Frühjahr 2024. Diese Entwicklung war typisch für die jahreszeitlichen Schwankungen, da die  $N_{\min}$ -Werte im Winter meist aufgrund der Auswaschung abnehmen. Besonders interessant war die sehr geringe Variation der  $N_{\min}$ -Werte in den Nullparzellen, die keine Düngung erhielten, und in den extensiv bewirtschafteten Flächen, was auf eine stabile, aber insgesamt geringe N-Versorgung in diesen Bereichen hinweist. Die medianen  $N_{\min}$ -Werte für alle untersuchten Flächen lagen bei etwa 50 kg N ha<sup>-1</sup>, wobei die Nullparzellen mit 35 kg N ha<sup>-1</sup> eine deutlich geringere Variation aufwiesen und die extensiven Wiesen mit nur etwa 20 kg N ha<sup>-1</sup>  $N_{\min}$  anzeigten. Extensive Wiesen, die über viele Jahre nicht gedüngt wurden, beziehen Stickstoff ausschliesslich aus der langfristigen Bodennachlieferung, während Nullparzellen, die nur in diesem Jahr bzw. für diese Kultur nicht gedüngt wurden, zusätzlich Stickstoff aus Düngeüberschüssen oder der Mineralisierung der Vorfrucht nutzen können, wodurch ihre N-Gehalte höher sind als die der extensiven Wiesen.

### 7.3 N Düngeempfehlungen

Die über drei Jahre berechneten Düngeempfehlungen für Winterweizen in der Region wiesen eine grosse Spannweite von 100 bis 180 kg N ha<sup>-1</sup> auf, was auf die starken Schwankungen der  $N_{\min}$ -Werte und die unterschiedlichen Wetterbedingungen zurückzuführen ist. Um die Vorgaben der Wegleitung der Suisse-Bilanz in Nitratprojekten nach Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes einzuhalten (Wegleitung SuiBi V1.17; BLW und Agridea, 2024), wurden im Projekt die praktischen Empfehlungen auf die GRUD-Norm (140 kg N ha<sup>-1</sup> für Winterweizen) begrenzt (SuiBi-62a), um den Düngebedarf auf das Niveau der Standarderträge zu leiten (Entscheidung im Projekt CriticalN).

Für die berechnete Düngeempfehlungen war die Spannweite der Empfehlungen viel breiter als für die begrenzte Düngebedarfsbemessung gemäss SuiBi-62a. Dort war der Medianwert der  $N_{\min}$ -basierten Empfehlungen über 3 Jahre nahe an der GRUD-Norm für Winterweizen, etwas über die Norm für Silomais, aber eher unter den Norm für den anderen Kulturen. Die Empfehlungen unter der korrigierten Norm lagen eher unter der Norm. Die Verteilung der berechneten Düngeempfehlungen zeigte zwischen den Jahren signifikante Unterschiede: Während in den Jahren

2022 und 2023 ein Reduktionspotenzial von 10–20% erkennbar war, wiesen die standortangepassten Düngeempfehlungen im Jahr 2024 einen Medianwert auf, der über der GRUD-Norm liegt. Für Silomais, der ebenfalls Teil des Projekts war, wiesen die  $N_{\min}$ -basierten Düngeempfehlungen im Jahr 2024 trotz eines Medianwerts von 144 kg N ha<sup>-1</sup>, was etwa 30% über der GRUD-Norm liegt, weiterhin hohe Werte auf. Dies zeigt die starke Nährstoffnachlieferung durch die hohen Niederschläge und den erhöhten Grundwasserstand im Jahr 2024. Allerdings wurde in der Praxis nach SuiBi-62a gedüngt und damit konnte die insgesamt ausgebrachte Stickstoffmenge deutlich reduziert werden. Andere Kulturen, wie Wintergerste und Winterraps, die auch im 2024 niedrigere Düngeempfehlungen erhielten, zeigen ein deutliches Reduktionspotenzial bei der Düngung. Diese Ergebnisse unterstreichen die Flexibilität der Düngeempfehlungen, die in Abhängigkeit von den saisonalen und standortspezifischen Bedingungen angepasst werden können, und dass beide Düngungsmethoden im Projekt den Stickstoffeintrag optimieren und gleichzeitig den Umweltschutzanforderungen gerecht werden können. Trotzdem ist es wichtig zu beachten, dass die Ertragserwartung in ausserordentlichen Jahren besser angepasst werden sollte.

