



Jahresbericht **Critical**

Teil Gemüsebau - 2023

Autoren

W.-A. Bischoff¹, L. Mann¹, A. Schwarz¹, D. Williams¹, F. Argento², F. Liebisch²

Partner

¹ Gutachterbüro TerrAquat

² Agroscope

AfU – Kanton Solothurn

Bildungszentrum Wallierhof – Kanton Solothurn

Inforama – Kanton Bern

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

Inhalt

Inhalt	2
Vorwort	3
Zusammenfassung	3
1 Einführung	5
1.1 Die Problematik in Kürze	5
1.2 Das Nitratprojekt und CriticalN	5
2 Methoden im Projekt	8
2.1 Düngungsmethoden.....	8
2.2 Versuchsdesign und Datenerhebung	10
2.3 Messmethoden.....	12
2.4 Evaluationsindikatoren.....	15
3 Stand der Forschungsarbeiten des Projekts	16
3.1 Kooperation im Gemüsebau 2021 - 2023.....	16
3.2 Stand und Herausforderungen	17
4 Ergebnisse und Diskussion	20
4.1 Wetter und Grundwasserstand.....	20
4.2 Ertrag und Marktqualität	22
4.3 Düngermengen	25
4.4 N-Auswaschung.....	27
4.5 N-Bilanzen	32
4.6 N-Mineralisierung und Humusvorräte.....	35
4.7 Sonderfragen.....	40
4.8 Aktuelle Schlussfolgerungen	43
4.9 Kooperation und Austausch.....	44
4.10 Ausblick.....	45
5 Literaturverzeichnis	47
6 Anhang	48
6.1 Datentabellen	48
6.2 N-Bilanz Nulldüngerversuche	54

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 zum Projektabschluss 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 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⁻¹ 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⁻¹ 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⁻¹ Jahr⁻¹** zu halten.

TerrAquat hat im Jahr 2021 angefangen, zusammen mit der Gemüsebauberatung des Inforama Ins, Martin Freund, die Gemüsebetriebe zu informieren und für die Teilnahme sowohl am Nitratprojekt als auch am begleitenden Forschungsprojekt CriticalN zu gewinnen. Start von CriticalN war der 01.10.2021. Seit 2022 kooperieren alle grossen Gemüsebaubetriebe im Nitratperimeter mit einem Teil ihrer jeweiligen Anbaufläche. Insgesamt werden inzwischen 24 ha Gemüse (34 % der durchschnittlichen Gemüseanbaufläche) nach Nmin (GRUD, Neuweiler & Krauss, 2017 bzw. IGZ, Feller et al., 2011) gedüngt und grundwasserverträglich nach den Vorgaben betriebsindividueller Vereinbarungen bewirtschaftet.

Im Jahr 2021 konnte wegen Einschränkungen durch COVID19 sowie sich verzögernden Vertragsabschlüssen nur auf drei Flächen Vergleichsmessungen zwischen Nmin-Variante und betriebsüblicher Kontrolle durchgeführt werden. Das Jahr war durch einen extrem nassen Frühsommer (Mai – Juni waren die Niederschläge > 3-fach überhöht) und durch eine über das gesamte Jahr fast doppelten Niederschlagssumme geprägt (2021: 1414 mm vs. 1990 – 2020: 842 mm). Aus den damit verbundenen hohen N-Auswaschungen sowie durch im beauftragten Labor zu niedrig gemessene Nmin-Werte konnten in diesem Jahr nur 27 kg N ha⁻¹ oder rund 10 % der applizierten Menge mit der Düngung nach Nmin gespart werden. Die erzeugte Marktqualität lag dabei für die meisten Flächen leicht über, die Erträge leicht unter denen der betriebsüblichen Kontrolle, wieder ohne sich signifikant zu unterscheiden. Beispielhaft konnte der Effekt der Winterbegrünung (– 80 kg N ha⁻¹ Auswaschung im Winter; deutlich geringerer Herbst-Nmin-Gehalt) gezeigt werden.

Im Jahr 2022 nahmen bereits 21 Teilflächen am Untersuchungsprogramm teil, davon 13 nach Nmin gedüngte Flächen und 8 Kontrollflächen nach betriebsüblicher Praxis. Die Witterung war nicht ungewöhnlich mit einer kleinen Trockenperiode im März. Es konnten mit Nmin gegenüber der Kontrolle 63 kg N ha⁻¹ oder 22 % des Düngers eingespart werden, obwohl die Werte des Auftragslabors weiterhin zu niedrig waren. Das Laborproblem wurde im Laufe des Jahres erkannt und gegen Ende des Jahres abgestellt.

Die erzeugte Marktqualität (97 %) und die Erträge (96 %) lagen 2022 geringfügig unter denen der betriebsüblichen Kontrolle (je als 100 % gesetzt), ohne sich signifikant zu unterscheiden. Wenn eine Fläche mit einem lokalen Innenbrand an Salat (nicht düngbedingt) nicht mitberücksichtigt wird, hätten die Nmin-Flächen in beiden Kategorien sogar leicht besser abgeschnitten. Die N-Auswaschungen der Vegetationsperiode (März bis Oktober 2022) zeigen eine Entlastung von ca. 20 kg N ha⁻¹ durch Berücksichtigung des Nmin (Kontrolle: 110 kg ha⁻¹ N-Verlust; Nmin-Variante: 91 kg ha⁻¹ N-Verlust). Damit sind die absoluten Auswaschungen im Gemüse im Sommer bedeutend höher als im Ackerbau, was sowohl an den grösseren N-Überschüssen (Kontrolle: 175 kg N ha⁻¹; Nmin-Variante: 128 kg N ha⁻¹) als auch an der Bewässerung liegt. Wird die Gesamtjahresauswaschung betrachtet, konnte 2022 die Auswaschung um 61 kg N ha⁻¹ durch die Düngung nach Nmin reduziert werden (Kontrolle: 192 kg ha⁻¹ N-Verlust; Nmin-Variante: 131 kg ha⁻¹ N-Verlust). Die N-Auswaschungsreduktion liegt damit nah an der Düngeeinsparung von 63 kg N ha⁻¹.

Im Jahr 2023 waren 23 Teilflächen an den Untersuchungen beteiligt. Von den Teilflächen wurden 14 nach Nmin gedüngt, auf sechs Kontrollflächen wurde betriebsüblich gedüngt und auf drei Flächen wurde kein Stickstoffdünger ausgebracht. Die Witterung wirkte sich durch ein nasses Frühjahr, eine trockenere Phase im Sommer und sehr starke Niederschläge im Herbst und Winter auf den Gemüsebau aus. Viele Gemüsekulturen wurden aufgrund der Witterung im Frühjahr später gesetzt und die Ernten fanden bis in den späten Herbst statt. Durch die Düngung nach Nmin konnten nur 13 kg N ha⁻¹ gegenüber der Kontrolle eingespart werden. Die betriebsübliche Düngung (Kontrolle) hatte sich jedoch zum Vorjahr um 44 kg N ha⁻¹ durch eine angepasste Bewirtschaftung der Betriebe reduziert. Gleichzeitig wurden drei von sechs untersuchten Kulturen auf der Kontrolle ebenfalls nach Nmin gedüngt und eine Kultur erhielt nach Nmin eine grössere N-Zufuhr. Die erzeugte Marktfähigkeit ist auf der Kontrolle (93 %) nicht signifikant zur Nmin-Variante (92 %) erhöht. Die Erträge wiederum liegen in der Nmin-Variante um 11 % erhöht im direkten Vergleich zur Kontrollvariante. Die Ertragsunterschiede sind auf nicht düngbedingte Mängel auf zwei Parzellen im Bereich der Kontrollen zurückzuführen. Die Betrachtung der ersten N-Auswaschungsergebnisse von vier Gemüseparzellen zeigen hohe Nitratverluste ins Grundwasser mit hohen Werten in beiden Varianten (Kontrolle: 138 - 539 kg ha⁻¹ N-Verlust; Nmin-Variante: 133 - 302 kg ha⁻¹ N-Verlust). Die Messungen erfolgten zwischen März und November 2023, sie enthalten damit zu Teilen die Winterauswaschung und werden gleichzeitig verstärkt durch die hohen Herbstniederschläge. Hinzu kommt das hohe N-Mineralisationspotenzial. Die Untersuchungen mit Nulldüngfenstern konnten 2022 und 2023 für die zweiten Salatsätze pro Woche eine Netto-N-Mineralisation von 3 - 13 kg N ha⁻¹ aufzeigen. Die Bilanzierung aller Flächen mit Auswaschungsmessungen ergab eine Netto-N-Mineralisation während der Kulturdauer von 1.9 kg N (Tag*ha)⁻¹. Bei Vernachlässigung der Auswaschung auf den selben Flächen wurden pro Tag 0.7 kg ha⁻¹ N-Mineralisation ermittelt. Die hohen Mineralisationsraten lassen sich auf die Gesamt-Stickstoffvorräte in den Böden zurückführen. Die Ap-Horizonte zeigen im Gemüsebau standortsabhängig Stickstoffvorräte zwischen 8.3 und 15.5 t N ha⁻¹.

Zusammengefasst zeigt sich, dass das Potenzial zur Düngeeinsparung hoch ist, und sich Düngeeinsparungen auch in geringeren N-Auswaschungen, nicht aber in geringeren Markterträgen pro Kultur bemerkbar macht. Im Fall von hohen Niederschlagsmengen und fehlenden Winterbegrünungen sind die N-Auswaschungen nach wie vor deutlich zu hoch. Die erhöhten Auswaschungswerte lassen sich auf die hohen Rest-N-Gehalte aus Ernte-Nmin und Ernteresten im Herbst zurückführen. Das volle Einsparpotenzial konnte dementsprechend noch nicht genutzt werden. Das Versuchskonzept hat sich bewährt. Es liefert für Praxis und Wissenschaft relevante Daten, die zur Beratung und zur Problemlösung genutzt werden können. Die nutzbare Nachmineralisation während der Kulturen wird verstärkt weiter untersucht, um verlässlicher berücksichtigt werden zu können.

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 (N), 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⁻¹ 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 Nitratkonzentrationen im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, dauerhaft auf die gesetzliche Anforderung von 25 mg Nitrat Liter⁻¹ 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 Nitratkonzentrationen im Grundwasser nicht weiter angestiegen und weisen teilweise bereits rückläufige Trends auf. Sie liegen aber noch immer über 25 mg Nitrat Liter⁻¹. Der Grenzwert nach der TBDV für Trinkwasser von 40 mg Nitrat Liter⁻¹ wurde dank der Zusammenarbeit mit den Landwirten und Landwirtinnen aber in keiner der Trinkwasserfassungen jemals überschritten. (Quelle: AfU SO, 2022).

1.2.1 Die ersten 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 Nitratesindex (Fruchtfolge, Winterbegrünung, Bodenbearbeitung und Saatzeitpunkt im Spätsommer/Herbst). Mit Ausnahme eines Düngeverbotsfensters im Winter wurde die Düngung aber nicht als eigentliche Massnahme einbezogen (Quelle: AfU SO, 2022).

1.2.2 Das Forschungsprojekt NitroGäu (2017 – 2021)

Die Untersuchungen im Gemüsebau zeigen, dass den Gemüseproduzenten ein grosser Teil der N-Pools wie die N-Zufuhr über feste organische Dünger als Strukturverbesserer, der Aufbau des Humus-N-Pools durch die Erntereste und die Nachmineralisation aus dem Humus-Pool einerseits teils nicht bekannt waren, andererseits teils nicht berücksichtigt wurden, um nicht das Risiko einer Unterdüngung einzugehen. Daraus ergaben sich sehr hohe N-Überschüsse.

Die N-Verluste für 2018/19 und 2019/20 mit dem Sickerwasser waren mit 271 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ auf den Praxisflächen im Mittel sehr hoch. Diese hohe N-Auswaschung erklärt sich nicht nur aus den aktuellen Überschüssen, sondern auch aus den grossen labilen N-Reserven aus Ernteresten und Bodenspeicher, die schnell mineralisiert werden können (Vorräte meist > 10'000 kg N ha⁻¹, davon labile N-Reserven ca. 370 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹, mittlerer Nmin-Gehalt in 0 – 60 cm Tiefe: 245 kg N ha⁻¹).

Als Schlussfolgerung sollten die grossen labilen N-Reserven aus Ernteresten und Bodenspeicher bei der Düngung zum Schutz des Grundwassers angerechnet und verkleinert werden. Dies war in einem ersten Schritt über die Anrechnung von Nmin bei der Düngung ohne sonstige Betriebsanpassungen möglich. Die Anrechnung von Nmin bei der Düngung führte nicht zu signifikanten Ertrags- oder Qualitätseinbussen. Im einzigen Versuchsjahr mit Nmin-Varianten führte dies zu Düngereinsparungen von 65 kg N ha⁻¹ und einer verringerten N-Auswaschung in der gleichen Grössenordnung (Quelle: AfU SO, 2022).

1.2.3 Die 4. Projektperiode 2021-2026 «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 wird das Nitratprojekt in der vierten Projektperiode betriebsindividuelle Lösungen und Massnahmen umsetzen, deren Wirkung auf Felddaten und einer datenbasierten Beratung beruhen.

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

1.2.4 Das Begleitprojekt CriticalN

Das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten wird in der vierten Projektperiode vom Forschungsprojekt CriticalN wissenschaftlich begleitet. Ziel ist es, die landwirtschaftlichen Überschüsse in der Stickstoff-Düngung zu senken. Der Weg dahin ist, die Stickstoff-Effizienz durch angepasste Stickstoff-Düngung zu steigern. Dies ist – vor 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 Landwirten und Landwirtinnen 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 Landwirten und Landwirtinnen können erprobt und mit Messungen bewertet werden.
- **Regionale Datenauswertung:** Wie weit ist die aktuelle Praxis auf dem Weg zum dauerhaften Grundwasserschutz?

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

Das Begleitprojekt ist eng mit Ämtern, Beratung und Landwirtschaft verknüpft (Abbildung 1).

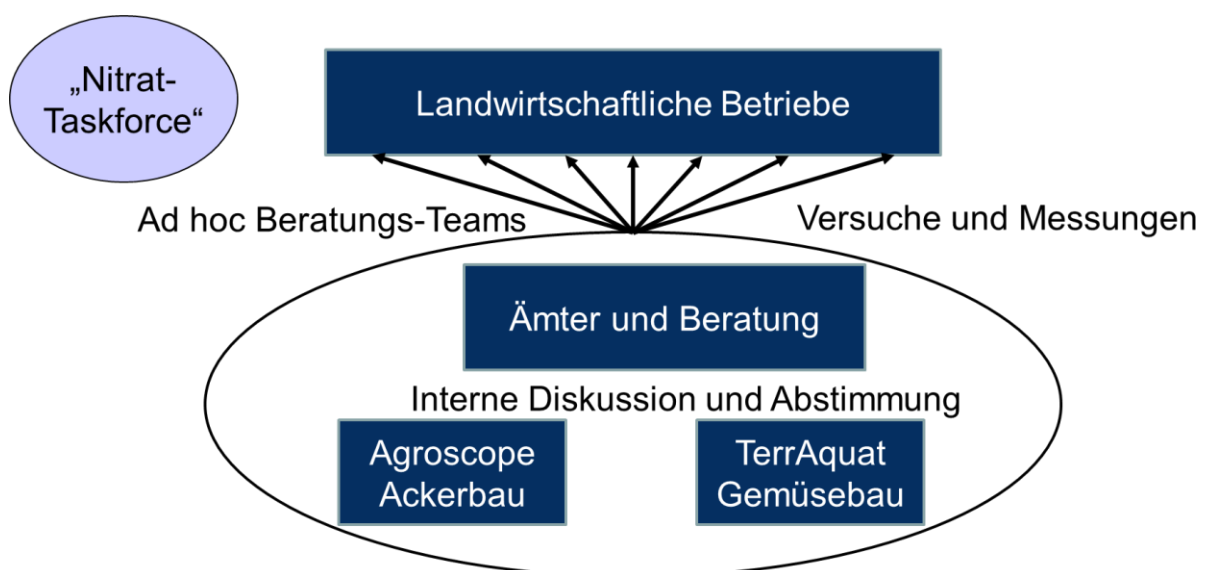


Abbildung 1: Nitrat-Taskforce - Austausch und Aussenwirkung von Nitratprojekt (Ämter und Beratung) und Forschungsprojekt (Agroscope / TerrAquat)

Das Gutachterbüro TerrAquat in D-Nürtingen (Projektleitung) ist für den Projektteil Gemüsebau zuständig. Die Agroscope-Gruppe «Gewässerschutz und Stoffflüsse» ist für den Projektteil Ackerbau zuständig (Abbildung 1). Das Forschungsteam arbeitet eng zusammen mit dem Amt für Umwelt Kanton Solothurn, dem Bodenschutz im Kanton Bern und den landwirtschaftlichen Beratungszentren Wallierhof (Solothurn) und den Inforamen Waldhof und Ins (Gemüse). Die Nitrat-Taskforce pflegt an einem 2-wöchentlichen Jour fixe einen lebendigen Austausch und stellt darin alle 4 Wochen neue Ergebnisse aus CriticalN zur Diskussion. Gespräche mit den Landwirtinnen und Landwirten erfolgen überwiegend in gemischten Teams aus Forschung und Beratung. Damit sind Informationsstand und Austausch aller Beteiligten innerhalb der Nitrat-Taskforce inzwischen recht hoch.



Abbildung 2: Das CriticalN-Kernteam.
(Von links nach rechts oben) 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.
(Von links nach rechts unten) Antje Franzen und Lena Mann (beide TerrAquat). Hier bei einer Zwiebelernte.



2 Methoden im Projekt

Die Begleitung findet im Gemüsebau durch Besprechungen, Empfehlungen zur Düngemenge sowie Erhebung und Analyse von Boden- und Pflanzendaten statt. Innerhalb des Begleitungsprojekts werden folgende Methoden eingesetzt:

- Versuche auf Vergleichsparzellen zwischen Kontrolle (praxisüblich) und vertraglich vereinbarten Grundwasserschutzmassnahmen inkl. der Düngung nach Nmin.
- 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 Nulldüngefenstern zur Erweiterung der Datengrundlage in der Fläche.
- Messung der N-Auswaschung mit Hilfe von Lysimetern, zur Kalibrierung eines möglichen N-Mineralisierungs-Modells.
- Betriebsgespräche zur Umsetzbarkeit, dem subjektiven Erfolg, Fragen und Ideen zur Verbesserung der beteiligten Landwirtinnen und Landwirte

2.1 Düngungsmethoden

Gemäss den «Grundlagen der Düngung für Ackerkulturen» (GRUD, 2017, Kapitel 10; Neuweiler & Krauss, 2017) wird in der Schweiz zur Berechnung der angepassten N-Düngermenge die Nmin-Methode verwendet. Bei einzelnen Kulturen wie Salaten, die in der GRUD nur pauschal erfasst werden, wurde alternativ auch nach Feller et al. (2011) gedüngt.

2.1.1 Düngung nach Nmin (GRUD, Sinaj & Richner, 2017)

Diese Methode zur Berechnung der erforderlichen N-Menge beruht auf der Messung des mineralischen N im Boden. Die Nmin-Bestimmung berücksichtigt das in verschiedenen Bodenschichten (0 – 90 cm) enthaltene N in Form von Nitrat- ($\text{NO}_3\text{-N}$) und Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$). Diese werden nach der Agroscope Referenzmethode (Bürge und Agroscope, 2020) unter Berücksichtigung der Steingehalte und Bodendichte in Nmin-Gehalte umgerechnet. Der Vorteil ist, dass Nmin 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 3: 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 Empfehlung max. 72 Stunden (Gemüsebau: 48 h) vergehen (Abbildung 4). Die Proben werden von einem «Probenehmer» gesammelt und gleichentags an ein Labor in der Region geliefert.