## 7.4 N-Bilanz und N-Auswaschung

Die gemeinsamen Analysen aus den Streifen- und Demonstrationsversuchen zeigen, dass Ertrag, Stickstoffeffizienz und Verluste stark von den Wetterbedingungen, der Bewirtschaftung und den spezifischen Kulturbedingungen beeinflusst werden. Winterweizen, als die Kultur mit den meisten Daten, lieferte eine solide Grundlage für die Bewertung, wobei der Ertrag und die Stickstoffentfernung bei gedüngten Behandlungen relativ stabil blieben. Die scheinbare Ausnutzungseffizienz (SAE) erreichte einen Median von etwa 85%, während die Produktionseffizienz (PE) zwischen 45 und 55 kg Körner pro kg N variierte. Diese Effizienzwerte sind als vergleichsweise hoch einzustufen. Allerdings war das Jahr 2024 ein herausforderndes Jahr für den Getreideanbau, was zu einem Rückgang der Mediane führte. Hinsichtlich der Qualität zeigte sich, dass der Proteingehalt für  $N_{\min}$ - und Korrigierte Norm-Behandlungen im Vergleich zu Standardempfehlungen etwas niedriger war, was die Tendenz zu einem geringeren Proteingehalt bestätigt. Auch andere Kulturen wie Silomais, Körnermais, Zuckerrüben, Wintergerste und Urdinkel zeigten interessante Trends. Für Körnermais gab es keine Versuche mit der korrigierten Norm, aber die Erträge waren stabil und vergleichbar mit den Standardbehandlungen. Zuckerrüben und Wintergerste wiesen ebenfalls Schwankungen auf, wobei vor allem das Jahr 2024 die Variation der Erträge erhöhte. Urdinkel zeigte nur geringe Unterschiede zwischen den Behandlungen, da hier oft kaum oder gar kein Dünger ausgebracht wurde. Bei Silomais waren die Biomasseerträge hoch, wobei die Auswaschungsverluste während der Sommermonate nahezu vernachlässigbar waren. Diese Ergebnisse unterstreichen die unterschiedlichen Nährstoffanforderungen und möglichen Umweltbelastungen der einzelnen Kulturen.

Die Analyse der N-Auswaschung zeigt differenzierte Ergebnisse. Auf zwei Feldern, die über drei Jahre (2022–2024) untersucht wurden, war die N-Auswaschung unter Silomais im Sommer sowie unter Raps nach Winterweizen während der gesamten Saison nahezu vernachlässigbar. Sie lag deutlich unter dem kritischen Überschuss von 30 kg N ha<sup>-1</sup>, der für die Region als Grenze gilt. Im Gegensatz dazu wurden unter Winterweizen, der auf spät geerntete Kulturen wie Silomais oder Zuckerrüben folgte, hohe Auswaschungsraten festgestellt. Dies bestätigt Ergebnisse aus früheren Projekten wie «NitroGäu» (Bünemann-König et al., 2022; Frick et al., 2022) und hebt die Bedeutung einer Fruchtfolgeplanung und Düngung hervor, wo Mais und andere Spätherbst-Kulturen weniger N-Überschuss produzieren. Auffällig war, dass die Nullparzellen geringere N-Auswaschungsraten zeigten, was die Bedeutung reduzierter N-Düngung nochmals unterstreicht. Aufgrund der begrenzten Datenmenge konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten in Bezug auf die Auswaschung festgestellt werden. Die Ergebnisse betonen die Notwendigkeit, Stickstoffverluste standortspezifisch zu minimieren, insbesondere durch angepasste Düngezeitpunkte und eine Fruchtfolge, die z.B. eher mit einer Gründüngung oder früheren Direktsaat die Winterbedeckung erreichen kann.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Herausforderungen und Potenziale bei der Kombination von konsequenter Anwendung der standortangepassten Düngung (inklusive Begrenzung gemäss Suisse-Bilanz in 62a Nitratprojekten) sowie Berücksichtigung der Boden- und Gülleanalysen in der landwirtschaftlichen Praxis. Sie zeigen zudem, dass die Wahl der Düngestrategie und der Fruchtfolge (z.B. benötigen Sommerkulturen vor Winterweizen oder anderen schwach aufnehmenden Kulturen mehr Aufmerksamkeit) entscheidend für die Minimierung der Stickstoffverluste und die Erreichung nachhaltiger Anbauziele ist.