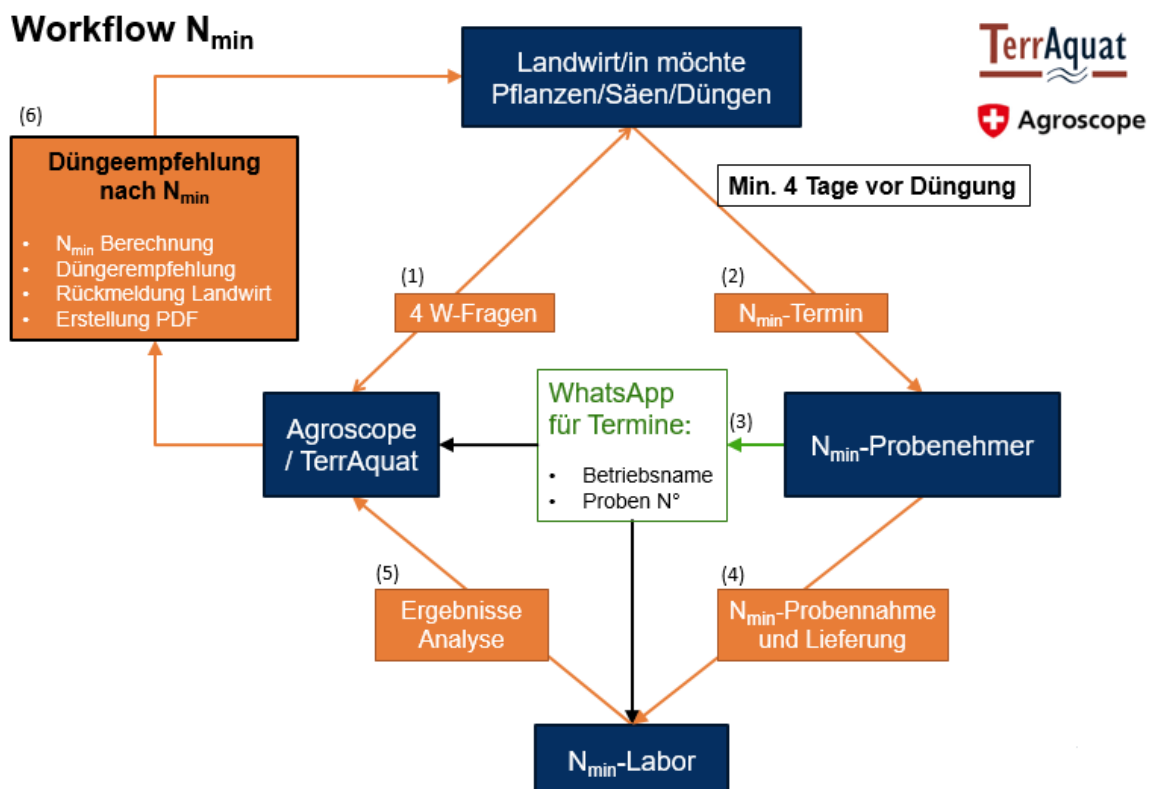


Abbildung 4: N_{min} -Arbeitslauf im Projekt im Ackerbau:

- (1) Die Landwirte und Landwirtinnen nehmen Kontakt mit den Projektpartnern (Agroscope oder TerrAquat) auf, um die vier W-Fragen zu besprechen: was, wo, wann, wie viel.
- (2) Min. 4 Tage vor der Düngung ist die Probenahme beim Probenehmer in Auftrag gegeben, der
- (3) mit Partnern und Labor die Probenahme per WhatsApp meldet.
- (4) Die Proben werden gesammelt und im Labor abgegeben.
- (5) Die Analysen werden an die Projektpartner weitergeleitet, eine Düngeempfehlung wird berechnet und
- (6) den Landwirten und Landwirtinnen zurückgemeldet.

2.1.2 Düngung nach Nmin-Sollwert-System (Feller et al., 2011)

Zur Berechnung des Nmin-Sollwertes zu Kulturbeginn wird die N-Aufnahme der Gemüseart zum Nmin-Mindestvorrat addiert und die erwartete Netto-N-Mineralisierung abgezogen:

	N im Aufwuchs	[kg N ha ⁻¹]
+	Nmin-Mindestvorrat	[kg N ha ⁻¹]
-	Netto-N-Mineralisierung	[kg N ha ⁻¹]
=	Nmin-Sollwert	[kg N ha⁻¹]

Das Nmin-Sollwertsystem kann aufgrund der hinterlegten Wachstums- und N-Aufnahmedaten zu jedem beliebigen Zeitpunkt während einer Kultur berechnet und angewendet werden. Es eignet sich daher auch ausgezeichnet für gesplittete N-Gaben.

Dies ist im Grundwasserschutz-Kontext besonders interessant, weil eine sehr geringe Startdüngung wegen der geringen zu erwartenden Aufnahme zu Wachstumsbeginn gegeben werden kann. Erst zur 2. Düngung (Kopfdüngung) erfolgt die Hauptgabe an N. Für viele Kulturen ist dies typischerweise nach 2 Wochen, wenn die N-Aufnahme exponentiell ansteigt (Abbildung 5). So kann die Nachmineralisation aus dem Boden besser berücksichtigt und die Phase der Auswaschungsgefährdung durch Starkregen um 2 – 3 Wochen verkürzt werden.

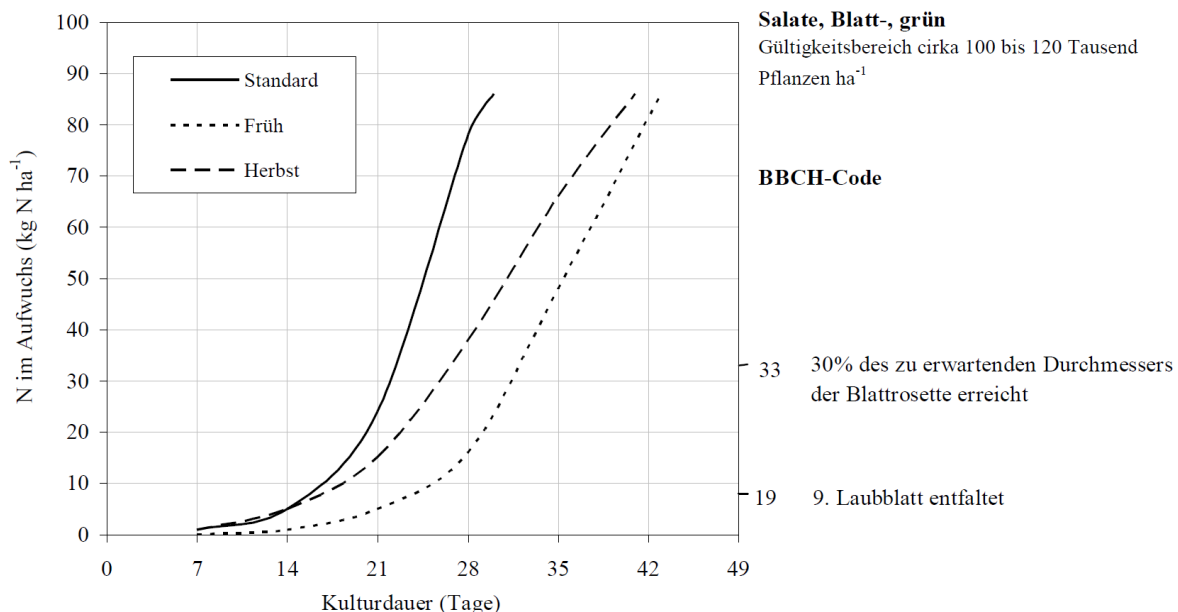


Abbildung 5: N-Aufnahmekurve am Beispiel von Blattsalat (aus: Feller et al., 2011, S. 133).

2.2 Versuchsdesign und Datenerhebung

2.2.1 Versuchsdurchführung

Die verwendeten Methoden sind Abbildung 6 zu entnehmen.

In 2021 wurden auf 2 intensiv untersuchten Vergleichsflächen mit Kontrolle und Nmin-Variante vor der ersten Kultur (i.d.R. Anfang März) **Selbst-Integrierende Akkumulatoren** (SIA, vgl. 2.3.3) installiert, um die N-Auswaschungen während der Vegetationszeit zu messen.

In 2022 wurden auf 8 intensiv untersuchten Vergleichsflächen mit Kontrolle und Nmin-Variante vor der ersten Kultur (i.d.R. Anfang März) **Selbst-Integrierende Akkumulatoren** (SIA, vgl. 2.3.3) installiert, um die N-Auswaschungen während der Vegetationszeit zu messen. Die SIA wurden im Herbst nach Ernte der letzten Gemüsekultur (ca. Ende Oktober) sowie im Frühjahr (Mitte Februar) ausgetauscht.

In 2023 wurden auf 6 intensiv genutzten Vergleichsflächen mit Kontrolle und Nmin-Variante vor der ersten Kultur (i.d.R. Anfang März) **Selbst-Integrierende Akkumulatoren** (SIA, vgl. 2.3.3) installiert, um die N-Auswaschungen während der Vegetationszeit zu messen. Hinzu kamen 3 Flächen mit Einzelbetrachtungen hinzu. Die SIA wurden grösstenteils im Herbst nach Ernte der letzten Gemüsekultur ausgetauscht. Alle SIA wurden (nochmals) Ende Februar 2024 ausgetauscht, so dass eine Jahresbilanzierung möglich wurde.

Kurz vor jeder Pflanzung und jeder weiteren Düngung (Kopfdüngung) wurden auf allen Vergleichsflächen sowie auf den Nmin-Flächen ohne Kontrolle Bodenproben entnommen und auf die **Nmin-Gehalte** analysiert. Zusätzlich wurde stichprobenartig der Nmin-Gehalt zum Zeitpunkt der Ernte beprobt. Nach Ende der Vegetationsperiode wurde der Herbst-Rest-Nmin-Gehalt rund um einen Stichtag ca. Ende Oktober bestimmt.

Für jede Kultur bzw. jeden Satz wurden in Kooperation zwischen Betrieb und TerrAquat im Rahmen einer **Ernteerhebung** die wesentlichen pflanzenbaulichen Parameter in einer repräsentativen Stichprobe erhoben. Dies war notwendig, um einen allfälligen Einfluss der Massnahmen auf Quantität und Qualität der Ware zu dokumentieren sowie eine vollständige N-Bilanz erstellen zu können.

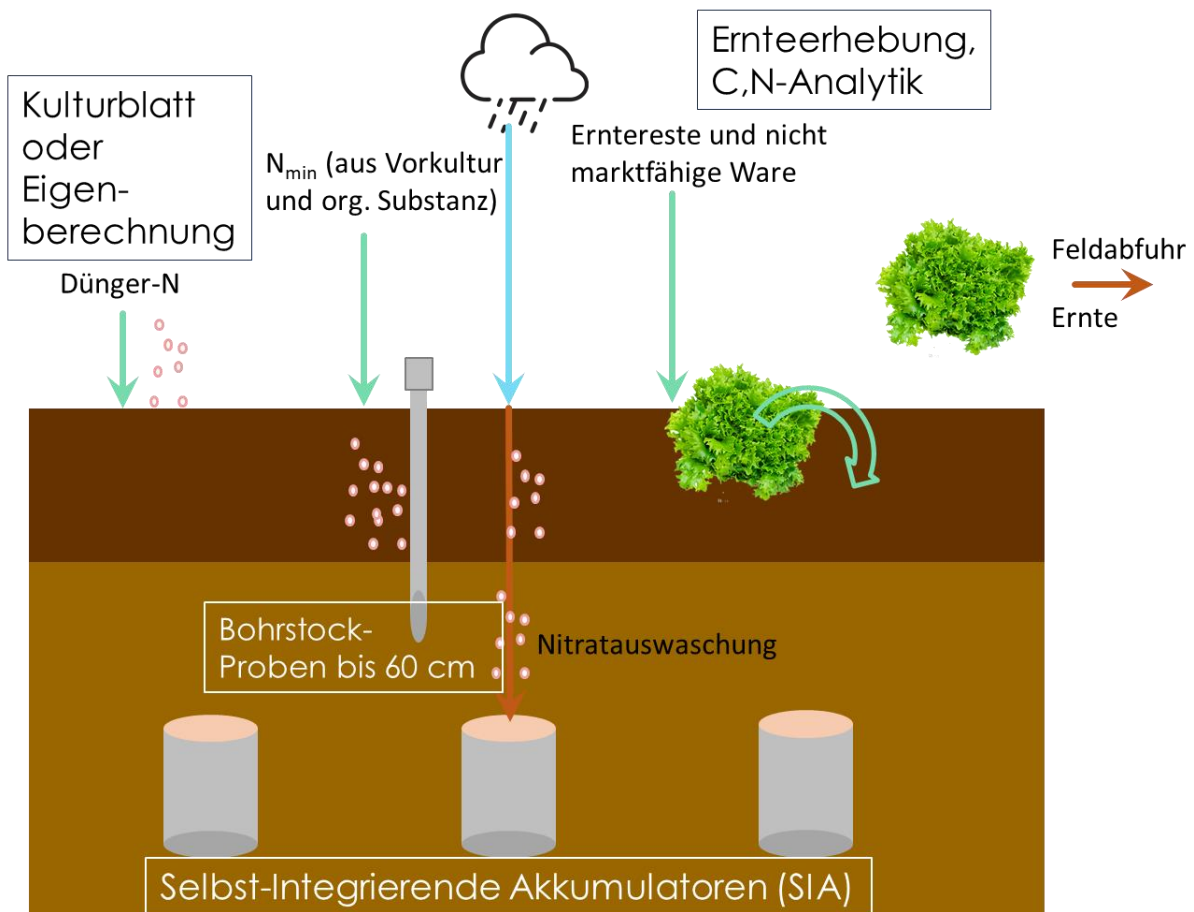


Abbildung 6: Schematische Darstellung der einzelnen Methoden zur Erhebung der N-Bilanzierung: grün: verfügbare N-Fractionen; braun: N-Abfuhr/Entzüge vom Feld; blau: Wasser (Transportmedium für Nitrat).

Nach der letzten Ernte wurde auf allen Schlägen mit nicht zu später Ernte eine Zwischenfrucht bzw. Winterbegrünung ausgesät, um die N-Auswaschung aus dem Wurzelraum zu reduzieren.

2.3 Messmethoden

2.3.1 Ernteerhebungen

Zur Ernte wird die markttaugliche Ware vom Feld abgefahren, wohingegen nicht-markttaugliches Erntegut, Pflanzenteile vom Putzen und nicht beerntete Pflanzenteile als Erntereste auf der Fläche verbleiben.

Um die N-Abfuhr vom Feld und die auf dem Feld verbleibenden N-Mengen zu bestimmen, wurden in Kooperation zwischen Betrieb und TerrAquat sowohl in den umgebenden Kontrollflächen als auch in den Massnahmenfenstern repräsentative und flächenbezogene Pflanzenproben entnommen. Zunächst wurden der Aberntungsgrad und der Anteil marktfähiger Köpfe bzw. Pflanzenteile je nach Kultur aus mindestens 30 bis 96 Individuen ermittelt. Sowohl von der marktfähigen Ware als auch von den Ernteresten inkl. nicht-marktfähiger Ware wurden jeweils flächenbezogen die frische Biomasse erhoben und repräsentative Proben entnommen. Dabei wurden für die meisten Kulturen zwölf unabhängige Teilproben gezogen und je vier Teilproben zu drei Mischproben vereinigt. Salate wurden z.B. geviertelt und je nur ein Viertel als Teilprobe genutzt. Diese Proben wurden anschliessend am Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) in Frick auf Trockenmasse sowie C- und N-Gehalt analysiert.

Daraus liessen sich die N-Abfuhr und der N-Verbleib jeder Kultur in kg N ha^{-1} für die Bilanz errechnen.

Einige Kulturen wurden untergepflügt, da keine Verkaufsmöglichkeit bestand, obwohl sie grundsätzlich vermarktbar gewesen wären. Für diese Kulturen wurden die Ernteerhebungen wie üblich durchgeführt und anschliessend die Bilanzen berechnet. Je nach Ziel der Auswertung wurden diese Werte eingeschlossen (z.B. bei der Marktfähigkeit) oder als kein Entzug bewertet (z.B. bei der N-Umweltbilanz).

2.3.2 N_{min} -Gehalte

Die N_{min} -Gehalte (Nitrat- und Ammoniumgehalte in kg N ha^{-1}) wurden an repräsentativen Mischproben aus 12 Einstichen in 0 – 60 cm Bodentiefe ermittelt. Sie wurden jeweils vor Aussaat bzw. Pflanzung der Kultur, vor jeder Düngung und nach der Ernte der Kultur entnommen. Um der geringen Durchwurzelungstiefe junger gemüsebaulicher Kulturen Rechnung zu tragen, wurden Proben aus drei Tiefenstufen entnommen: 0 – 15, 15 – 30 und 30 – 60 cm Tiefe. Die N_{min} -Gehalte geben die Menge pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Boden zum Zeitpunkt der Probenahme an und können teilweise auf die Düngemengen angerechnet werden.

Die Proben wurden im LaborIns in Kerzers analysiert. Zur Mitte des Jahres 2022 waren die sehr niedrigen N_{min} -Werte im Vergleich zum Vorprojekt NitroGäu augenfällig. Darauf wurden von TerrAquat entnommene N_{min} -Proben homogenisiert, geteilt und frisch an ein weiteres Labor (Agrolab), das an zertifizierten Ringversuchen teilnimmt, versendet. Beim Vergleich stellte sich – wie auch bei unabhängigen Proben von Agroscope – heraus, dass das Labor im Mittel nur 50 % des N_{min} -Gehaltes anderer Labore erfasst. Daraufhin wurde mit dem Labor ein Qualitätssicherungskonzept aufgestellt, das zurzeit umgesetzt wird, um zukünftig zu verlässlichen N_{min} -Werten zu kommen. Aktuell kann das Problem aufgrund vorliegender Vergleichsmessungen als gelöst angesehen werden. Eine dauerhafte Qualitätskontrolle durch Teilnahme an Laborringversuchen wurde dem Labor nahegelegt.

2.3.3 Nitrat- und Ammoniumauswaschung

Zur Messung der flächenbezogenen Nitratauswaschung wurden vor der ersten Aussaat der Kulturen SIA (Selbst-Integrierende Akkumulatoren, Bischoff, 2009) unterhalb des Hauptwurzelraumes installiert. Die Installation erfolgte von einer Grube aus seitlich unter den ungestörten Boden in einer Tiefe von 80 cm (Abbildung 7). Nach dem Einbau wurden die Gruben verfüllt, so dass keinerlei Einschränkungen für die Bewirtschaftung des Schlages bestanden. Während der Messperiode entzogen die SIA dem Sickerwasser Nitrat und adsorbierten dieses. Nach Ausbau der SIA erhält man durch Rücktausch des adsorbierten Nitrats und Ammoniums die flächenbezogene N-Auswaschung als Gesamtfracht in kg N ha^{-1} . Die Analytik wurde durch die Core Facility der Universität Hohenheim (Stuttgart-Hohenheim, Deutschland) durchgeführt.

Mit den SIA wurde Nitrat und Ammonium erfasst. Die Ammoniumauswaschung lag in allen Fällen unterhalb oder nur knapp über der Nachweisgrenze. Daher wurden die N-Auswaschungen nicht getrennt nach Nitrat und Ammonium, sondern als Summe dargestellt.



Abbildung 7: Einbau der SIA in 80 cm Tiefe.

2.3.4 Bodenuntersuchungen zum Humusgehalt

An den Gemüsestandorten wurden exemplarisch Bodenproben in den Tiefen 0 – 30 cm, 30 – 60 cm sowie 60 - 90 cm entnommen und an diesen eine Grundanalyse durchgeführt. Die Proben wurden der LUFA Speyer auf Humus-, N- und C-Gehalt untersucht. Zudem wurde die Lagerungsdichte geschätzt.

Aus den Daten wurde das C/N-Verhältnis errechnet. Aus den Humusgehalten und geschätzten Lagerungsdichten wurden die organischen C- und N-Vorräte berechnet.

2.3.5 Lysimeterversuch

Im Jahr 2023 wurden am Versuchsstandort in Oensingen 16 frei drainierende Lysimeter installiert. Das Versuchsziel war, aus der Menge und dem N-Gehalt des Sickerwassers Rückschlüsse auf die N-Nachlieferung aus den Oberböden zu ziehen. Die Ergebnisse sollen zudem zur Kalibrierung eines Modells genutzt werden, welches die N-Mineralisierung der Böden unter verschiedenen Klimaszenarien abschätzt und damit als Hilfsmittel zur angepassten Düngung an Standort und Zeitpunkt genutzt werden soll.

In den Lysimetern verbaut wurden Bodenkörper aus dem Ap-Horizont bis in 26 cm Tiefe. Der gemessenen Lagerungsdichte an der Entnahmestelle entsprechend wurde das dem Volumen der Lysimeter entsprechende Bodengewicht eingebaut. Vor dem Einbau wurde der ausgehobene Boden bei Bedarf von grossen Steinen befreit.

Die Versuchsinstitution bestand aus vier Versuchsböden mit je vier Replikaten. Untersucht wurden zwei schwere, tonige Böden von Ackerstandorten und zwei Böden von im Gemüsebau genutzten Flächen. Im Gemüsebau wurde ein fürs Perimeter typischer schwerer Boden und ein leichter, sehr steiniger Boden verbaut.

Die Bodenoberflächen wurden bewuchsfrei gehalten. Die acht Lysimeter im Gemüsebau wurden in niederschlagsarmen Perioden regelmässig mit 8 – 30 mm bewässert, um die Bewässerung im Gemüsebau nachzuahmen. Das Sickerwasser wurde alle ein bis zwei Wochen beprobt. Die Sickerwassermenge wurde dokumentiert und 50 ml Probenflüssigkeit eingefroren und dann an der Core Facility der Universität Hohenheim (Stuttgart-Hohenheim, Deutschland) auf Ammonium- und Nitrat-Stickstoff analysiert.

Das Experiment wurde von Ende Mai bis November aktiv betrieben. Im Herbst musste der Versuch nach dem Einsetzen starker Niederschläge stillgelegt werden. Der Versuchsstandort wurde komplett überflutet. Dadurch konnte Wasser von der Seite in die Auffangbehälter fließen.