## 8 Literaturverzeichnis

- AfU Solothurn, 2022.** [Das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten - Amt für Umwelt - Kanton Solothurn](#)
- Agridea, 2024.** Wegleitung Suisse-Bilanz, Version 1.19. [Ökologischer Leistungsnachweis](#)
- Argento, F., Liebisch, F., Anken, T., Walter, A. and El Benni, N. 2022.** Investigating two solutions to balance revenues and N surplus in Swiss winter wheat. *Agricultural Systems* 201, 103451. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103451>.
- Bürge, D. und Agroscope. 2020.** Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. Version 1.2. Agroscope Reckenholz, Zurich (Switzerland).
- Frick, H. 2022.** Nitrate leaching from animal manure - Insights from on-farm and greenhouse studies using 15N labelled cattle slurry (PhD thesis). ETH Zurich, Zurich (Switzerland). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000545812>.
- Grossrieder J., Ringger C., Argento F., Grandgirard R., Anken T. und Liebisch F. 2022.** Stickstoff-Einsatz dank standortangepasster Düngung effizienter. *Agrarforschung Schweiz* 13, 103–113. [Stickstoff- Einsatz dank standortangepasster Düngung effizienter - Agrarforschung Schweiz](#)
- Maltas, A., Charles, R., Pellet, D., Dupuis, B., Levy, L., Baux, A., Jeangros, B. and Sinaj, S. 2015.** Evaluation zweier Methoden für eine optimale Stickstoffdüngung im Ackerbau. *Agrarforschung Schweiz* 6(3), pp. 84-93. [https://www.agrarforschungschweiz.ch/wpcontent/uploads/2019/12/2015\\_03\\_2049.pdf](https://www.agrarforschungschweiz.ch/wpcontent/uploads/2019/12/2015_03_2049.pdf)
- Sinaj, S. und Richner, W., 2017.** Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8(6).
- Sommer, S. G., & Knudsen, L., 2021.** Impact of Danish livestock and manure management regulations on nitrogen pollution, crop production, and economy. *Frontiers in Sustainability*, 2, 658231. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.658231>
- Tanner E., Liebisch F., und Bretscher D. 2024.** N-Düngereinsparungen mittels der korrigierten Normen: Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept. *Agrarforschung Schweiz*, 15, 304-312. <https://doi.org/10.34776/afs15-304g>

## 9 Anhang

### 9.1 Preisliste für Düngung bei Landor im Dezember 2022.



#### Preisliste 1. bis 31. Dezember 2022



Name	Vorname
Strasse	Plz, Ort
Telefon	Datum

Preise: Alle Preis inkl. 2.5% MwSt

Konditionen: Anbruchpalette + Fr. 2.50 / 100 kg  
 1 - 7 Paletten Basispreis + Lieferpauschale Fr. 60.00  
**8 Paletten Basispreis**  
 ab 12 Paletten Rabatt Fr. 1.00 / 100 kg  
 ab 17 Paletten Rabatt Fr. 1.50 / 100 kg  
 ab 23 Paletten Rabatt Fr. 2.00 / 100 kg