Abbildung 8: Links der Versuchsaufbau in der Nähe von Oensingen. Die Böden sind zufällig angeordnet. Das obere Bild zeigt den Aufbau der Lysimeter in Kombination mit der Beprobungseinrichtung.

2.3.6 Mineralisationsversuche auf Praxisflächen

Die N-Mineralisation wird mit zwei weiteren Ansätzen auf den bewachsenen Praxisflächen untersucht. Zum einen wird die Stickstoffaufnahme von Pflanzen in Nulldüngefeldern untersucht. Zum anderen wird von allen Flächen die Mineralisation über die Kulturdauer bilanziert.

Der Sinn der Nulldüngerversuche ist, die N-Mineralisation im Boden analog zu den Versuchen im Ackerbau durch die Pflanzenaufnahme zu quantifizieren. Die Stickstoffaufnahme der ungedüngten Pflanze wird als Indikator für die Mineralisierung im Boden genutzt. Zusammen mit dem Aufwuchs, den Marktqualitäten und den Nmin-Werten können im Vergleich zu den gedüngten Versuchen Rückschlüsse auf die konstant notwendige N-Freisetzung getroffen werden. Ein zeitweiser N-Mangel kann den Pflanzenaufwuchs und die Qualität deutlich reduzieren.

Die Mineralisation über die Wachstumsphase einzelner Kulturen soll über die Netto-N-Mineralisation bilanziert werden. Unter Berücksichtigung des Pflanzenaufwuchs, der Differenz des Start- und Ernteminns und der Düngemenge soll die überschüssige Stickstoffmenge ermittelt werden. Der Stickstoffüberschuss in der Bilanz wird als N-Mineralisation über die Wachstumsphase angenommen.

Zu beachten ist, dass bei beiden Ansätzen die anteilige N-Auswaschungen zunächst nicht berücksichtigt wird. Zwar ist die Gesamtauswaschung bekannt, sie kann aber nicht einzelnen Zeiträumen zugeordnet werden. In diesem Sinne handelt es sich bei den angegebenen Zahlen zur Mineralisation um Minimum-Abschätzungen, die um die Auswaschung erhöht werden müssten. Andererseits haben sie den Vorteil, dass sie die nutzbare N-Mineralisation zeigen, welche noch nicht den Wurzelraum verlassen hat.

2.4 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 Marktprodukt-Produktionseffizienz), N-Speicheränderung, N-Nachmineralisation und N-Verlustpotential (N-Bilanzmethode) vollzogen. Die Nullparzellen 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.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Indikatoren für die Effizienz des Stickstoffeinsatzes im Gemüsebau. Die Formeln werden angegeben, um zu verdeutlichen, welche Parameter aus den Felddaten für die Berechnung verwendet werden.

Tabelle 1: Indikatoren für die Effizienz des Stickstoffeinsatzes und die Umweltverträglichkeit im Gemüsebau

Indikator		Formel
N-Auswaschung		$SIA - \text{Messwerte}$
Dünger-N-Nutzungseffizienz	PE	$\frac{N \text{ Abfuhr}}{N \text{ Düngung}}$
N-Saldo		$N \text{ Düngung} - N \text{ Abfuhr}$
N-Verlustpotential		$N \text{ Düngung} + N \text{ Nachlieferung} + N_{\text{min Ernte}} - N \text{ Abfuhr}$
Rest-N		$N \text{ Ernterest} + N_{\text{min Ernte}}$
Netto-N-Mineralisation		$N_{\text{min Ernte}} + N \text{ Aufwuchs} - N \text{ Düngung} - N_{\text{min Start}} (+ N \text{ Auswaschung})$

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

$N_{\text{min Start}}$ = N_{min} -Gehalt im Boden um den Setzt-/Saat-Zeitpunkt

3 Stand der Forschungsarbeiten des Projekts

3.1 Kooperation im Gemüsebau 2021 - 2023

Das Gutachterbüro TerrAquat hat im Jahr 2021 gemeinsam mit Martin Freund vom Inforama Ins alle wichtigen Gemüsebetriebe im Nitratperimeter aufgesucht und mit ihnen Wege zur Teilnahme am Nitratprojekt diskutiert.

Im Jahr 2021 wurde auf insgesamt drei Flächen von 2 Freilandgemüsebaubetrieben im Nitratperimeter Daten erhoben. Auf der Fläche Bahnwärterhaus wurde jedoch identisch gedüngt und bearbeitet. Daher wird diese Fläche für das Jahr 2021 bei der Vergleichsdarstellung nicht berücksichtigt.

Im Folgejahr 2022 wurden Untersuchungen auf 13 Flächen von allen vier grossen gemüseproduzierenden Betrieben durchgeführt (Abbildung 9). Dabei wurden auf 8 Flächen die betriebsübliche Praxis (kurz: *Kontrolle*) im Gemüsebau und vertraglich vereinbarte Grundwasserschutzmassnahmen inkl. der Düngung nach Nmin verglichen (kurz: *Nmin-Variante*).

2023 konnte eine neue Fläche im Projekt aufgenommen werden. Dennoch wurden gleich wie im Vorjahr auf 13 Flächen Untersuchungen im Gemüsebau durchgeführt. Die gleichbleibende Anzahl wurde bedingt durch Getreide in der Kulturfolge und dem daraus folgenden Flächenabtausch mit anderen Landwirten. Auf sechs Parzellen wurde im direkten Vergleich die Düngung nach Nmin und die betriebsübliche Düngung untersucht. Auf zwei Parzellen erfolgten Versuche mit Nulldüngungen, dabei wurde in einem Teilbereich der Parzelle ein einzelner erster Satz Salat, zwei Salatsätze in Folge und ein nur zum zweiten Satz nicht gedüngter Salat untersucht.

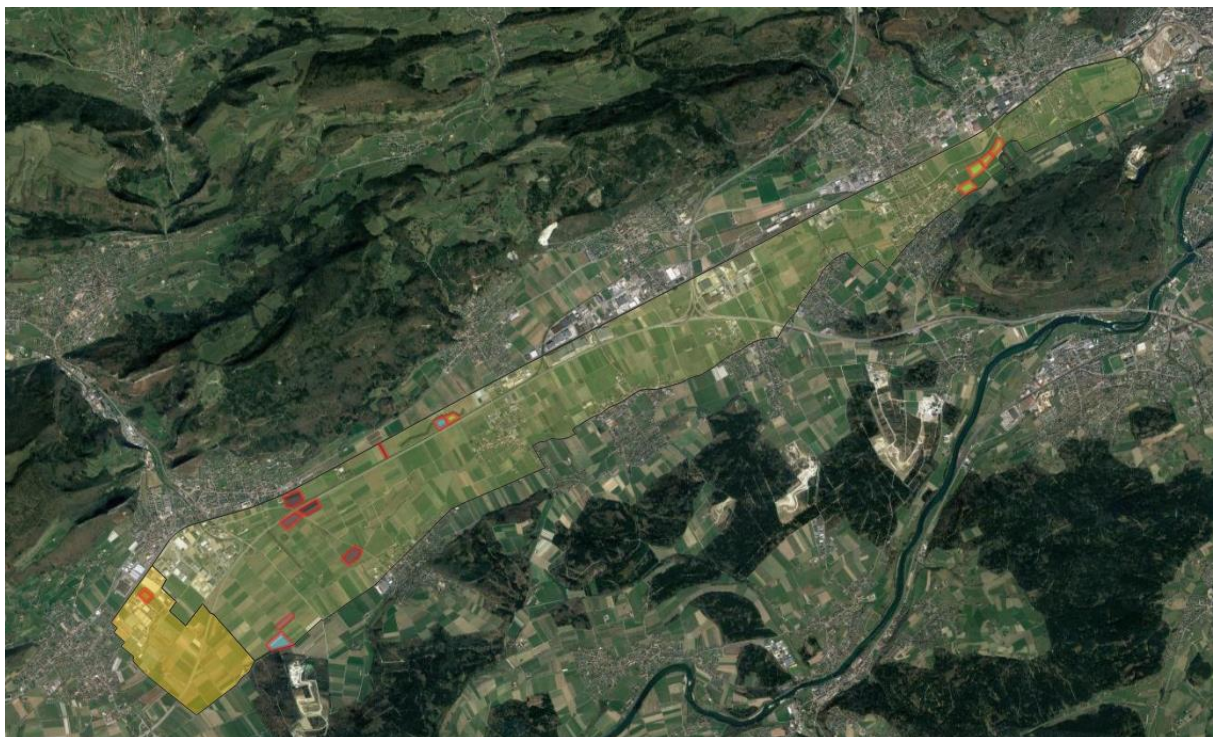


Abbildung 9: Lage der am Projekt beteiligten Gemüseflächen, rot umrandet (Stand: 31.12.2022)

Im Rahmen der Kooperationen mit allen grossen Gemüseproduzenten werden verschiedene Methoden zur Optimierung der Stickstoffdüngung und der Stickstoffkonservierung über den Winter «on-farm» getestet. Die Betriebsdaten werden gesammelt und für die Auswertung der verschiedenen Methoden verwendet.

Jeweils Ende Januar / Anfang Februar werden die gesammelten Ergebnisse im Überblick und dann speziell für die Flächen des jeweiligen Betriebs vorgestellt und mit den Betriebszuständigen diskutiert. So können Besorgnisse und Ärgernisse diskutiert und aufgenommen werden.

Im Jahr 2022 standen auf den untersuchten (Teil-)Parzellen zu 80 % verschiedene Salate und zu 20 % untergeordnete Kulturen wie Brokkoli, Zwiebeln, Zucchini und Rinden (Abbildung 10, Kulturen). Dies entspricht auch in etwa den erfragten Betriebsstrukturen, wobei andere untergeordnete Kulturen wie Lauch, Blumenkohl, Nüsslisalat... auch vorkommen und teils 2021, teils im Vorgängerprojekt NitroGäu bereits untersucht wurden.

Im Kontrast zum Vorjahr konnte 2023 eine grössere Vielfalt an Kulturen untersucht werden. Salate waren weiterhin eine wichtige Kultur. Zu über 50% wurden jedoch Kohlkulturen, Wurzelgemüse und Zwiebelgewächse im Perimeter angebaut und im Projekt untersucht.

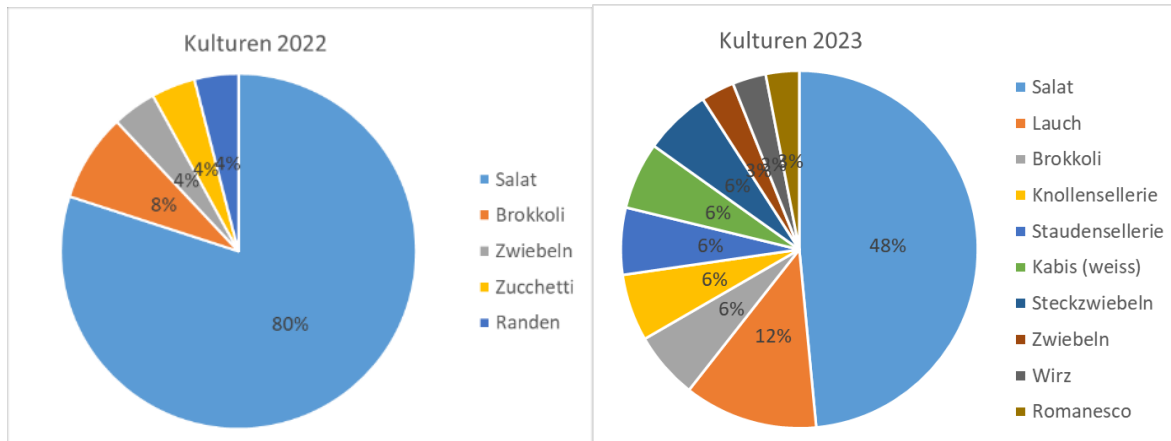


Abbildung 10: Übersicht über die 2022 und 2023 untersuchten Gemüsekulturen im Projekt

Das Jahr 2021 war das erste operative Jahr mit Feldexperimenten des Gemüseteils im Projekt, und das Ziel bestand darin, Arbeitsabläufe im Netzwerk mit den Landwirten und allen anderen beteiligten Akteuren zu etablieren. Im Jahr 2022 konnte bereits nahezu die maximal untersuchbare Anzahl an intensiv begleiteten Flächen erreicht werden. 2023 wurde die Anzahl intensiv begleiteter Flächen nochmals erweitert durch den Zugewinn einer Gemüseparzelle im Bioanbau, mit Messungen zur Nitratauswaschung und durch das verstärkte Anlegen von Nullparzellen. Im Jahr 2024 sollen in ähnlichem Ausmass Flächen intensiv begleitet werden und neue Parzellen in die grundwasserschonende Bewirtschaftung mit kombinierter Düngeberatung nach Nmin überführt werden.

3.2 Stand und Herausforderungen

3.2.1 Stand und Herausforderungen 2022

Die grundsätzliche Bereitschaft aller Betriebe, zumindest mit einigen Flächen am Programm teilzunehmen, war sehr begrüssenswert.

In der Praxis gab es trotz recht enger Betreuung und zahlreichen kurzen Organisationsgesprächen immer wieder spontane Aktionen auf den Versuchsflächen. So wurden benachbarte Vergleichsflächen zu unterschiedlichen Zeiten und/oder mit unterschiedlichen Kulturen bepflanzt oder wurden trotz abweichender Empfehlungen identisch gedüngt.

Auf der anderen Seite wurde das Zeitfenster von 48 h zwischen Probenahme und Düngeempfehlung sowie die Unterbrechungen am Wochenende, weil das Labor geschlossen hat, als teilweise zu lang empfunden. Auch wurde teils der Umstand, die Nmin-Beprobung melden zu sollen, teils die Hilfe bei der Probenahme, z.B. unter Folie, als lästig empfunden.

Hier braucht es auf beiden Seiten noch Erfahrung und Gewöhnung sowie – z.B. im Fall der Folienbeprobung – auch gute einfache Lösungen, wenn das Problem bekannt ist.

Von Projekt- und Betriebsseite wurde das o.a. angesprochene Problem der nicht zutreffenden Laboranalytik als Schaden für das Projekt angesehen. Hier kann man anmerken, dass in einem nicht

wissenschaftlich begleiteten Projekt die Laborfehler vermutlich weder bemerkt noch korrigiert worden wären.

3.2.2 Stand und Herausforderungen 2023

Die *Laborproblematik* kann als behoben betrachtet werden. Das Labor hat erfolgreich mit an die Schweizer Vorgaben angepassten Methoden an Vergleichsmessungen teilgenommen. Es soll zukünftig auch weiterhin an Vergleichsmessungen teilnehmen, um eine dauerhafte Qualitätssicherung zu betreiben.

Die Rückmeldung der Gemüsebauern zur *Düngung nach Nmin* war durchgehend positiv und es wird Potential für eine weitere Düngereduktion unter Berücksichtigung der hohen N-Mineralisation gesehen. Als problematisch wird weiterhin der benötigte zeitliche Vorlauf bis zum Düngezeitpunkt und der damit einhergehende Organisationsaufwand empfunden. Um möglichen Mindererträgen durch eine zeitliche Verzögerung entgegenzuwirken, wurde 2023 in einem Einzelfall eine geringe Düngemenge ohne vorherige Nmin-Beprobung genehmigt. Auch 2024 sollen solche Ausnahmen möglich sein bzw. Gemüsebetrieben, die mit vielen Flächen am Projekt beteiligt sind, Angebote gemacht werden um in Einzelfällen, welche eine schnelle Aktion in der Praxis erfordern, flexibel auf den Flächen reagieren zu können. Eine Option bietet dabei die Entwicklung einer Art korrigierter Norm für den Gemüsebau basierend auf den bisherigen Messungen. Hierzu sollen 2024 erste Schritte bei der Berücksichtigung der Mineralisierung gemacht werden.

Eine Schwierigkeit ist der immer wieder auftretende zu grosse zeitliche Abstand zwischen Nmin-Beprobung und Setz- oder Düngetermin zum Kulturstart. Dadurch erfolgt die Düngung anhand nicht aktueller Nmin-Werte. Bedingt wird dieser zeitliche Versatz durch schwierige Witterungsbedingungen und/oder Planungsprobleme der Betriebe.

Auf Vergleichsflächen musste aufgrund von schlechter Bodenbefahrbarkeit der Schleuderstreuer zur Düngeausbringung genutzt werden, so dass auch die betriebsübliche Vergleichsfläche nach Nmin gedüngt wurde.

Beim Setzen konnte zum Teil nicht verhindert werden, dass auf den Vergleichsflächen nicht zum gleichen Zeitpunkt gesetzt wurde, was zu unterschiedlich hohen Vergleichserträgen führen kann.

Generell ist die Mitarbeit der Betriebe im Projekt jedoch sehr gut und auch das Interesse an betriebsspezifischen Versuchen zur Erkenntniserweiterung vorhanden.

Die Ausnahme bildete 2023 ein Betrieb, mit dem kein ausreichender Informationsaustausch möglich war und somit auch keine korrekte Auswertung der erhobenen Daten. Die vorhandenen Ergebnisse dieses Betriebs werden aus diesem Grund im folgenden Bericht grösstenteils nicht berücksichtigt. Da der Betrieb Ende 2023 aufgelöst wurde, ist keine weitere Zusammenarbeit nötig.

Als schwierig empfinden alle Betriebe das Umbruchverbot im Herbst und bis am 15.01. des Folgejahres wegen daraus folgender Strukturprobleme im Boden oder stark vermehrter Bodenbearbeitung im Frühjahr. Die ersten Gemüsebetriebe konnten jedoch schon Strategien für eine angepasste Bewirtschaftung ohne deutlich vermehrte Bodenbearbeitung finden. Aus Bodensicht war die Bodenbearbeitung im Spätsommer / Herbst vor der Einsaat einer Gründüngung / deckenden Winterkultur die beste Lösung

Im Jahr 2023 haben schwierige Witterungsbedingungen den grundwasserschonenden Gemüseanbau deutlich erschwert und gleichzeitig Besonderheiten des Standorts im Gäu aufgezeigt. Das Frühjahr war im Vergleich zur Referenzperiode kühl, so dass erst spät im Jahr die ersten Kulturen gesetzt wurden. Durch Trockenheit im Sommer mit eingeschränkten Bewässerungsmöglichkeiten hat sich die Aussaat und das Setzen von Folgekulturen verzögert, so dass noch spät im Jahr geerntet werden musste. Die späten Ernten gingen mit starken Niederschlägen ab Herbst einher, die das Befahren der Flächen verhindert haben. Dies hat jedoch die generelle Problematik von späten Kulturen auf den schweren Böden im Perimeter aufgezeigt. Da 2023 auf vielen Flächen späte Kulturen angebaut wurden, konnte auf vielen Flächen keine Winterbegrünung gesät werden.

Die Niederschläge haben zudem die geplante Herbst-Nmin-Kampagne verhindert, so dass auf den Gemüseflächen erst im Februar eine Nmin-Kampagne durchgeführt wurde. Die Werte der N-Auswaschungsmessungen können damit in den meisten Fällen nicht im Verhältnis zu konkreten Nmin direkt vor der Haupt-Auswaschungsperiode betrachtet werden. Die N-Mineralisierung kann auch nicht bis in den Herbst nachvollzogen werden.

Problematisch für eine rechtzeitige Umsetzung der Herbst-Nmin-Proben-Kampagne war ausserdem der Urlaub des Probennehmers im feststehenden Zeitraum zwischen Mitte Oktober und der ersten Novemberwoche. Das sollte zusammen mit einer Vertretungsregelung seitens des Auftragnehmers in der Planung berücksichtigt werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im nachfolgenden Teil werden die vorliegenden Ergebnisse der Jahre 2021 bis Anfang 2024, gegliedert anhand der Einzeljahren dargestellt. Im Jahr 2021 wird am Beispiel der ersten wenigen untersuchten Flächen die Einzelflächenauswertung vorgestellt. Die Folgejahre werden zusammenfassend und jahresweise diskutiert. Die wichtigsten Daten für jede Einzelfläche sind in Kap. 6 (Anhang) aufbereitet.

4.1 Wetter und Grundwasserstand

4.1.1 Wetter 2022

Die Witterungsbedingungen in der Kulturperiode 2022 (Okt-21 bis Sep-22) waren gekennzeichnet durch eine kumulative Niederschlagsmenge von 1064 mm, die leicht über dem regionalen Jahresmittelwert lag, und einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 11°C (Abbildung 11). 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).