Düngersortiment Landor												
	N	P	K	Mg	S	Ca	Na	Bor	Mn	Preis / 100 kg	Bestellung	
											gesackt	Big-Bag
Ammonsalpeter ohne Mg	27					9				92.20		
Ammonsalpeter	27			2,5		5				93.30		
MG-Ammonsalpeter	24			5	6					102.00		
Bor-Ammonsalpeter	26				14					105.10		
Kalk-Ammon+Mg	20			4,5		13				93.30		
Sulfamid	30			3	10					103.00		
Ammonsulfat gran (wasserlöslich)	21				24					93.50		
Harnstoff granuliert	46									107.10		
Harnstoff geprillt	46									144.00		
Landor 20.10.10	20	10	10		3	5				108.60		
Nitroplus mit Natrium	20	5	8	2	6		3			103.50		
Suplesan	20	8	8	2	8		2	0.1	0.2	110.70		
Landor 15.15.15	15	15	15		2	5				109.70		
Landor 13.13.21	13	13	21		2	5				111.20		
Rübedünger (Carodor)	5	9	27	4	6	4		0,3	0,2	115.30		
Kartoffeldünger (Patador)	5	9	30	2	8	4		0,1	0,1	125.60		
Polyvalent (Maisdünger)	5	10	28	2	6	4		0,1		109.20		
Rapsdünger (Colzador)	5	12	24	2	5	6		0,2		108.60		
Geldor	8	12	20	1,8	8	5				105.10		
ENTEC perfekt	14	7	17	1,2	9						Aktuell kein Angebot	
Terbona (chlorfrei)	15	5	20	1,2	8	2				115.80		
No-Till 20.20.0	20	20			2					121.50		
Landor Nitrophos rapide 20.10.0	20	10		3	8					105.60		
DAP (Diammonphosphat)	18	46								128.60		
PK-Bor		13	26	3	6	9		0.2		104.60		
Landor 0.20.30		20	30		1,5	8				108.50		
Patentkali (Kalimagnesia)			30	6	17					93.80		
Kali 60			60							109.20		

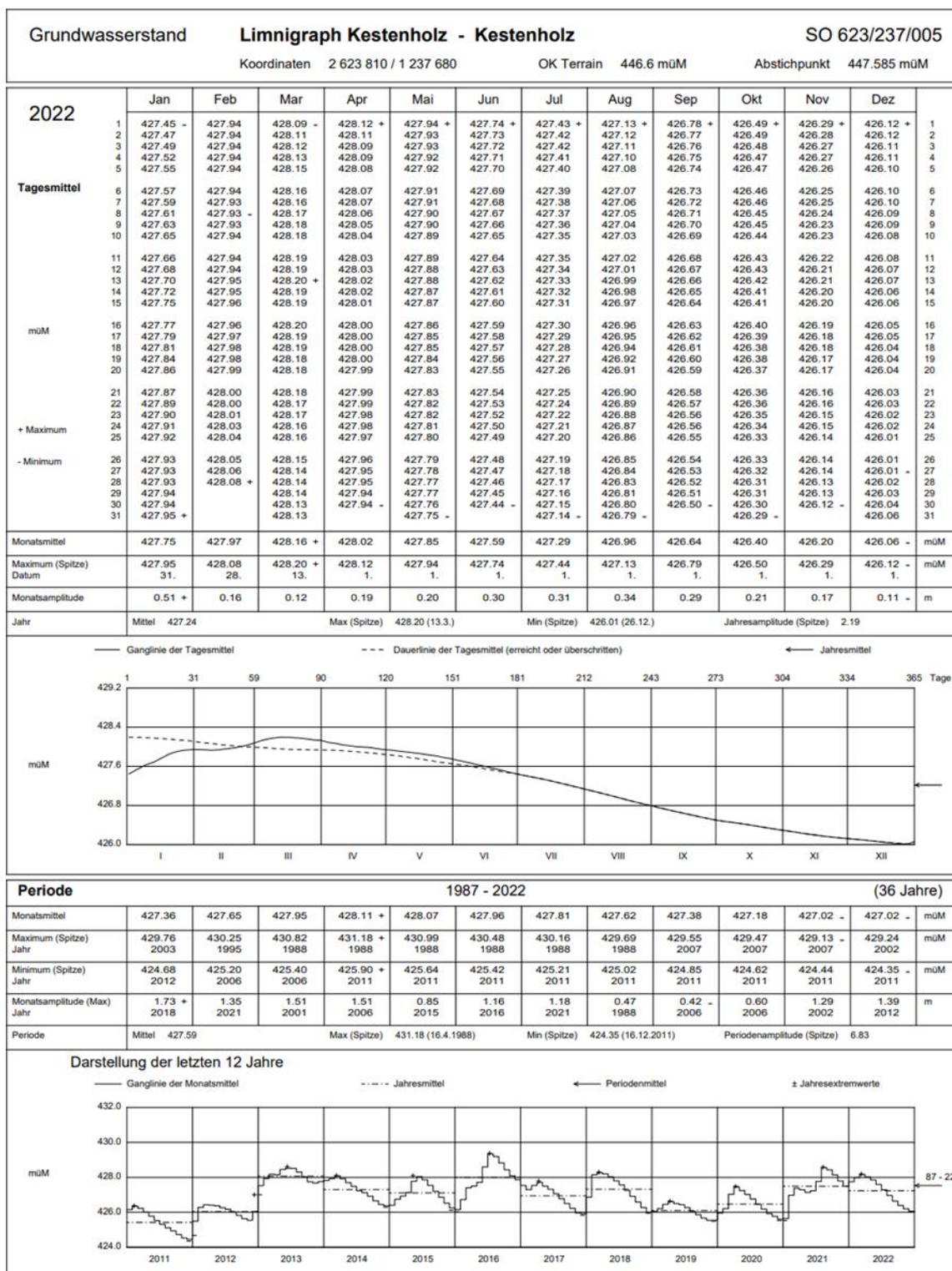
#### Stallhygiene

Desical		49.20	
Kalkstroh Mischung lose			auf Anfrage

Herzlichen Dank für Ihre Bestellung.

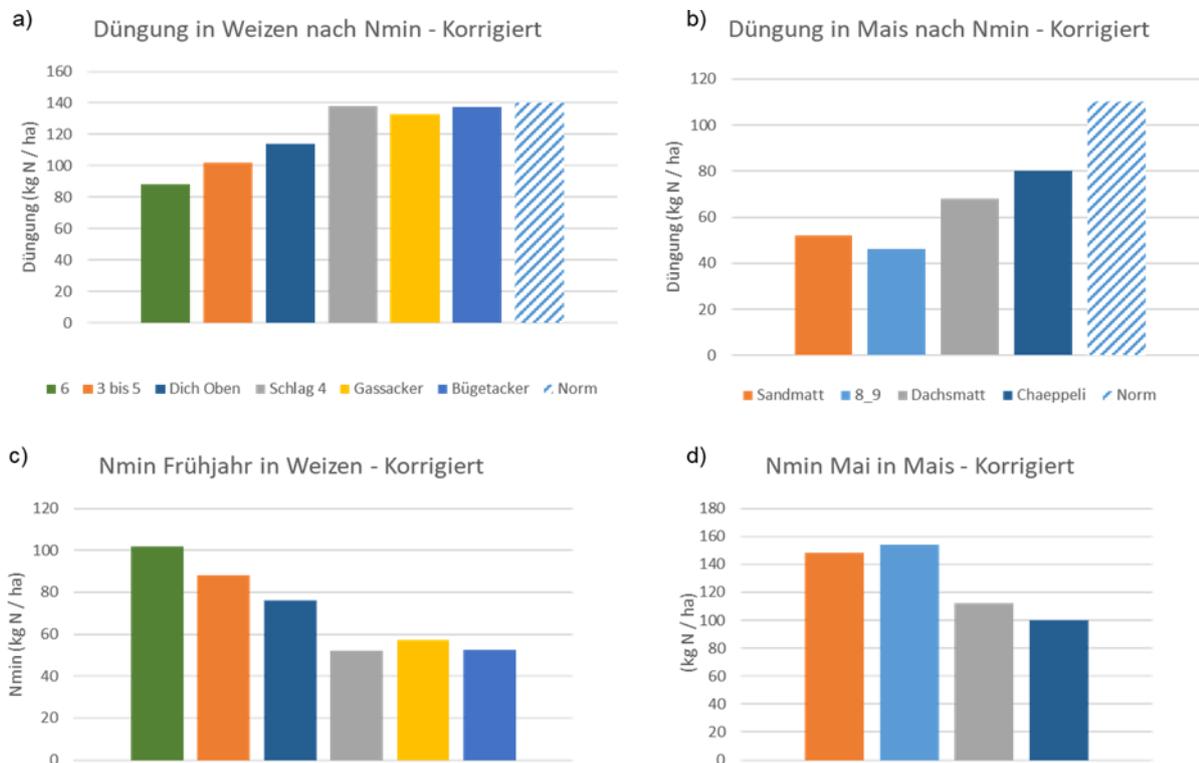
LANDI Schleinikon, Dorfstrasse 18, 8165 Schleinikon Tel. 058 476 54 15 / Fax 058 476 54 11 agro.schleinikon@landisurb.ch  
 LANDI Klingnau, Zelgli 6, 5313 Klingnau Tel. 058 476 54 35 / Fax 058 476 54 31 agro.klingnau@landisurb.ch  
 LANDI Weiach, Kaiserstuhlerstr. 44, 8187 Weiach Tel. 058 476 54 40 / Fax 058 476 54 41 agro.schleinikon@landisurb.ch