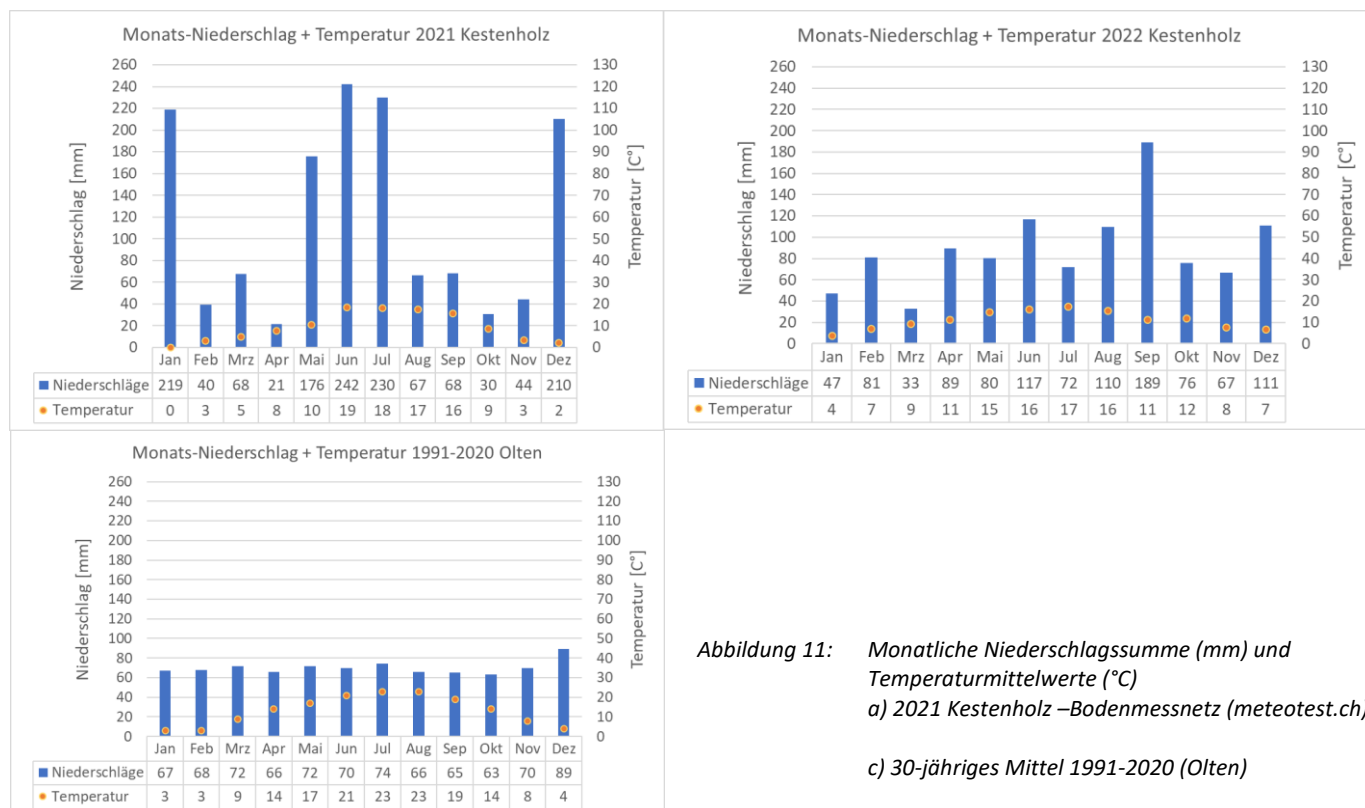


Abbildung 11: Monatliche Niederschlagssumme (mm) und Temperaturmittelwerte (°C)
 a) 2021 Kestenholz –Bodenmessnetz (meteotest.ch).
 c) 30-jähriges Mittel 1991-2020 (Olten)

4.1.2 Wetter 2023

Die Kulturperiode 2023 (Okt-22 bis Sep-23) lag mit einer kumulativen Niederschlagsmenge von 966 mm etwa im Schnitt des langjährigen Mittels des Kantons Solothurn. Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug erneut 11 °C. Die Temperaturen im Frühjahr, insbesondere im April, lagen unter denen des Referenzzeitraums, so dass der Anbau der meisten Gemüsekulturen erst im Mai begann. Der Sommer war bis in den frühen Herbst überdurchschnittlich warm und phasenweise trocken.

Die erste Hälfte des hydrologischen Jahres 2023/24 bzw. der hydrologische Winter 2024 fällt durch besonders hohe Niederschläge mit knapp 900 mm auf, so dass eine besonders hohe Grundwasserneubildungsrate zu erwarten ist.

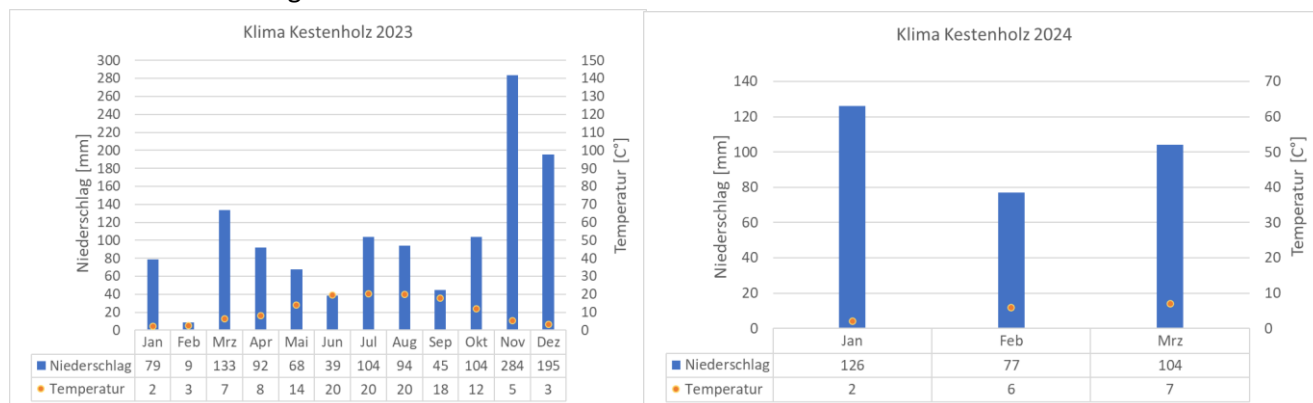


Abbildung 12: Monatsliche Niederschlagssumme (mm) und Temperaturmittelwerte (°C) – Bodenmessnetz (meteotest.ch). a) 2023 b) 2024 (bis zum 28. März 2024)

4.1.3 Grundwasserentwicklung 2022/2023

Im Jahr 2022 schwankte der Grundwasserstand in Kestenholz jahreszeitentypisch zwischen 428 und 426 m ü. M. mit einem Höchststand im März, einer sinkenden Tendenz bis in den späten Herbst und einem beginnenden Wiederanstieg auf niedrigerem Niveau im Dezember (Abbildung 13). Der Grundwasserstand lag zum 31.12.2022 ein Meter tiefer als ein Jahr zuvor. Dies wird als Anpassung an Normalniveau nach dem sehr nassen Jahr 2021 mit entsprechend höherem Grundwasserstand gewertet.

Im folgenden Jahr zeigt sich charakteristisch zum Jahresanfang ein Anstieg des Grundwasserspiegels. Von Januar bis Mai steigt er auf ein Maximum von knapp 427 m ü. M. mit einer zwischenzeitlichen Absenkung nach den geringen Niederschlägen im Februar. Ende Oktober hat der Grundwasserstand den jahreszeitlichen Tiefpunkt mit etwa 425 m. ü. M. erreicht und steigt anschliessend mit dem Einsetzen der hohen Niederschläge im November wieder an.

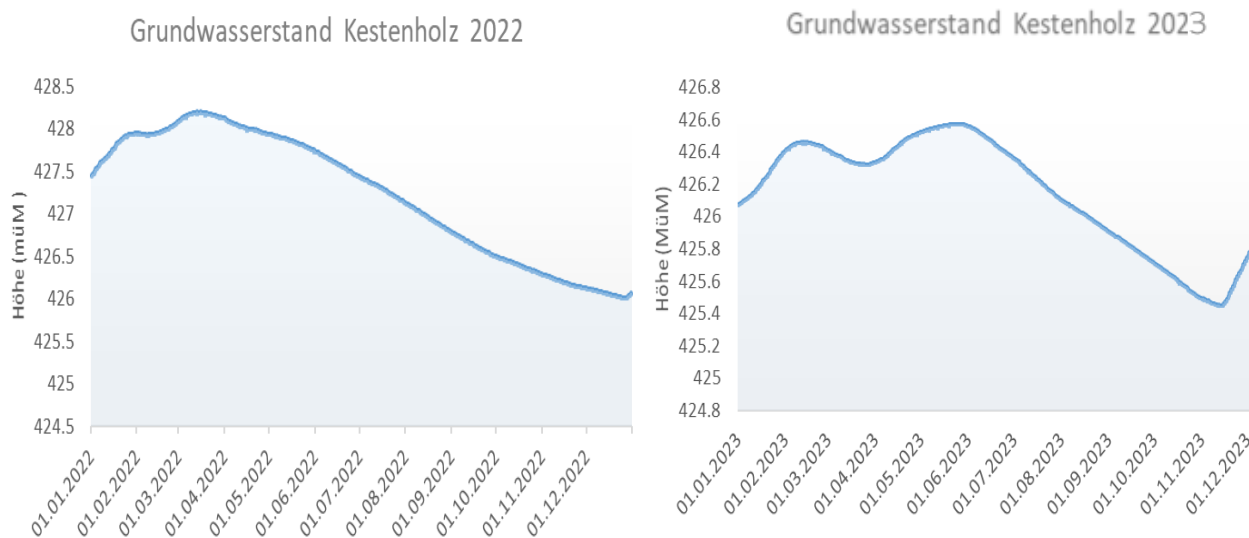


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes (m ü. M.) in den Jahren 2022 und 2023 in der Messstelle Kestenholz. Datenquelle: AfU Solothurn, Fachbereich Hydrometrie (2023).

4.2 Ertrag und Marktqualität

4.2.1 Ertrag und Marktqualität 2021

Für das Jahr 2021 werden 3 Vergleichsflächen eines Betriebs dargestellt.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen, dass Einzelergebnisse pro Fläche abweichen können, sich aber insgesamt keine grossen Unterschiede zeigen. Dies wird durch die Mittelwerte bestätigt. Danach war die marktfähige Stückzahl auf den Nmin-Flächen (90 % marktfähig) nicht signifikant um 5 % höher als auf den Kontrollflächen (85 %). Demgegenüber waren die Massenerträge mit 321 dt ha⁻¹ auf den Kontrollflächen gegenüber der Nmin-Variante (291 dt ha⁻¹) fast 10 %, aber nicht signifikant, erhöht.

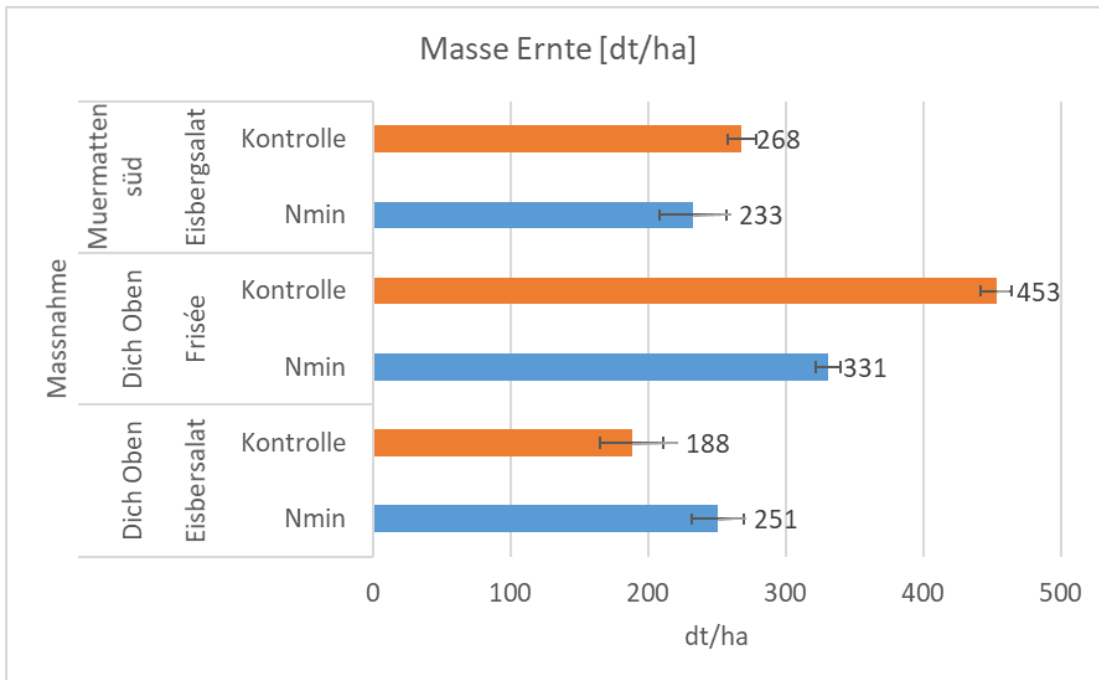


Abbildung 14: Vergleich der Ernteerträge im Jahr 2021 (Fehlerbalken = Standardfehler).

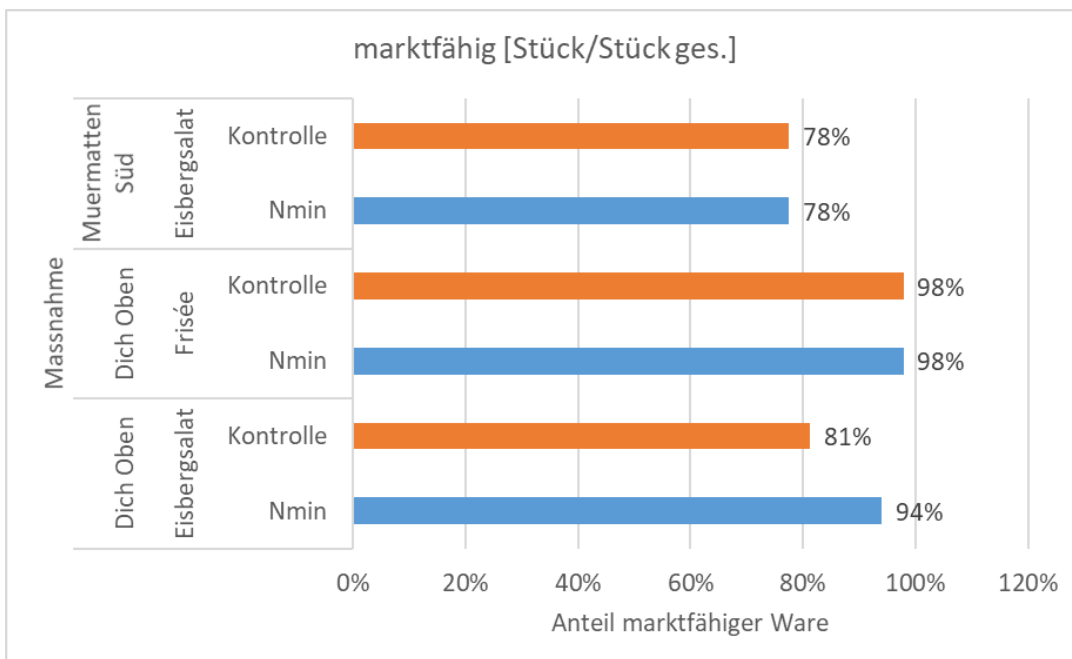


Abbildung 15: Vergleich der Erntequalität in Form marktfähiger Salatköpfe im Jahr 2021 [%]

4.2.2 Ertrag und Marktqualität 2022

Für das Jahr 2022 wird die zusammenfassende Darstellung gezeigt:

Die Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen ein sehr ähnliches Bild. Hier wurden die 5 Intensivvergleichsmessflächen, für die alle Daten vorliegen, zur besseren weiteren Vergleichbarkeit im Weiteren dargestellt. Der Massenertrag unterschied sich um < 2 %, die Qualität um 3 % nicht signifikant minimal zugunsten der Kontrolle. Wird hier eine lokale Innenbrandfläche, die nichts mit dem Düngeregime zu tun hat, nicht in den Mittelwert der Nmin-Varianten einbezogen, würden sich die Verhältnisse ins Gegenteil verkehren.

Aufwuchs, Qualität und Erträge können also für dieses Jahr als gleich im Rahmen der Messgenauigkeit angesehen werden.

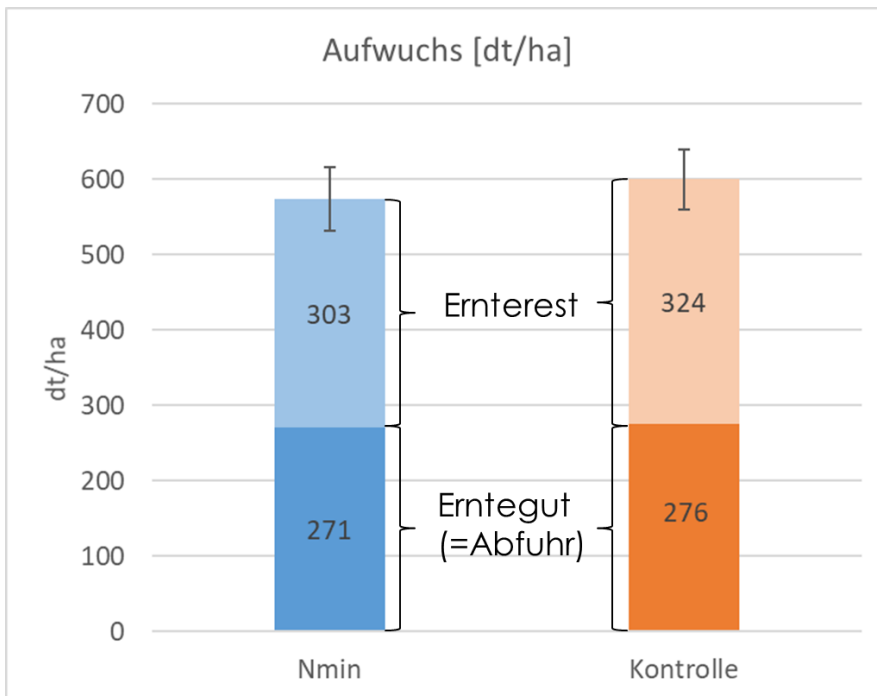


Abbildung 16: Vergleich von Aufwuchs und Ertrag (= Erntegut) zwischen Nmin-Variante und Kontrolle im Jahr 2022 [dt ha⁻¹] (Fehlerbalken = Standardfehler)

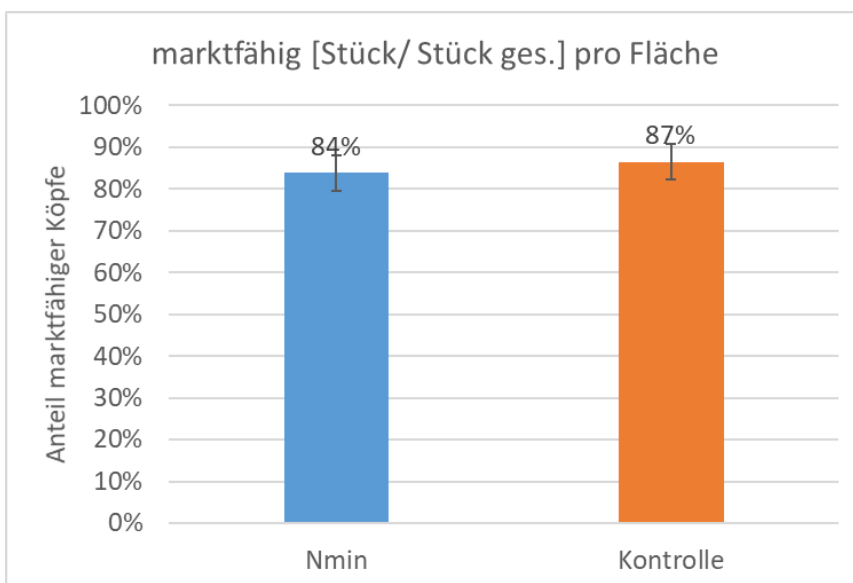


Abbildung 17: Vergleich der Erntequalität in Form marktfähiger Salatköpfe im Jahr 2022 [%] (Fehlerbalken = Standardfehler)

4.2.3 Ertrag und Marktqualität 2023

Im Jahr 2023 wurde der Aufwuchs und die Marktfähigkeit von sechs Kulturen auf fünf Parzellen im Variantenvergleich untersucht. Auf den Vergleichsflächen wuchsen drei Sätze Salat und jeweils eine Kabis-, Lauch- und Selleriekultur. Die auf dem Feld erhobene Marktqualität entspricht dabei nicht bei allen Kulturen der tatsächlichen Vermarktung der Betriebe, da zum Beispiel bei Lauchkulturen jede Pflanze geerntet wird, und der Vermarktungserfolg von der Erntemasse abhängig ist. Die Abbildung 18 zeigt einen Unterschied von 8% geringerem Masseertrag im Kontrollbereich im Vergleich zur nach Nmin gedüngten Variante.

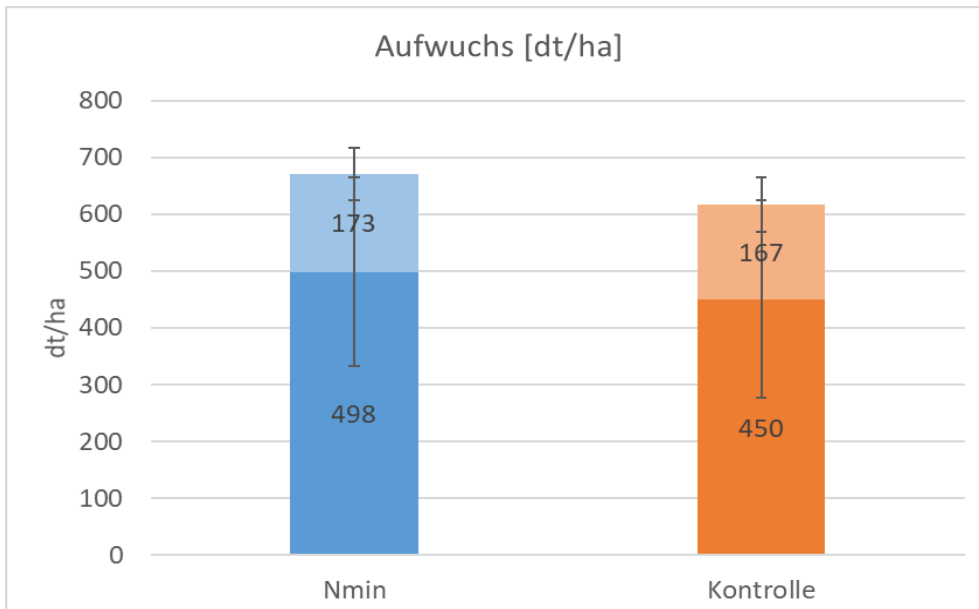


Abbildung 18: Vergleich von Aufwuchs und Ertrag (= Erntegut) zwischen Nmin-Variante und Kontrolle im Jahr 2023 [dt ha⁻¹] (Fehlerbalken = Standardfehler)

Die Qualität ist jedoch nicht signifikant um ein Prozent höher auf der Kontroll-Variante (Abbildung 19). Da 2023 der Aufwuchs durch nicht düngedingte Mängel bei einem Salatsatz und einer Selleriekultur auf der Kontrolle dezimiert waren, können im Schnitt Aufwuchs, Qualität und Ertrag als gleich im Rahmen der Messgenauigkeit angesehen werden. Bei einer einzelnen Fläche könnte eine ausgelassene Düngung zu einer Verringerung des Ernteertrags geführt haben. Insgesamt gab es jedoch nur eine geringe Differenz in der N-Düngung, welche Unterschiede im Aufwuchs erklären könnte.

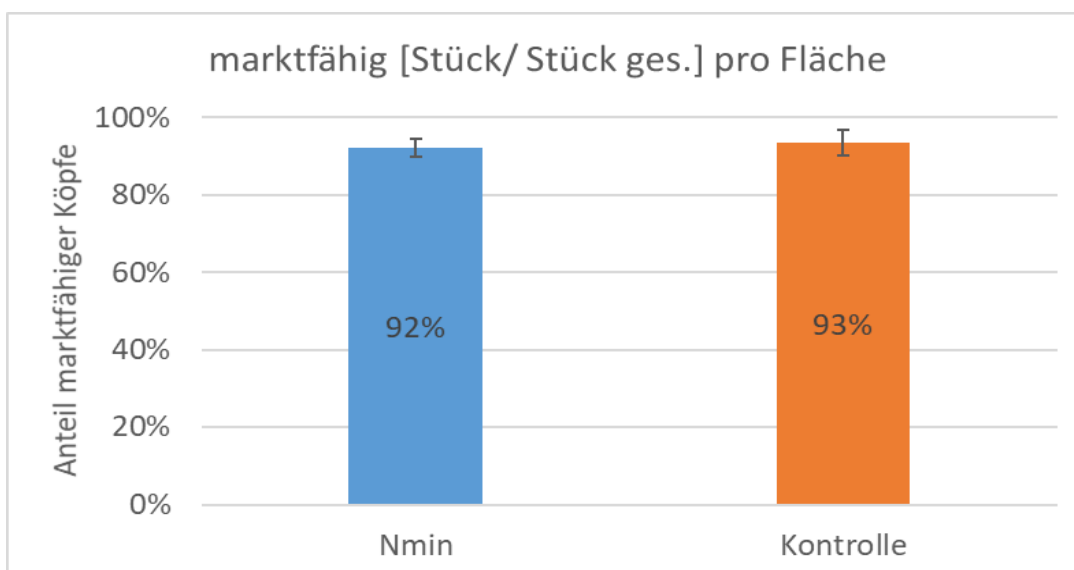


Abbildung 19: Vergleich der Erntequalität in Form marktfähiger Ware (Salate, Sellerie, Kabis, Lauch) im Jahr 2023 [%] (Fehlerbalken = Standardfehler)

4.3 Düngermengen

4.3.1 Düngermengen 2021

Im Jahr 2021 konnten aufgrund der nassen Witterung und der zu niedrigen Labor-Nmin-Werte im Mittel nur 27 kg N ha⁻¹ an Dünger gespart werden. Dabei waren die Düngergaben mit 264 kg N ha⁻¹ (Praxis) vs. 237 kg N ha⁻¹ (Nmin-Variante) in einem für Salate sehr hohen Bereich. Bei der Berechnung ist zu berücksichtigen, dass auf Parzelle Dich oben zwei Sätze Salat und auf Muermatten Süd nur ein Satz Salat gepflanzt und gedüngt wurden.

In Abbildung 20 sieht man auch, dass es einen Fall gab, bei dem eine höhere Düngung nach Nmin erfolgte (Muermatten Süd). Hier war die nach GRUD-Nmin hohe Startdüngung durch starke Regenfälle bereits wieder ausgewaschen, so dass der volle Düngerbedarf zur Kopfdüngung nochmals gegeben werden musste. Dies zeigt am Beispiel, wie vorteilhaft eine gesplittete Düngergabe mit niedriger, am Entzug der ersten 2 – 3 Wochen orientierter Startgabe unter bestimmten Witterungsbedingungen ist.

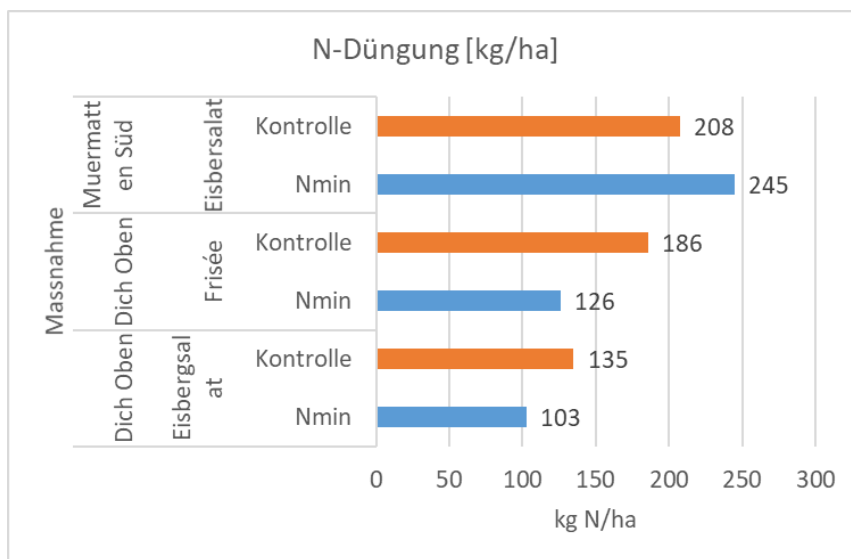


Abbildung 20: Vergleich der Düngemengen im Jahr 2021.

4.3.2 Düngermengen 2022

Im Jahr 2022 unterscheiden sich die Düngemengen aufgrund der Nmin-Empfehlungen trotz zu niedriger Labor-Nmin-Werte bereits signifikant um > 60 kg N ha⁻¹ (Abbildung 21). Verglichen wurde die Düngung auf sechs Parzellen anhand von acht Salatsätze und einer Brokkolikultur.

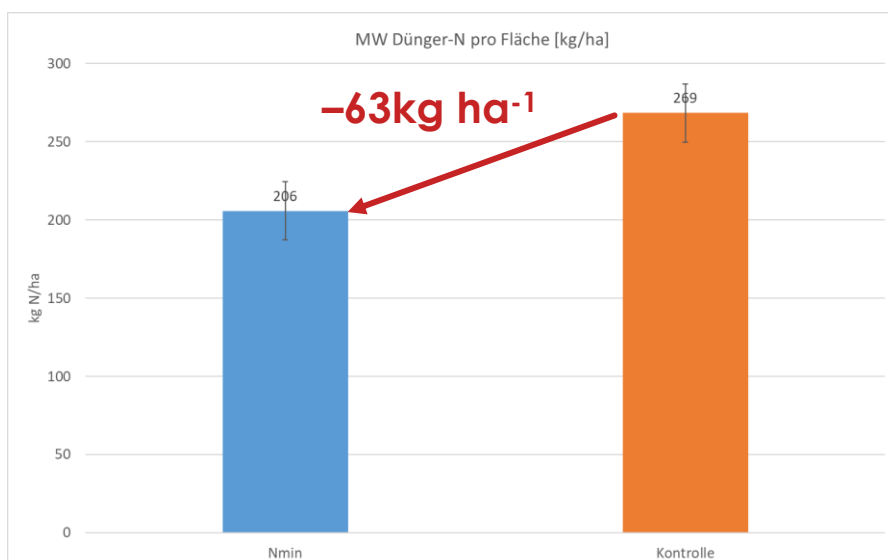


Abbildung 21: Vergleich der Düngemengen im Jahr 2022 (Mittelwerte von 6 Flächen; Fehlerbalken = Standardfehler).

4.3.3 Düngermengen 2023

Im Jahr 2023 gab es einen absoluten Düngeunterschied von lediglich 13 kg N ha⁻¹ im Mittel zwischen den Varianten. Im Vergleich zum Vorjahr war die Düngung auf der Nmin-Variante etwas höher, auf der Kontroll-Variante gab es jedoch eine Reduktion von insgesamt 44 kg N ha⁻¹.

Berücksichtigt werden muss für 2023, dass bei der Hälfte der untersuchten Kulturen aufgrund von technischen Problemen seitens des Betriebs die Kontroll-Variante ebenfalls nach Nmin gedüngt wurde. Von den anderen drei Kulturen hat eine durch die Düngung nach Nmin eine etwas höhere N-Zugabe als die Kontrolle erfahren.

Auch im Jahr 2023 war die nasse Witterung bis ins späte Frühjahr ein Grund, dass bei den ersten Düngergaben zwischen Nmin und betriebsüblicher Düngung kaum ein Unterschied war. Der Bodenspeicher war relativ leer.

Im direkten Vergleich mit dem Jahr 2022 muss berücksichtigt werden, dass 2023 die Düngung von lediglich drei Salatkulturen zusammen mit je einer Kultur Lauch, Sellerie und Kabis betrachtet wurde. Im Gegensatz zum vorherigen Jahr wurden mehr Kulturen mit einem hohen N-Sollwertbedarf untersucht. In Abbildung 23 werden nur die drei Salatkulturen berücksichtigt. Es zeigt sich im Gegensatz zur Gesamtbetrachtung ein deutlich niedrigeres Düngenniveau ohne signifikanten Unterschied zwischen den Varianten.

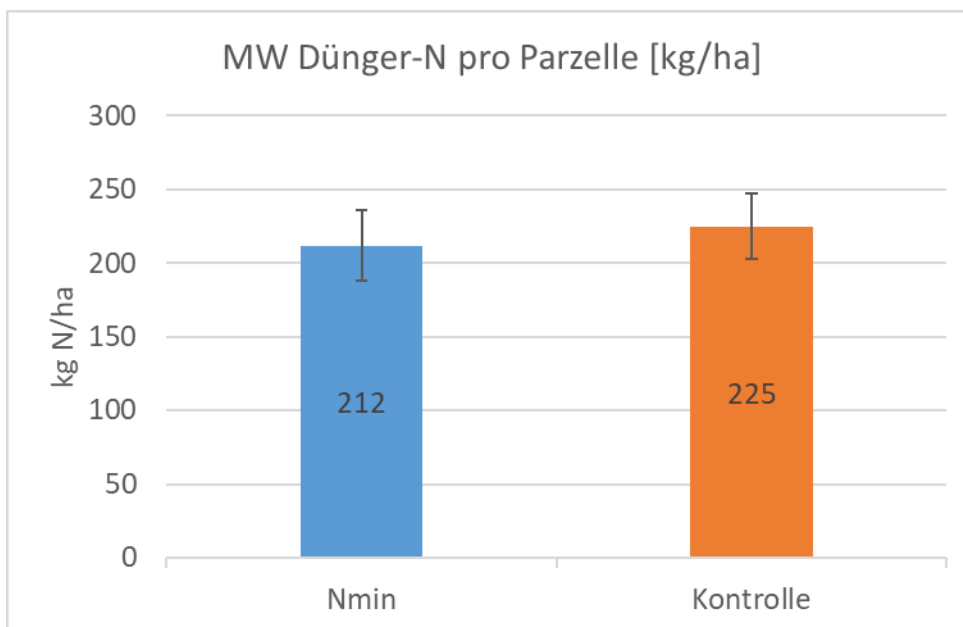


Abbildung 22: Vergleich der Düngemengen im Jahr 2023 (Mittelwerte von fünf Flächen mit sechs Kulturen + Kunstwiese; Fehlerbalken = Standardfehler).

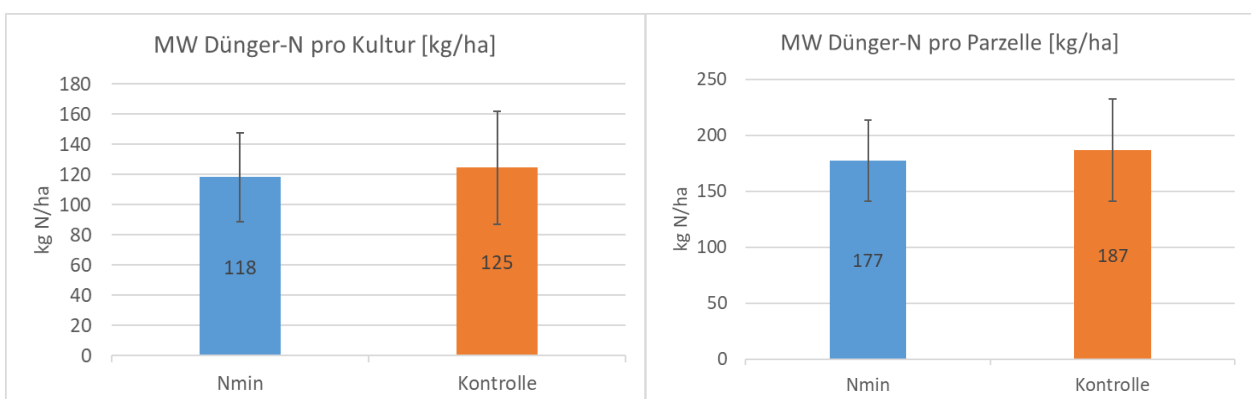


Abbildung 23: Vergleich der Düngemengen der Salatkulturen im Jahr 2023 pro Kultur und pro Parzelle (Mittelwerte drei Kulturen auf zwei Parzellen; Fehlerbalken = Standardfehler)

4.4 N-Auswaschung

4.4.1 N-Auswaschung Winter 2021/2022

Im Winter des ersten Versuchsjahrs wurde die N-Auswaschung auf zwei benachbarten Parzellen gemessen. Bei der mit Lauch bestandenen Fläche Bahnwärterhaus ist zu bedenken, dass es zwischen den beiden Varianten im Anbaujahr 2021 keinen Behandlungsunterschied gab (s.o.). Eine Zwischenbegrünung war wegen des späten Erntedatums (18.10.21) und des kühlen Oktobers nicht mehr möglich. In der Eisbergsalatparzelle Muermatten Süd wurde die Nmin-Variante höher als die Kontrolle gedüngt (s.o.). Der N-Überschuss (Dünger – Abfuhr) aus den Vorkulturen 2021 lag auf allen vier Teilparzellen mit 180 bis 220 kg N ha⁻¹ recht nah beieinander. Es muss davon ausgegangen werden, dass eine Teilauswaschung des N-Überschusses schon während des extrem nassen Sommers erfolgte.

Der relevante Unterschied zwischen den beiden benachbarten Parzellen ist aber der Effekt der Zwischenbegrünung (Abbildung 24). Die unbegrünte Fläche verlor über den Winter (Ende Okt-Ende Feb, 4 Monate) > 100 kg N ha⁻¹, die begrünte Variante ca. 80 kg N ha⁻¹ weniger.

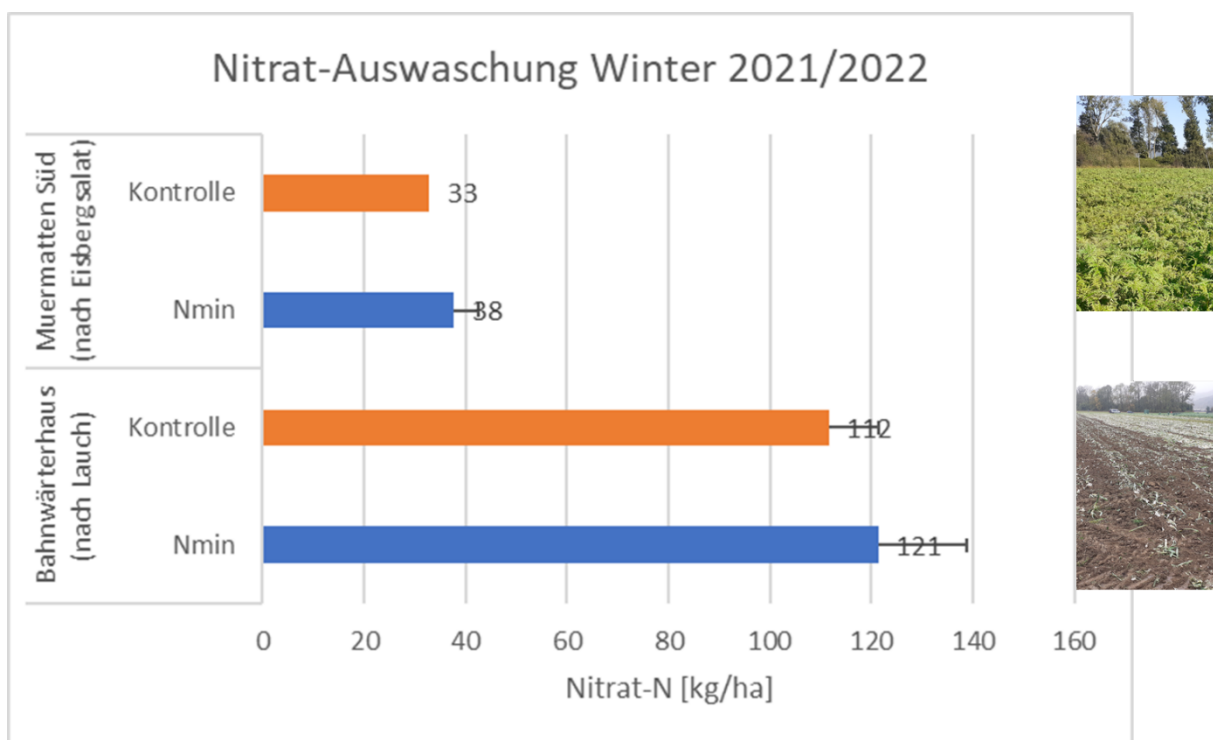


Abbildung 24: Vergleich der N-Auswaschung zwischen benachbarten Parzellen. Oben: Phacelia als Zwischenbegrünung. Unten: Unbearbeitete Fläche nach später Lauchernte. (Fehlerbalken = Standardfehler)

4.4.2 N-Auswaschung 2022

4.4.2.1 Vegetationsperiode 2022

In der Vegetationsperiode des 2. Versuchsjahres 2022 wurde auf insgesamt 13 Teilparzellen die N-Auswaschung gemessen. Davon waren auf sechs Flächen direkte Vergleichsmessungen von Kontrolle und Nmin-Variante möglich. Die Fläche Dich oben war aufgrund der betrieblichen Fruchtfolge mit Winterweizen bestellt und fiel deshalb für den Gemüsevergleich heraus.

Nur auf der Fläche Rickenbach ist die N-Auswaschung auf der Nmin-Parzelle höher als in der praxisüblichen Kontrolle (Abbildung 25). Auf dieser Fläche gab es Nester von Innenbrand, von denen ein Teil im Bereich der Nmin-Messungen lag. Diese Bereiche wurden nicht beerntet und erhöhten damit a) den Verbleib von N in Ernteresten auf der Fläche und b) den N-Überschuss auf der betroffenen Teilfläche.

Die Unterschiede in der N-Auswaschung sind nur auf der Fläche Dich unten signifikant. Die Tendenz, dass sich höhere Düngegaben in höheren Auswaschungen wiederfinden, ist jedoch aufgrund der Häufigkeit schon während der Vegetationsperiode recht klar ersichtlich.