## 9.2 Grundwasserstand im Gäu (Kestenholz) im 2022



### 9.3 Korrigierte N<sub>min</sub> Werte mit Faktor x2 und berechnete Empfehlungen

Bei Weizen hätte sich die korrigierte Empfehlung im Vergleich zu den empfohlenen Mengen verändert (5-40% weniger als die Norm). Bei Mais (sowohl Silo als auch Körner) lagen die berichtigten Empfehlungen ebenfalls um ca. 30-60% unter der Norm.



### 9.4 Tabelle 8/9 - GRUD 2017

**Tabelle 9 | Referenzertrag, Nährstoffentzug und Düngungsnormen bezüglich N, P, K und Mg für die Ackerkulturen.**  
 Die Düngungsnormen für P, K und Mg berücksichtigen das Nährstoffaneignungsvermögen der Kulturen (Tabelle 21).  
 Anmerkungen: Als Grundlage für die Berechnung dient der Entzug von P, K und Mg durch die Ernte und die Rückstände.  
 Der gesamte Nährstoffentzug wurde als Summe der Nährstoffentzüge durch die Ernteprodukte und -rückstände berechnet.

Kultur	Referenz- ertrag <sup>1</sup> dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Winterweizen (Brot- und Biskuitweizen)	60	Körner	121	21 (49)	22 (26)	7				
	70	Stroh	22	6 (13)	62 (75)	5				
	total		143	27 (63)	84 (101)	12	140	27 (63)	67 (81)	15
Futterweizen	75	Körner	130	27 (62)	27 (32)	9				
	75	Stroh	21	6 (14)	66 (80)	5				
	total		151	33 (76)	93 (113)	14	140	33 (76)	74 (90)	15

Sommerweizen	50	Körner	101	18 (41)	18 (22)	6				
	60	Stroh	19	5 (11)	53 (64)	4				
	total		120	23 (52)	71 (86)	10	120	23 (52)	71 (86)	10
Wintergerste	60	Körner	89	22 (50)	27 (32)	7				
	60	Stroh	26	6 (13)	80 (96)	4				
	total		115	28 (64)	107 (128)	11	110	28 (64)	86 (103)	15
Sommergerste	55	Körner	81	20 (46)	25 (30)	6				
	55	Stroh	24	5 (12)	73 (88)	3				
	total		105	25 (58)	98 (118)	9	90	25 (58)	98 (118)	10
Winterhafer	55	Körner	88	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	35	8 (19)	122 (147)	6				
	total		123	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	116 (140)	15
Sommerhafer	55	Körner	91	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	29	8 (19)	122 (147)	6				
	total		120	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	145 (175)	15
Winterroggen	55	Körner	72	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	21	6 (14)	70 (84)	7				
	total		93	25 (58)	93 (112)	13	90	25 (58)	74 (89)	15