Im Vergleich zum Ackerbau ist die Auswaschung bereits in der Vegetationsperiode mit im Mittel 100 kg N/ha sehr hoch. Dies ist durch einen natürlichen Anteil Frühjahrsickerung (März-April) sowie den Sonderfaktor Bewässerung im Sommer mit jeweils hohen Nitratkonzentrationen bedingt. Auch eine ordnungsgemäße Bewässerung, wie sie im Perimeter betrieben wird (Hunkeler et al., 2021), führt zu Mehrauswaschungen im Sommer, weil das Bodenprofil als ganzes feucht gehalten wird, und somit der Bodenspeicher in nassen Phasen deutlich voller ist und deutlich schneller Sickerung produziert als auf den bis in grössere Tiefen entwässerten Ackerbodenspeicher.

Einer besonderen Erwähnung bedarf die als «Parzelle 8/9» bezeichnete Fläche. Hier wurde aus der Diskussion mit einem Produzenten heraus die Auswaschung gemessen, weil zuvor ein stark wüchsiger Wirz über Winter auf einen mittelspäten Mais folgte. Die Vorgeschichte konnte hier nicht untersucht werden, daher sind z.B. die Rest-Nmin-Gehalte nach Mais nicht bekannt. Da der Wirz nur gering gedüngt wurde, war zu erwarten, dass das Gemüse hier als Catch Crop funktioniert und die N-Überschüsse aus dem Mais erfolgreich aufnehmen kann. Gemessen an den anderen Gemüseflächen ist der Wirz tatsächlich die Kultur mit der zweitniedrigsten Auswaschung, jedoch ist diese gemessen am 30 kg N ha⁻¹-Ziel für den Gesamtperimeter nicht zufriedenstellend. Dennoch könnte Wirz als Catch Crop für den Winter produktiv und erfolgreich sein. Hierzu sollen weitere Untersuchungen folgen.

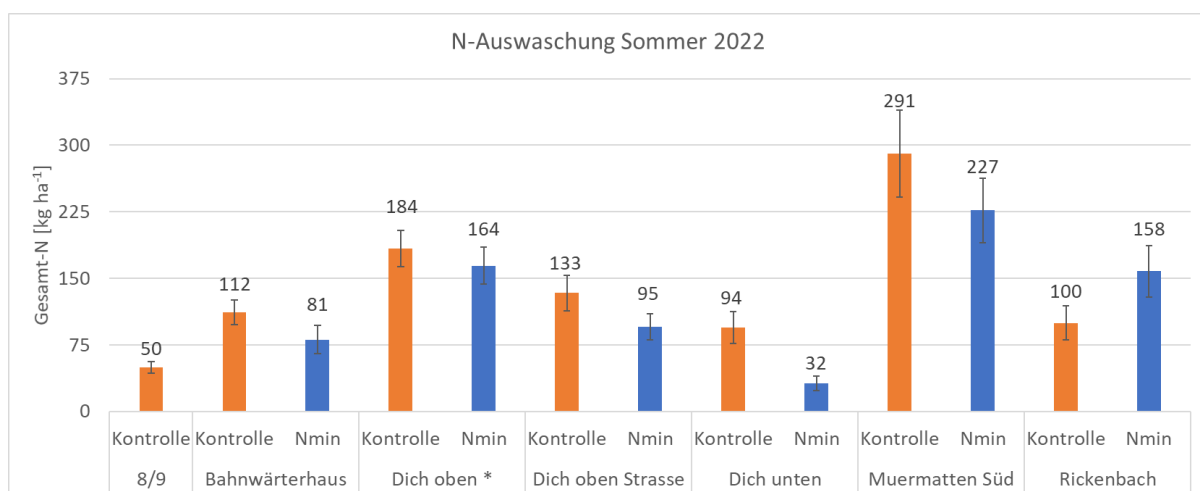


Abbildung 25: Vergleich der Auswaschungen der Vegetationsperiode 2022 (März – Oktober), * Dich oben Ganzjahresauswaschung Okt.21-Okt.22; (Fehlerbalken = Standardfehler).

4.4.2.2 Winter 2022/2023

Die Abbildung 26 stellt die winterliche N-Auswaschung, folgend auf die in Abbildung 25 dargestellte Auswaschung in den Teilparzellen, dar. Lediglich zu den Messungen auf der Fläche Aebisholz gibt es keine Daten aus der vorangegangenen Vegetationsperiode. Die Teilparzellen 8/9 und Dich oben zeigen Auswaschungen nach Ackerkulturen, jedoch auf Standorten mit einer Gemüsevorgeschichte.

Auffällig sind die Daten auf Aebisholz. Dort wurde nach zwei Sätzen Salat auf der Kontrollvariante ein feines Saatbeet für Steckzwiebeln vorbereitet und auf der Nmin-Variante Kunstwiese als Winterbegrünung etabliert. Bei der brach liegenden Fläche kann angenommen werden, dass der komplette mineralische vorliegende Stickstoff aus dem Herbst ausgewaschen wurde. Die Kunstwiese konnte im Vergleich einen Grossteil der Auswaschung verhindern.

Auf allen anderen Flächen wurden Winterbegrünungen etabliert. Auf der Parzelle Bahnwärterhaus wuchs Kunstwiese und auf den anderen Flächen abfrierende Begrünungen. Die nun winterbegrünt Standorte zeigen mit Auswaschungen zwischen 3 und 69 kg N ha⁻¹ eine Verbesserung zu den Vorjahres-Messungen.

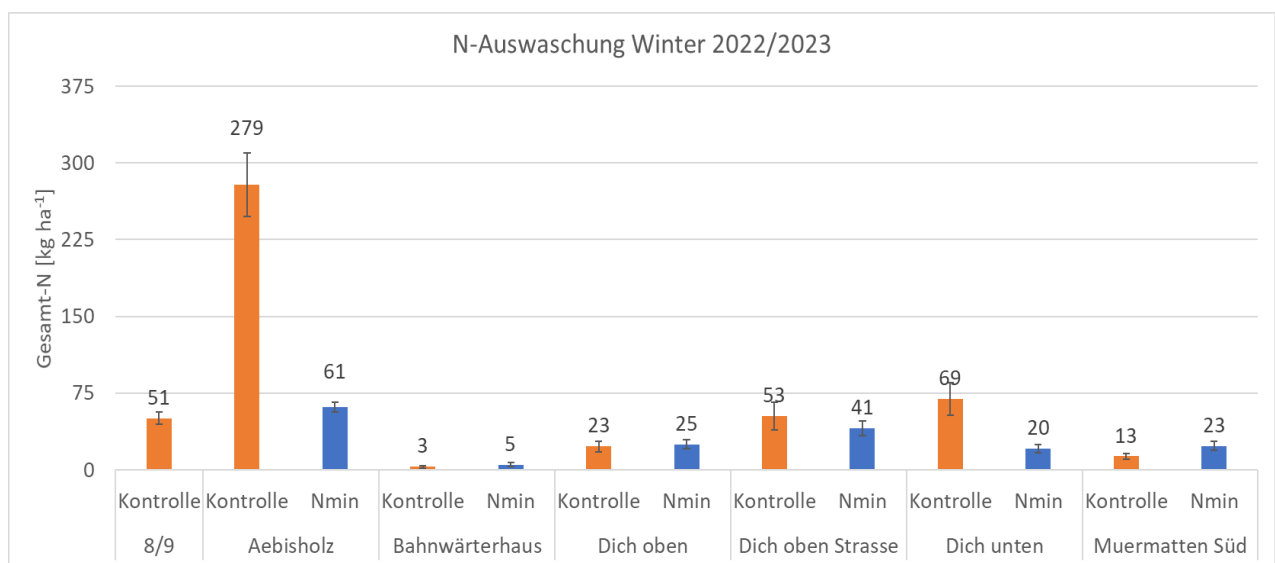


Abbildung 26: Vergleich der Auswaschungen über den Winter 2022/2023 (November - Februar; Fehlerbalken = Standardfehler).

4.4.2.3 Ganzjahresbetrachtung März 2022 – Februar 2023

In Abbildung 27 wurde die N-Ganzjahresauswaschung als Summe der Vegetationsperiode und der folgenden Winterauswaschung dargestellt. Auf allen Parzellen liegt die Auswaschung der Kontrolle (praxisübliche Düngung) über der der Nmin-Variante. Im direkten Vergleich der Mittelwerte ergibt sich ein Unterschied von 61 kg N ha⁻¹. Diese reduzierte Auswaschung liegt sehr nahe am Unterschied in der Düngemenge von 63 kg N ha⁻¹.

Besonders deutlich ist der Düngungsunterschied auf der Fläche Dich unten mit 100 kg N ha⁻¹ zwischen den Varianten, dieser zeichnet sich in der Auswaschung komplett durch. Auch ein Unterschied von 59 kg N ha⁻¹ in der Düngung bei Dich oben Strasse zeigt sich in der Auswaschung mit einer Reduktion von 50 kg N ha⁻¹. Auf den anderen Parzellen gab es keine signifikanten Unterschiede in der N-Zugabe.

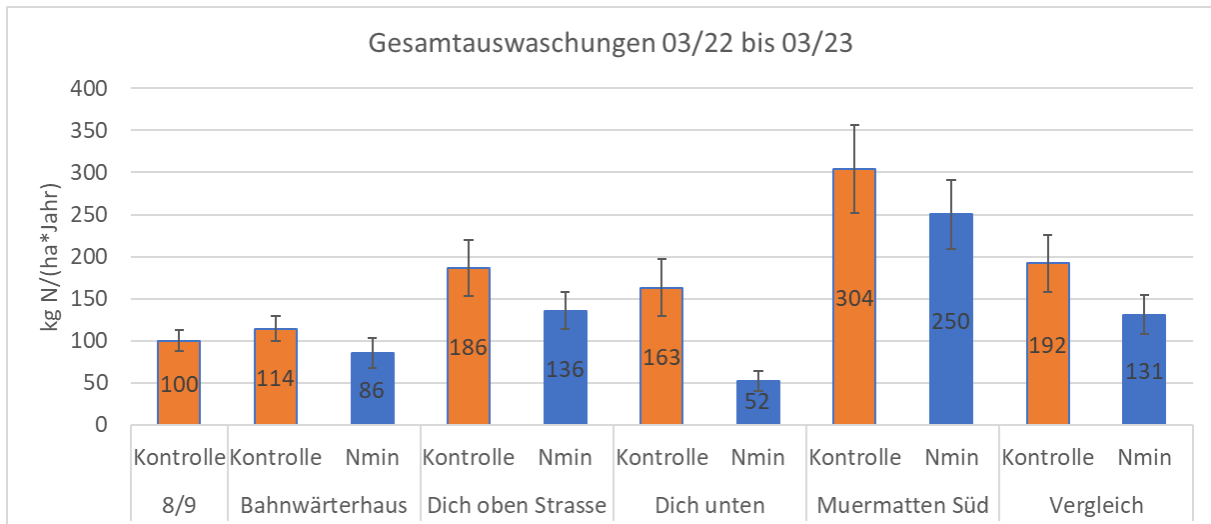


Abbildung 27: Vergleich der Ganzjahresauswaschungen (März 2022 – Februar 2023; Fehlerbalken = Standardfehler).

In einem von den anderen Parzellen abweichenden Zeitraum wurde die Auswaschung über den kompletten Kulturzeitraum eines Winterlauchs (Abbildung 28) im Bioanbau gemessen. Exakte Düngemengen sind nicht bekannt, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass auf beiden Varianten gleich gedüngt wurde. Bei gleicher Düngemenge zeigen die unterschiedlichen Messwerte die natürliche Heterogenität bedingt durch hohe Steingehalte sowie mögliche Unterschiede in der Teilbewirtschaftung in der Vorgeschichte auf der Parzelle Tela.

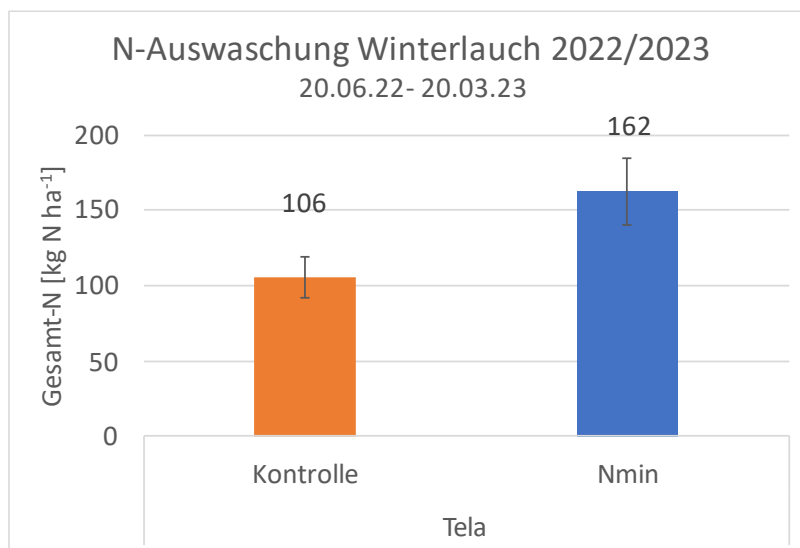


Abbildung 28: Vergleich der Auswaschungen bei einer Winterlauchkultur 2022/2023 (Fehlerbalken = Standardfehler).

4.4.3 N-Auswaschung Vegetationsperiode 2023

In der Vegetationsperiode 2023 wurden auf acht Parzellen Messungen zur N-Auswaschung durchgeführt. Zwei Parzellen (Rickenbach und 8/9) wurden mit Ackerkulturen bewirtschaftet und auf den Parzellen Matte und Bahnwärterhaus konnte aufgrund der starken Niederschläge im Herbst kein Wechsel der Messgeräte stattfinden. Auf den Flächen wurde zum Teil über unterschiedliche Zeiträume gemessen, so dass ein Vergleich aller Parzellen untereinander erst mit den Ergebnissen der Winterauswaschung möglich ist.

Da die Messungen zum Teil bis Anfang Dezember liefen, ist ein Teil der Winterauswaschung in den Daten enthalten. Verstärkt wird der Anteil der Winterauswaschung durch die hohen Niederschläge am Ende des Jahres. Im Gemüsebau wurden Auswaschungen zwischen 133 und 539 kg N ha⁻¹ gemessen.

Auf den Parzellen Dich oben und Tela gab es keine signifikanten Unterschiede in der Bewirtschaftung der beiden Varianten. Die hohen Werte in der Auswaschung können im Fall der Parzelle Tela mit einem Satz untergepflügten Salat bzw. auf Dich oben mit einer langen Brachezeit vor und nach einem einzelnen Salatsatz einhergehen.

Die Unterschiede in den Ergebnissen für Dich unten sollten durch einen geringeren Salatbesatz auf der Kontrollvariante und das generell hohe Auswaschungsniveau mit hohen Nmin-Werten zum Erntezeitpunkt erklärbar sein.

Aebisholz ist die einzige Fläche mit relevanten Düngedifferenz von 50 kg N ha⁻¹, dieser wird auch in der reduzierten Auswaschung von 68 kg N ha⁻¹ sichtbar.

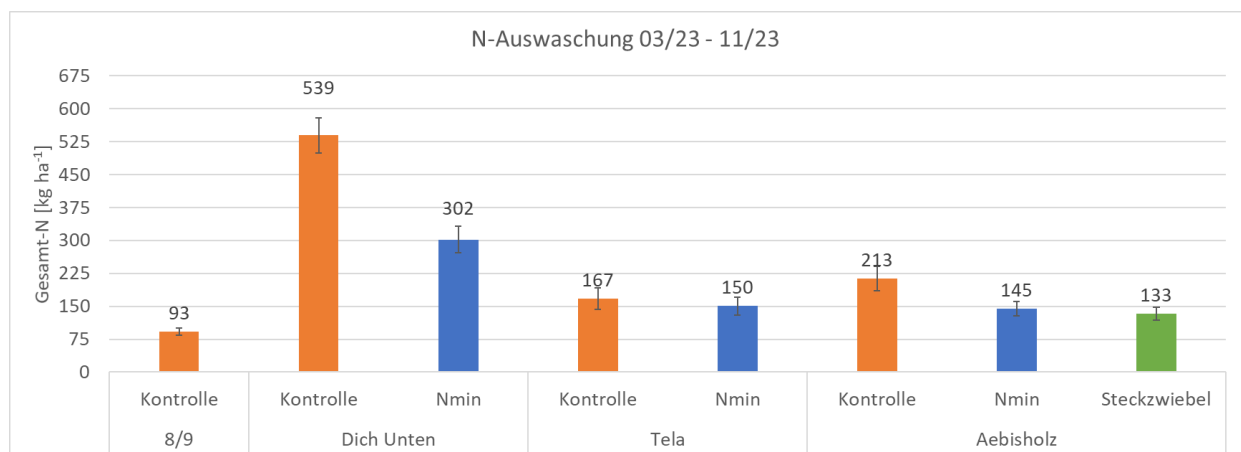


Abbildung 31: Vergleich der Auswaschungen der Vegetationsperiode 2023 (Anfang März – Ende November; Fehlerbalken = Standardfehler).

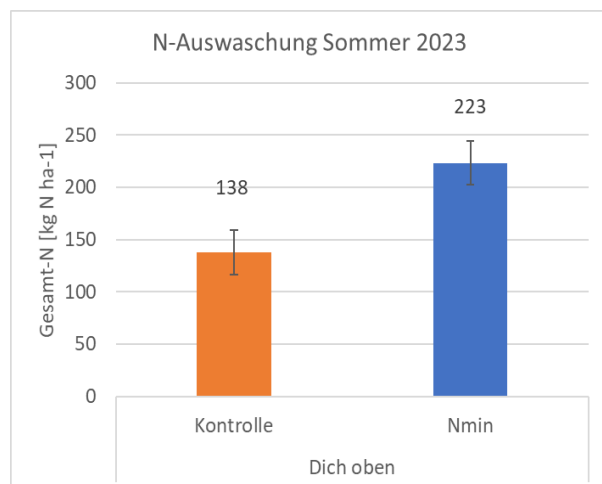


Abbildung 29: Vergleich der Auswaschungen auf Dich oben 2023 (März – Oktober; Fehlerbalken = Standardfehler).

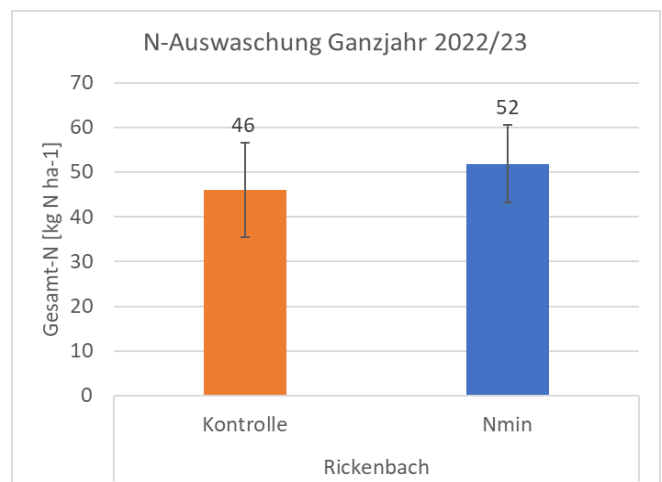


Abbildung 30: Vergleich der Ganzjahresauswaschungen von Dinkel auf Rickenbach (17.10.2022 – 10.10.2023; Fehlerbalken = Standardfehler).

4.5 N-Bilanzen

4.5.1 N-Bilanzen 2021

Aus den gemessenen Werten der Ernten, zu Nmin-Gehalten und der Auswaschung lassen sich verschiedene Indikatoren ausweisen oder berechnen. Tabelle 2 zeigt die wichtigsten berechneten **Indikatoren N1 – N3** für das Jahr 2021.

Der N-Saldo (**N1**) zeigt, dass auch ohne Berücksichtigung der Boden-Nachmineralisierung ein Überschuss von 69 bis 219 kg N ha⁻¹ auf den Gemüseflächen verbleibt. Bei ständig hohen Überschüssen ist in erster Näherung davon auszugehen, dass der Standort N-gesättigt ist und im Mittel der Jahre etwa so viel N an die Umwelt abgibt wie ihm als Überschuss zugeführt wird.