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag <sup>1</sup> dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Winterroggen (Hybridsorten)	65	Körner	85	23 (52)	27 (33)	7				
	75	Stroh	23	7 (15)	75 (90)	8				
	total		108	30 (67)	102 (123)	15	90	30 (67)	82 (98)	15
Dinkel	45	Körner	72	16 (36)	19 (23)	5				
	70	Stroh	35	8 (18)	70 (84)	7				
	total		107	24 (54)	89 (107)	12	100	24 (54)	71 (85)	15
Wintertriticale	60	Körner	96	19 (43)	24 (29)	5				
	75	Stroh	25	5 (11)	112 (135)	5				

	total		121	24 (54)	136 (164)	10	110	24 (54)	109 (132)	10
<b>Sommertriticale</b>	55	Körner	88	17 (40)	22 (27)	5				
	70	Stroh	23	4 (10)	105 (126)	4				
	total		111	21 (49)	127 (153)	9	100	21 (49)	127 (153)	10
<b>Emmer, Einkorn</b>	25	Körner	55	9 (20)	11 (13)	4				
	45	Stroh	18	6 (14)	34 (41)	3				
	total		73	15 (34)	45 (53)	7	30	15 (34)	36 (42)	10
<b>Hirse</b>	35	Körner	58	10 (23)	8 (10)	4				
	45	Stroh	75	11 (25)	85 (102)	11				
	total		133	21 (48)	93 (112)	15	70	22 (51)	95 (114)	12
<b>Körnermais</b>	100	Körner	130	26 (59)	33 (40)	9				
	110	Stroh	80	12 (26)	160 (191)	14				
	total		210	38 (85)	193 (231)	23	110	46 (103)	195 (235)	25
<b>Silomais</b>	185 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	218	38 (89)	200 (241)	24				
	total		218	38 (89)	200 (241)	24	110	46 (103)	195 (235)	25
<b>Grünmais</b>	60 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	114	17 (39)	134 (162)	6				
	total		114	17 (39)	134 (162)	6	70	17 (39)	134 (162)	10

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag <sup>1</sup> dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
<b>Kartoffeln</b> (Speisekartoffeln und Kartoffeln für die technische Verarbeitung) Gruppe 1 <sup>a</sup> Gruppe 2 <sup>b</sup> Gruppe 3 <sup>c</sup>	450	Knollen	135	26 (59)	202 (243)	9				
	200	Kraut	28	4 (10)	108 (130)	8				
	total		163	30 (69)	310 (373)	17	80 <sup>a</sup> 120 <sup>b</sup> 160 <sup>c</sup>	36 (82)	372 (448)	20
<b>Kartoffeln</b> (Frühkartoffeln) Gruppe 1 <sup>a</sup> Gruppe 2 <sup>b</sup> Gruppe 3 <sup>c</sup>	300	Knollen	69	20 (45)	125 (150)	6				
	200	Kraut	66	6 (14)	116 (140)	12				
	total		135	26 (59)	241 (290)	18	70 <sup>a</sup> 110 <sup>b</sup> 150 <sup>c</sup>	31 (71)	289 (348)	20
<b>Kartoffeln</b> (Pflanzkartoffeln) Gruppe 1 <sup>a</sup>	250	Knollen	58	17 (38)	104 (125)	5				
	200	Kraut	66	6 (14)	116 (140)	12				

Gruppe2 <sup>b</sup> Gruppe3 <sup>c</sup>	total		124	23 (52)	220 (265)	17	60 <sup>a</sup> 100 <sup>b</sup> 140 <sup>c</sup>	28 (62)	264 (318)	20
Zuckerrüben	900	Rüben	108	24 (54)	149 (180)	27				
	475	Kraut/Köpfe	157	17 (38)	248 (299)	43				
	total		265	41 (92)	397 (479)	70	100	40 (92)	318 (383)	70
Futterrüben	175 <sup>2</sup>	Rüben	193	38 (88)	261 (315)	23				
	400	Kraut	140	14 (32)	232 (280)	36				
	total		333	52 (120)	493 (595)	59	100	52 (120)	394 (476)	60
Winterraps	35	Hauptprodukt	102	22 (51)	25 (30)	8				
	90	Nebenprodukt	54	6 (14)	142 (171)	4				
	total		156	28 (64)	167 (201)	12	150	28 (69)	167 (202)	15
Sommeraps	25	Hauptprodukt	65	16 (37)	17 (21)	7				
	45	Nebenprodukt	32	4 (9)	46 (56)	7				
	total		97	20 (46)	63 (77)	14	120	20 (46)	63 (77)	15