Der Indikator N2 (Düngung – Aufwuchs) zeigt, dass auch gemessen am Bedarf der Gesamtpflanzen zu hoch gedüngt wurde, und in diesem Jahr überall auch ein N-Überschuss von 47 bis 179 kg N ha⁻¹ gemessen am Gesamtbedarf der Pflanzen entstand. Ein Teil der Erklärung für 2021 ist, dass im frühen Sommer durch die hohen Niederschläge grosse Anteile der Startdüngung als verloren gelten mussten und deshalb von den Produzenten auch nochmals gegeben wurden. Diese doppelte Düngung nach Auswaschungsverlust spiegelt sich auch in der schlechten Effizienz des eingesetzten Düngers wider. Nur 14 – 45 % des eingesetzten Düngers (Mittelwert: 24 %) wurden der Fläche wieder entzogen (N3). Der Rest sollte im Durchschnitt der Jahre umweltwirksam werden. An den verschiedenen Indikatoren ist zu erkennen, wie gross die Potenziale für mehr Effizienz sind. So sollte N2 im Durchschnitt eher ausgeglichen sein, um die ganze Pflanze ausreichend zu ernähren, und dabei wird die hohe N-Mineralisation des Bodens im Nitratperimeter noch nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Wichtige N-Bilanzglieder für alle untersuchten Kulturen und Flächen im Jahr 2021, alle Angaben in [kg N ha⁻¹] ausser N3 [%]

Ernte-Datum	Kultur	Variante	N Ernte = Abfuhr	N Ernte-rest	N1: Düngung – Abfuhr	N2: Düngung – Aufwuchs	N3: N-Effizienz Ernte/Düngung [%]
25.06.21	Eisberg-salat	Nmin	25	41	219	179	10 %
25.06.21	Eisberg-salat	Kontrolle	29	37	179	141	14 %
01.07.21	Frisée	Nmin	57	21	69	48	45 %
01.07.21	Frisée	Kontrolle	79	21	107	86	42 %
14.09.21	Eisberg-salat	Nmin	25	30	78	47	24 %
14.09.21	Eisberg-salat	Kontrolle	19	31	116	85	14 %
18.10.21	Lauch	Nmin	50	44	187	143	21 %
18.10.21	Lauch	Kontrolle	56	40	181	142	23 %

4.5.2 N-Bilanz Jahr 2022

Die Ergebnisse des Jahres 2022 werden zusammengefasst in Tabelle 3 dargestellt. In dem klimatisch unauffälligen Jahr hat sich die Effizienz von 24 % auf 36 % respektive 41 % erhöht. Dennoch liegen die N-Überschüsse in beiden Varianten deutlich über 100 kg N ha^{-1} . Auch die Auswaschungsverluste sind bereits in der Vegetationsperiode mit 91 kg N ha^{-1} (Nmin-Variante) bis 110 kg N ha^{-1} (Kontrolle) erheblich und 3 – 4-fach über dem kritischen Wert von $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Wenn man bedenkt, dass die Winterauswaschungen bei den Messungen im NitroGäu-Projekt ähnlich hoch waren wie die Sommerauswaschungen, ist man im Gemüsebau 2022 noch weit von einer Grundwasserverträglichkeit entfernt.

Allerdings gibt es noch verschiedene ungenutzte Potenziale: Die N-Nachlieferung, die mit besserer Laboranalytik auch besser angerechnet werden kann. Die N-Freisetzung aus Ernteresten und die bedarfsgerechteren Düngemengen, die sich an den Entzügen, die in der Region / auf dem Betrieb relevant sind, ausrichten. Allein der Laboreffekt liegt mit dem besten Schätzer der korrigierten Werte bei max. 100 kg N ha^{-1} im Jahr 2022 (Tabelle 3, Werte in Klammern). Die Auswirkungen auf alle Indikatoren wären sehr gross, wenn dieses Potenzial voll ausgenutzt werden kann.

*Tabelle 3: Mittlere Gesamt-N-Bilanz 2022 auf 4 Vergleichsflächen mit 7 Ernten (mit * gekennzeichnete Werte geben den besten Schätzer wieder, wie die N-Bilanz bei korrekten Nmin-Laborwerten ausgesehen hätte)*

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Praxis
Dünger-N	215 (116*)	274
Erntereste	131	152
Output [kg N/ha]		
Feldabfuhr	87	99
Auswaschung (Sommer)	91	110
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	128 (29*)	175
N-Effizienz Ernte/Düngung	41% (75%*)	36%
N-Speicheränderung /Jahr	37	65

4.5.3 N-Bilanz Jahr 2023

Die zusammengefassten Ergebnisse des Jahres 2023 und die daraus ermittelten Indikatoren zur N-Bilanz sind in Tabelle 4 dargestellt. Im Gegensatz zum Vorjahr ist die Feldabfuhr im Verhältnis zum Ernterest deutlich erhöht. Der Einsatz an Düngemitteln in der Nmin-Variante war dagegen quasi unverändert zum Vorjahr. Die beiden zuvor genannten Faktoren zeigen, dass ein grösserer Anteil des zugeführten Stickstoffs als Dünger wieder in Form von Erntegut abgeführt wurde. Die N-Effizienz zeigt sich dadurch mit 51% und 60% deutlich erhöht zum Vorjahr.

Der N-Saldo und damit der absolute Überschuss konnte 2023 durch die Düngung nach Nmin unter 100 kg N ha⁻¹ gesenkt werden. In der Gesamtbetrachtung von 2021 bis 2023 zeigt sich damit durchgehend ein hoher N-Überschuss mit sinkender Tendenz. Die 2021 getätigte Schlussfolgerung, dass bei ständig hohen Überschüssen der Standort Stickstoff gesättigt ist und somit im Mittel der Jahre etwa so viel Stickstoff an die Umwelt abgibt wie an Überschüssen zugeführt wurde, wird durch die N-Freisetzung aus dem organischen Bodenvorrat (=negative Speicheränderung) von -139 und -187 kg N ha⁻¹ im Jahr 2023 gestützt.

N-Saldo und N-Effizienz haben sich in 2023 stark verbessert. Die Tatsache, dass trotz einer Verbesserung dieser Indikatoren die N-Auswaschung 2023 besonders hoch war, zeigt die Bedeutung von Winterbegrünungen und die Notwendigkeit, das natürliche Nachlieferungspotential der Böden besser zu nutzen.

Tabelle 4: Mittlere Gesamt-N-Bilanz 2023 auf 5 Vergleichsflächen mit sechs Ernten. Sommer-Auswaschung von drei Flächen.

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Kontrolle
Dünger-N	212	225
Erntereste	54	51
Output [kg N/ha]		
Feldabfuhr	128	115
Auswaschung (Sommer)	223	297
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	84	110
N-Effizienz Ernte/Düngung	60%	51%
N-Speicheränderung /Jahr	-139	-187

4.6 N-Mineralisierung und Humusvorräte

4.6.1 C-N-Gehalte der Böden

Im Jahr 2023 wurden auf den Versuchsflächen Bodenproben aus drei Tiefenstufen à 30 cm bis in 90 cm Tiefe genommen, um die C_{org} und N_{tot} -Gehalte der Böden im Perimeter zu bestimmen. Die Ergebnisse sind untergliedert nach der hauptsächlichen Nutzung im Gemüse- oder Ackerbau in Tabelle 5 dargestellt. Die Ap-Horizonte (Oberböden) zeigen standortsabhängig Stickstoffvorräte zwischen 8.3 und 15.5 t N ha⁻¹ im Gemüsebau und 7.1 bis 14.9 t N ha⁻¹ im Ackerbau. Für Mineralböden werden in der Literatur lediglich N-Vorräte von 3-9 t ha⁻¹ in den Ap-Horizonten angegeben, in tiefgründigen Schwarzerden über 14 t N ha⁻¹ (Quelle: Amelung W., 2018). Die Böden im Gäu weisen damit selbst auf den leichteren Standorten hohe Gesamt-N-Gehalte auf.

Bemerkenswert sind darüber hinaus die hohen C_{org} und N_{tot} -Vorräte der *Unterböden*. Im Gemüsebau liegt der C_{org} zwischen 14.7 und 51.7 t C ha⁻¹ mit N-Vorräten von 2.1 und 6.1 t N ha⁻¹. Die Gehalte in den Ackerböden liegen nochmals höher zwischen 32.9 und 76.1 t C ha⁻¹ und N_{tot} -Gehalten zwischen 3.7 und 7 t N ha⁻¹. Diese ungewöhnlich hohen *Unterbodenvorräte* sollten bei N-Nachlieferung und N-Dynamik mit beachtet werden.

Im Schätzrahmen einer jährlichen Mineralisation von 0.2 – 2% des insgesamt in den Böden gespeicherten Stickstoffs nach Scheffer/Schachtschabel, 2018, könnten pro Jahr im Gemüsebau etwa 40 bis 400 kg N ha⁻¹ freigesetzt werden. Für das Gäu wird die obere Grenze der Mineralisation angenommen, da sowohl der Gesamtstickstoff überdurchschnittlich hoch ist, als auch die pH-Werte im idealen Bereich zwischen 5 und 8 liegen. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Durchwurzelungstiefen der Kulturen könnten davon bis zu 200 kg N ha⁻¹ in 0-30 cm Tiefe (Flachwurzler) und über 300 kg N ha⁻¹ in 0-60 cm (Tiefwurzler) mineralisiert werden. Das Timing der Mineralisation muss jedoch mit eigenen Untersuchungen ermittelt werden (s. Kap. 4.6.2 / 4.6.3).

Enge C/N-Verhältnisse durch die ebenfalls hohen C_{org} -Gehalte sollten zudem eine N-Sperre in der Regel verhindern.

Tabelle 5: C_{org} , N_{tot} und C/N-Gehalte 2023 im Gemüsebau und im Ackerbau

Gemüsebau				Ackerbau			
Tiefe [cm]	C_{org} [kg/ha]	N_{tot} [kg/ha]	C/N-Verhältnis	Tiefe [cm]	C_{org} [kg/ha]	N_{tot} [kg/ha]	C/N-Verhältnis
0 - 30	98605	10985	9.0	0 - 30	111390	11487	9.7
30 - 60	49955	5979	8.4	30 - 60	71271	7621	9.4
60 - 90	26814	3517	7.6	60 - 90	49742	5095	9.8
0 - 90	172234	19896	8.7	0 - 90	232403	24204	9.6

4.6.2 Mineralisation mit Nulldüngewfenstern bestimmt

In den Jahren 2022 und 2023 konnten auf zwei Flächen eines Betriebes Nulldüngewfenster angelegt werden. Es wurden zwei erste Salatsätze und zwei zweite Salatsätze untersucht. Bei einem der Nulldüngewfenster wurden sowohl der erste als auch der zweite Salatsatz nicht gedüngt. Es erfolgte damit über das ganze Jahr keine Düngegabe.

Der Aufwuchs und die Marktfähigkeit der Salate sind in Tabelle 6 dargestellt. In den zwei aufeinanderfolgenden Versuchsjahren wurden überraschend gute Aufwüchse und Marktfähigkeiten in den späten, zweiten Salatsätzen erzielt. Ohne Düngung wurden ähnlich viele marktfähige Salatköpfe wie auf den Vergleichsvarianten produziert. Die Nullparzellen, in denen die Vorgängerkultur gedüngt wurde, produzierten in zwei von drei Fällen Ernteerträge, die mit den gedüngten Bereichen vergleichbar waren. Im dritten Fall kam es zu Mindererträgen in der Masse bei immer noch guter Marktfähigkeit. Bei der übers komplette Jahr nicht gedüngten Teilparzelle kam es im 1. Satz zu deutlich reduziertem Aufwuchs, nicht jedoch im 2. Satz.

In der ersten Saisonhälfte kam es auf einer Nullparzelle zu einem kompletten Ausfall an vermarktungsfähiger Ware, der Aufwuchs entsprach etwa der Hälfte des Ernterestes. Auf der zweiten Parzelle wurde vermarktungsfähige Ware mit etwa halbiertem Ertrag produziert.

Tabelle 6 Vergleich der Ernteerträge von zwei Parzellen mit Nulldüngewfenster in den Jahren 2022 und 2023. Die Nullparzelle mit der Bezeichnung Null ist ab dem ersten Salatsatz und die Variante Null2 ab dem zweiten Satz ungedüngt.

Kultur und Standort	Parameter	Nmin-Variante	Kontrolle	Null	Null 2
Eisbergsalat 2. Satz (2022) Dich Unten	Ernteertrag [dt/ha]	218	179		204
	Ernterest [dt/ha]	461	480		446
	Marktfähigkeit	76 %*	69 %*		74 %*
Frisée 2. Satz (2022) Rickenbach	Ernteertrag [dt/ha]	435	464		363**
	Ernterest [dt/ha]	288	267		187
	Marktfähigkeit	92 %	96 %		96 %
Endivie 2. Satz (2023) Dich Unten	Ernteertrag [dt/ha]	432	297	382	415
	Ernterest [dt/ha]	162	159	163	172
	Marktfähigkeit	100%	92%	98%	96%
Kopfsalat 1. Satz (2023) Dich Unten	Ernteertrag [dt/ha]	320	288	161	-
	Ernterest [dt/ha]	74	66	53	-
	Marktfähigkeit	88%	90%	74%	-
Eisbergsalat 1. Satz (2023) Dich Oben	Ernteertrag [dt/ha]	275	226	0	-
	Ernterest [dt/ha]	298	300	130	-
	Marktfähigkeit	85%	82%	0%	-

* Viele Schosser

** Andere Sorte im Bereich der Nulldüngung gesetzt

Die Gründe für dieses zunächst vielleicht überraschende Ergebnis sind den Tabellen 7-9 zu entnehmen. Der Boden ist zum zweiten Satz durch die Düngung, die Erntereste der Vorkultur sowie die sommerliche N-Freisetzung aus dem Humusvorrat in den meisten Fällen bereits so reich an mineralischem Stickstoff (Nmin-Gehalte der Nullparzellen: 129 - 203 kg N ha⁻¹ in 0 – 60 cm Tiefe), dass auf den Flächen genügend N auch ohne Düngung vorhanden ist. Auch nach der Kultur sind die mineralische N-Vorräte noch hoch (Nmin um die 70 kg N ha⁻¹) bis sehr hoch (Nmin bei 167 kg N ha⁻¹).

Tabelle 7: Messdaten und Indikatoren auf der Fläche Dich Unten, Eisbergsalat, 2.Satz, 27.06.-16.08.2022

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Praxis	Null
N _{min} Start _{0-60cm}	169	203	203
Dünger-N	113	153	0
N _{min} Ernte _{0-60cm}	175	198	167
Erntereste	102	120	99
Output [kg N/ha]			
Feldabfuhr = Ernte	33	27	28
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	80	126	-28
Rest-N = Nmin + Erntereste	277	318	266
Netto-N-Mineralisation /Kultur	28	-11	91

Tabelle 8: Messdaten und Indikatoren auf der Fläche Dich Unten, Endiviensalat, 2. Satz, 23.08.-23.10.2023

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Kontrolle	Null 1	Null 2
N _{min} Start _{0-60cm}	111	145	129	77
Dünger-N	116	135	0	0
Nmin Ernte 0-60cm	113	323	70	68
Erntereste	28	26	24	28
Output [kg N/ha]				
Feldabfuhr = Ernte	75	48	58	70
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	41	87	-58	-70
Rest-N = Nmin + Ernterest	141	349	94	95
Netto-N-Mineralisation/Kultur	-11	117	23	88

Tabelle 9: Messdaten und Indikatoren auf der Fläche Rickenbach, Frisée, 2.Satz, 21.07.-07.09.2022

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Praxis	Null *
N _{min} Start _{0-60cm}	182	182	182
Dünger-N	101	108	0
N _{min} Ernte _{0-60cm}	154	107	68
Erntereste	44	46	27
Output [kg N/ha]			
Feldabfuhr = Ernte	76	77	54
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	25	31	-54
Rest-N = Nmin + Erntereste	198	153	95
Netto-N-Mineralisation /Kultur	-8	-60	-33

Der Rest-N auf den ungedüngten Flächen aus Nmin und leicht mineralisierbaren Ernteresten gilt zur letzten Kultur als Indikator für das N-Auswaschungspotential im Winter. Auch dieser Rest-N liegt in drei Fällen noch bei 95 kg N ha⁻¹ und in einem Fall bei 266 kg N ha⁻¹. Die Daten zeigen, was aufgrund der hohen Humusvorräten auf den Gemüseflächen sowie aus Berechnungen des Vorprojekts zu erwarten war: Eine sehr hohe Nachmineralisierung im Sommer, die für zwei Jahre in Folge ein ähnlich hohes Niveau zeigt.

Die Nulldünger-Versuche in der ersten Saisonhälfte 2023 (Tabellen 15 und 16, Kap. 6 - Anhang) zeigen Start-Nmin-Gehalte zwischen 30 und 85 kg N ha⁻¹ in den Vergleichsvarianten. Zum Setztermin des ersten Satzes ist die Grundversorgung an N abhängig von Faktoren wie der Winterbegrünung, Temperatur und Niederschlag über Winter und Frühjahr auf niedrigem bis relativ hohem Niveau. Zum Erntezeitpunkt der Kulturen waren ohne Düngung 52 und 66 kg N ha⁻¹ in Form von Nmin in den Böden, so dass ein Mangel zu Kulturrende ausgeschlossen werden konnte.

Die Aufnahme der Pflanzen war mit 23 und 34 kg N ha⁻¹ gering. Der Stickstoffmangel in den Nullparzellen zeigte sich beim Eisbergsalat mit höheren N-Sollwerten stärker als beim Kopfsalat. Fraglich ist, inwieweit beim Eisbergsalat das die Abfuhr mit einem Getreide im Vorjahr die N-Verfügbarkeit zusätzlich verringert hat. Der Rest-N der ersten Sätze kann nicht mit denen zweiter Sätzen verglichen werden, da weniger vermarktungsfähige Ware produziert wurde.

Die N-Dynamik bleibt eine offene Fragestellung. So wurden im Rahmen der Nulldüngfenster-Methodik folgende Zahlen bestimmt: 2022 wurden innerhalb der sieben Wochen im Eisbergsalat zusätzlich 91 kg N ha⁻¹ aus dem Bodenvorrat mobilisiert, während mit 4-wöchigem Versatz im Frisée in sieben Wochen 33 kg N ha⁻¹ im Bodenvorrat festgelegt (oder ausgewaschen) wurden. Im Jahr 2023 konnten über acht Wochen 23 und 88 kg N ha⁻¹ im Endiviensalat mobilisiert werden. Pro Woche wurden damit 3 – 13 kg N ha⁻¹ bei den untersuchten Kulturen mineralisiert. Bei den ersten Sätzen zeigt sich eine Mineralisierung von 8 bzw. 13 kg N ha⁻¹ in 5-7 Wochen.

Diese ersten Ergebnisse zeigen auf jeden Fall, dass in der Berücksichtigung der Vorfrucht- und Mineralisierungseffekte speziell auf den Gemüsestandorten des Gäu ein sehr grosses Potenzial zur Verbesserung der N-Effizienz liegt. Zudem wurde in den vorgestellten Ergebnissen die Auswaschung nicht berücksichtigt.

4.6.3 Mineralisation aus dem Massenbilanzansatz

Für alle im Jahr 2023 angebauten Kulturen wurde quantitativ die N-Mineralisation anhand der N-Bilanzen in Form der täglichen Netto-N-Mineralisation bestimmt. In den *Parzellen mit Auswaschungsmessungen* wurden im Mittel 0.7 kg ha^{-1} pro Tag ohne Auswaschung und inklusive proportionaler Auswaschung 1.9 kg ha^{-1} pro Tag N-Mineralisation während der Kulturdauer ermittelt. Bei Betrachtung der ersten Einzelergebnisse zeigt sich die Tendenz einer höheren N-Mineralisation bei kürzeren Kulturen, die während der Haupt-Vegetationszeit wachsen, im Vergleich zu Kulturen mit längeren Wachstumsphasen über die Vegetationszeit hinaus. Eine etwas genauere zeitliche Zuordnung sollte durch die wachsende Datengrundlage in den Folgejahren ermöglicht werden. Dass die berechnete Mineralisation *mit Auswaschung* mehr als doppelt so hoch ist, ist ein Hinweis, dass es einen hohen Anteil (grundsätzlich?) nicht nutzbarer Mineralisation im Gemüsebau gibt.

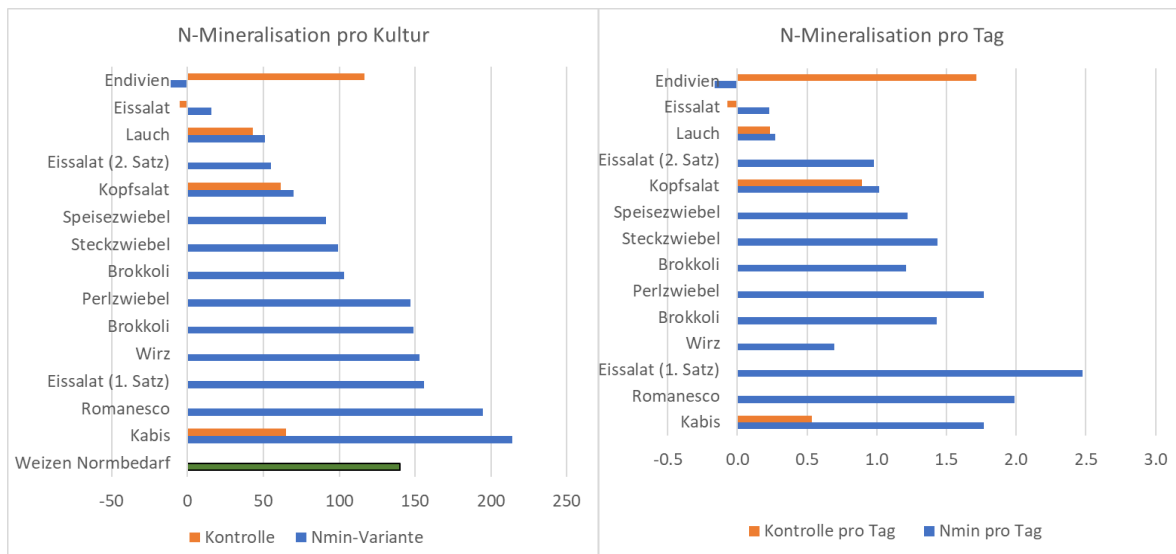


Abbildung 32: Netto-N-Mineralisierung der Kulturen im Perimeter 2023 ermittelt anhand der N-Bilanzen. Die N-Mineralisation pro Kultur enthält zum Vergleich als Massstab (grün) den Normbedarf von Weizen.