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag <sup>1</sup> dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Sonnenblume	30	Körner	95	14 (33)	21 (25)	9				
	60	Stroh	54	7 (16)	306 (369)	45				
	total		149	21 (49)	327 (394)	54	60	21 (49)	327 (394)	55
Ölhanf	13	Körner	60	14 (33)	12 (14)	7				
	60	Stroh	54	10 (23)	70 (84)	9				
	total		114	24 (56)	82 (98)	16	60	24 (56)	82 (98)	20
Faserhanf <sup>3</sup>	100	Hauptprodukt	30	13 (30)	75 (90)	5				
	40	Nebenprodukt	110	26 (60)	91 (110)	20				
	total		140	39 (90)	166 (200)	25	100	39 (90)	166 (200)	25
Öllein	20	Körner	109	10 (24)	16 (19)	1				
	25	Stroh	15	6 (13)	37 (45)	2				
	total		124	16 (37)	53 (64)	3	80	16 (37)	53 (64)	5

Faserlein	45	Körner	45	14 (32)	75 (90)	9				
	15	Stroh	82	8 (18)	12 (14)	1				
	total		127	22 (50)	87 (104)	10	60	22 (50)	87 (104)	10
Chinaschilf	200 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	42	9 (20)	93 (112)	6				
	total		42	9 (20)	93 (112)	6	30	9 (20)	93 (112)	10
Kenaf	50 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	100	26 (60)	66 (80)	10				
	total		100	26 (60)	66 (80)	10	70	26 (60)	66 (80)	10
Eiweisserbsen	40	Körner	140	17 (39)	40 (48)	5				
	50	Stroh	100	17 (39)	66 (80)	11				
	total		240	34 (78)	106 (128)	16	0	34 (78)	127 (154)	20
Ackerbohnen	40	Körner	160	24 (56)	46 (56)	10				
	45	Stroh	135	7 (16)	75 (90)	15				
	total		295	31 (72)	121 (146)	25	0	31 (72)	145 (175)	25

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag <sup>1</sup> dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Sojabohne	30	Körner	180	15 (35)	48 (58)	6				
	30	Stroh	105	15 (35)	53 (64)	9				
	total		285	30 (70)	101 (122)	15	0	30 (71)	121 (147)	15
Süsslupine	30	Körner	165	13 (30)	34 (41)	6				
	30	Stroh	105	5 (12)	50 (60)	12				
	total		270	18 (42)	84 (101)	18	0	18 (42)	101 (121)	20
Gründünger (Leguminosen)	35 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	153	16 (37)	102 (123)	9				
	total		153	16 (37)	102 (123)	9	0	0 (0)	0 (0)	0
Gründünger (Nicht-Leguminosen)	35 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	85	14 (32)	143 (173)	8				
	total		85	14 (32)	143 (173)	8	0	0 (0)	0 (0)	0
Zwischenfrüchte (pro Nutzung)	25 <sup>2</sup>	Ganzpflanze	70	10 (24)	75 (90)	6				
	total		70	10 (24)	75 (90)	6	30	10 (24)	55 (67)	10

<b>Tabak Burley</b>	25 <sup>2</sup>	Blätter	75	8 (18)	104 (125)	7				
	30 <sup>2</sup>	Stängel	69	10 (22)	112 (135)	6				
	total		144	18 (40)	216 (260)	13	170	18 (40)	216 (260)	15
<b>Tabak Virginie</b>	25 <sup>2</sup>	Blätter	63	6 (14)	99 (119)	5				
	25 <sup>2</sup>	Stängel	25	9 (21)	104 (125)	10				
	total		88	15 (35)	203 (244)	15	30	15 (35)	203 (244)	15
<b>Reis</b>	60	Körner	66	18 (41)	27 (32)	5				
	60	Stroh	39	8 (18)	102 (123)	11				
	total		105	26 (60)	129 (155)	16	110	26 (60)	120 (145)	10