Bei Betrachtung der Einzelkulturen in Abbildung 32 zeigt sich ohne Berücksichtigung der Auswaschung noch ein uneinheitliches Bild. Insgesamt zeigt die N-Mineralisation ein hohes Potenzial. Die Bilanzen von sechs der untersuchten Kulturen zeigen N-Freisetzungen über dem Normbedarf von Weizen. Die tägliche Mineralisationsrate in den gleichen Zeiträumen liegt häufig über $1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$. Aufgrund der nicht berücksichtigten Auswaschung handelt es sich um eine Minimumabschätzung. Bei einer Berücksichtigung dürften die berechneten negativen Werte, welche eine N-Festlegung bedeuten würden, ebenfalls positive Werte vorweisen.

4.7 Sonderfragen

4.7.1 N-Speicherung in Pflanzenteilen über den Winter

Verstärkt durch die Mobilisierung von Stickstoff in der Vegetationsperiode bekommt die Flächenbewirtschaftung über den Winter im Kontext des Grundwasserschutzes eine besondere Bedeutung. Das Ziel der Bewirtschaftung sollte sein, den in Ernteresten zurückgebliebenen Stickstoff zusammen mit den Nmin-Überschüssen im Boden in Winterbegrünungen zu speichern, um diesen im nächsten Jahr neuen Kulturen zur Verfügung stellen zu können.

Wenn auf den Parzellen späte Kohlkulturen angebaut wurden, und nach der Ernte die Aussaat von Winterbegrünungen nicht mehr sinnvoll möglich war, wurden die Erntereste mit den Strüngen im Boden ohne weitere Bearbeitung stehen gelassen. Das Ziel dieser Handhabung ist es, durch die verbliebene Durchwurzelung des Bodens und das Unterlassen von Bodenbearbeitung die Mobilisierung von Stickstoff zu verhindern und die Auswaschung zu reduzieren. Betrachtet man die verbliebenen Erntereste von Brokkoli und Blumenkohl (Abbildung 33) im Februar 2023, so konnte in diesen nur 34 und 21 kg N ha⁻¹ gespeichert werden. Die Nmin-Werte im Boden waren zu diesem Zeitpunkt sehr hoch (Tabelle 11). Bei den folgenden Beprobungen konnte jedoch eine deutliche Abnahme des mineralisierten Stickstoffvorrats festgestellt werden. Die Möglichkeit, Stickstoff auf diesem Weg bis zur Folgekultur zu fixieren sollte damit besonders bei hohen Niederschlagsmengen in Frage gestellt und weiter untersucht werden. Für diese Einzelbeprobungen liegen keine weiteren Bilanzdaten vor.

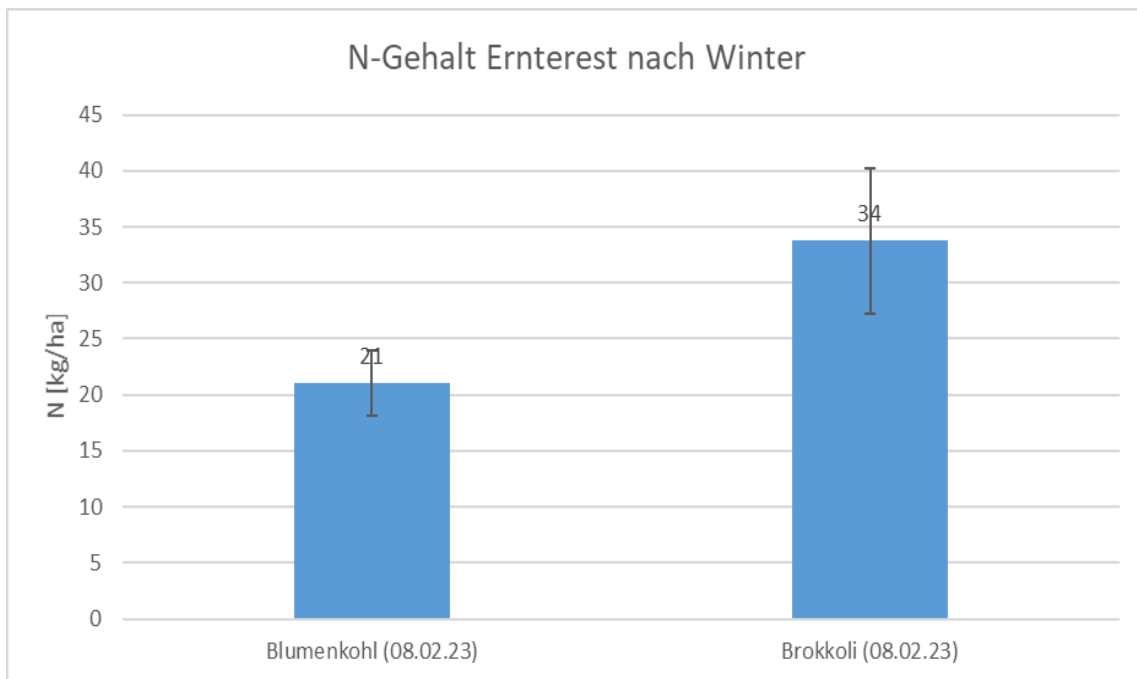


Abbildung 33: N-Gehalte in den Ernteresten von Brokkoli und Blumenkohl nach dem Winter (08.02.23).

Tabelle 11: Nmin-Gehalte in den Böden zum Zeitpunkt der Erhebung der Erntereste von Brokkoli und Blumenkohl, sowie der nächste darauf folgende Nmin-Wert.

Blumenkohl (Kestenhholz)		Brokkoli (Parzelle 1/2)	
Datum	Nmin [kg/ha]	Datum	Nmin [kg/ha]
17.02.2023	201 kg N/ha	17.02.2023	180 kg N/ha
10.05.2023	116 kg N/ha	23.03.2023	81 kg N/ha

Es wurde auch eine Ernteerhebung bei abfrierender Phacelia durchgeführt. Im November 2022 wurde der Aufwuchs der Pflanze kurz vor dem abfrieren analysiert. Die Erhebung ergab eingespeicherte Menge von 167 kg N ha^{-1} im Aufwuchs. Das Ergebnis zeigt, dass gut etablierte Phacelia Stickstoffmengen aufnehmen kann, welche einen hohen Nmin zum Erntezeitpunkt im Boden und/oder Kulturen mit Stickstoffreichen Ernteresten über den Herbst ausgleichen können. Die tatsächliche Speicherung über den Winter und das Frühjahr wird weiterverfolgt. Im Februar 2024 wurde eine Erhebung der Pflanzenreste auf einer anderen Parzelle durchgeführt, deren Aufwuchs Ende 2023 ebenfalls gut gewesen sein soll.

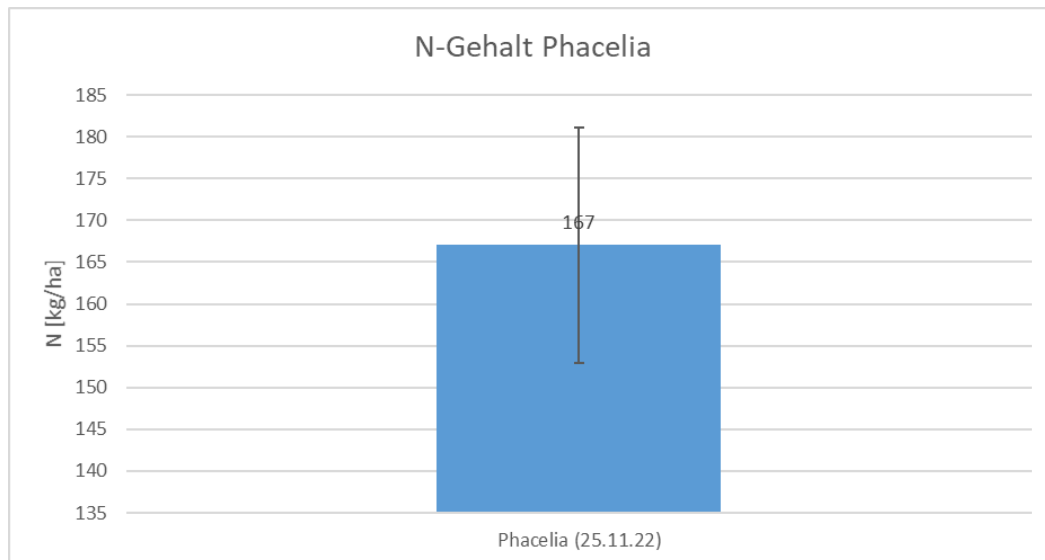


Abbildung 34: N-Gehalt im Aufwuchs einer gut etablierten Phacelia vor dem abfrieren (25.11.22).

4.7.2 Winter-Nmin 2023/2024

Im Februar/März 2024 wurde die im Herbst ausgefallene Nmin-Kampagne im Gemüsebau unter veränderter Fragestellung nachgeholt. Das Ziel der Beprobung war die Abschätzung des Hintergrund-Nmins in den Böden, nachdem infolge der starken Niederschläge ein möglicher Niedrigst-Wert in den Böden erreicht worden sein sollte.

Im Mittel über alle Flächen wurden 16 kg N/ha in den ersten 30cm gemessen und bis in 60cm Tiefe konnte ein Nmin von **27 kg N/ha** festgestellt werden. Gemessen wurden Werte zwischen 6 und 68 kg N/ha . Die beiden höchsten Werte mit über 50 kg N/ha wurden auf Flächen mit Ernteresten von Brokkoli und Wirs gemessen. Bei Leguminosenhaltigen Winterbegrünungen wurden im Verhältnis zum Mittelwert leicht erhöhte Nmin-Werte gemessen. Unterschiede zwischen den Düngevarianten konnten nicht mehr festgestellt werden.

Die niedrigen Nmin weisen auf hohe Auswaschungsverluste über den Winter hin. Genauere Aussagen können aufgrund der ausgefallenen Herbst-Nmin-Kampagne nicht getroffen werden. Auf einzelnen Parzellen könnte mit den Ergebnissen der zwischen Dezember und Februar gemessenen Auswaschungen mit SIA kombiniert mit Ernte-Nmin und Winter-Nmin der Stickstoffverbleib nachvollzogen werden. Die Ergebnisse der N-Winteraushwaschung liegen noch nicht vor.

4.7.3 2022: Düngung bei Eisbergsalat

Es war auffällig, dass die für das Gebiet als Kultur sehr wichtigen Eisbergsalate ein sehr niedriges Ernte-N : Dünger-N-Verhältnis hatten (Abbildung 34). Der erntebedingt höhere Anteil an Ernteresten (Eisberg 56 %; Frisée 30 %) konnte dies nur teilweise erklären.

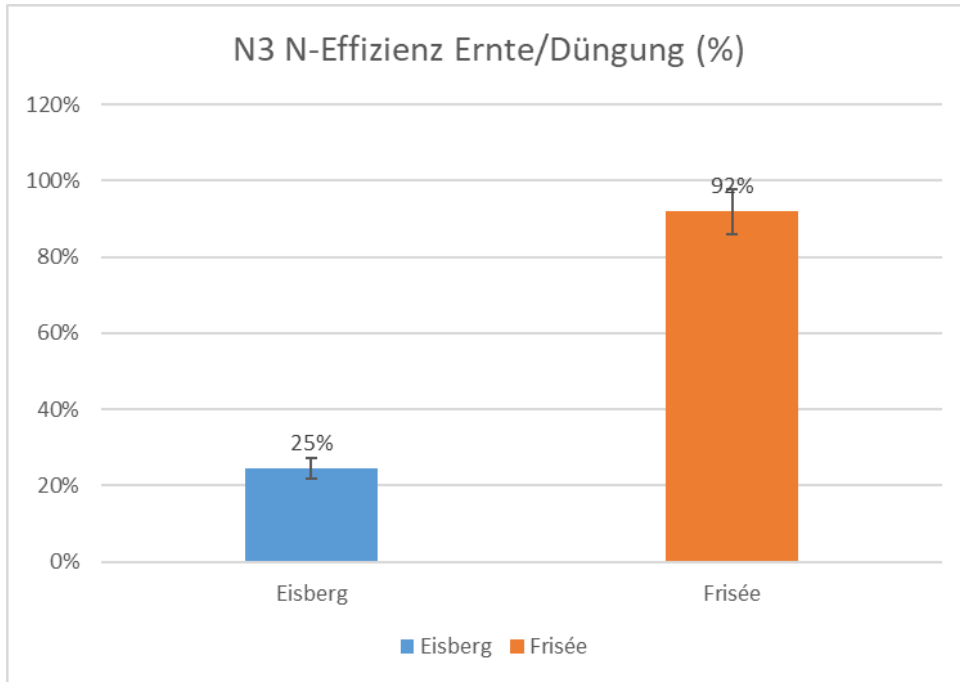


Abbildung 34: Vergleich der N-Ausnutzung von Eisbergsalat und Frisée (N Eisberg = 12; N Frisée = 4; Fehlerbalken = Standardfehler)

Einen genaueren Blick auf wichtige N-Bilanzglieder zeigt (Abbildung 35). Daraus geht hervor, dass Eisbergsalat im Schnitt höher gedüngt wurde.

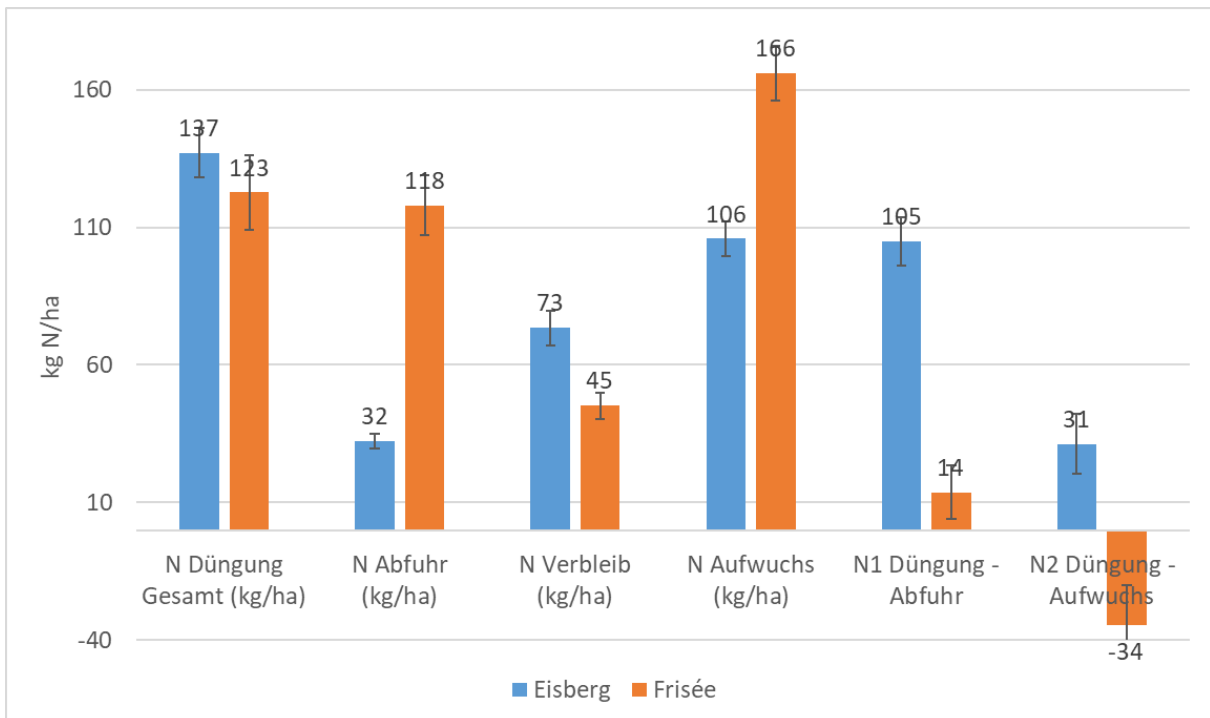


Abbildung 35: Vergleich der N-Ausnutzung von Eisbergsalat und Frisée (N Eisberg = 12; N Frisée = 4; Fehlerbalken = Standardfehler)

Dabei waren der Düngedarf im Aufwuchs um 60 kg N/ha und die Abfuhr von der Fläche gar um 86 kg N ha⁻¹ geringer als bei Frisée. Daraus lässt sich schliessen, dass die Düngung beim Eisbergsalat deutlich verringert werden kann. Selbst unter Vernachlässigung der Nachmineralisation kann die Düngung für eine ausgeglichene Bedarfsbilanz (N₂ Düngung – Aufwuchs) um 30 kg N ha⁻¹ niedriger angesetzt werden. Unter Berücksichtigung der Nachmineralisation z.B. mit N_{min} sollte eine Düngung < 100 kg N ha⁻¹ pro Kultur Eisbergsalat ausreichend sein. In einem Betrieb waren 180 kg N ha⁻¹ der Standard. Dieser wurde im Gespräch mit dem Produzenten nun deutlich nach unten korrigiert. Im Jahr 2023 waren zum ersten Satz Eissalat auf zwei unterschiedlichen Parzellen abhängig vom N_{min} 60 und 140 kg N/ha Düngung notwendig um einen ähnlichen Ertrag zu erzielen. Zum zweiten Satz Eissalat konnten mit 68 kg N-Dünger/ha hohe Erträge produziert werden.

Teil der gewünschten Ergebnisse im CriticalN sind genau solche relevanten Anpassungen für Kulturen mit schlechter N-Bilanz. An diesem Beispiel lässt sich auch dokumentieren, wie die einzelnen Bilanzglieder ineinandergreifen und interpretiert werden können, um bleibende Fortschritte bei der Anpassung von Düngemengen zu erzielen.

4.8 Aktuelle Schlussfolgerungen

4.8.1 Schlussfolgerungen 2022

Das eingeschränkte Jahr 2021 und das volle Versuchsjahr 2022 haben gezeigt, dass die Gemüseproduzenten mit den bisherigen Düngeempfehlungen unter Berücksichtigung des N_{min}-Gehaltes weder ein Qualitäts- noch ein Mengenproblem bei ihrer Ware bekommen.

Der N-Saldo (Düngung – Abfuhr) auf den bisherigen Praxisflächen ist mit einem Überschuss von 175 kg N ha⁻¹ im Jahr zu hoch für ein nitrat-sensitives Gebiet. Das Reduktionspotenzial ist mit aktuell 128 kg N ha⁻¹ Überschuss auf den grundwasserschonend bewirtschafteten Vergleichsflächen (u.a. Düngung nach N_{min}) noch nicht ausgeschöpft. Reserven liegen noch in der Anrechnung korrekter, höherer N_{min}-Werte im Boden sowie der Berücksichtigung von Ernteresten und Nachmineralisation aus dem Humus gerade für Kulturen im Hochsommer und 2. Sätze. N-Salden < 100 kg N ha⁻¹ oder niedriger im Gemüse sind unter Berücksichtigung dieser Faktoren sehr wahrscheinlich ohne Ertrags- und Qualitätseinbussen möglich.

Für die Auswaschungen liegen noch wenige Daten vor. Höhere N-Überschüsse wirken sich in der Vegetationsperiode in der Tendenz aber auch in höheren Auswaschungen aus. Über den Winter spielen wichtige Massnahmen wie die frühzeitige Begrünung offensichtlich eine grosse Rolle.

Am Beispiel der Eisbergsalat-Düngung lässt sich zeigen, dass die gewählte Methodik geeignet ist, über Effizienz-Parameter Probleme im N-Haushalt zu erkennen und über die Feldmessungen und Bilanzierungsansätze auch lösen zu können.

Der Austausch mit den Praxisbetrieben ist zeitintensiv, aber sehr lohnend, und verbessert beide Seiten, Wissenschaft und Praxis, in ihrem Systemverständnis.

4.8.2 Schlussfolgerungen 2023

Im Jahr 2023 haben sich die Gemüsebetriebe weiterhin zufrieden mit der Düngung nach N_{min} gezeigt. In der Gesamtbilanz zeigten sich wie in den Vorjahren keine Qualitäts- und Mengeneinbussen durch die angepasste Düngung.

Die Notwendigkeit der engen Zusammenarbeit mit den Betrieben hat sich 2023 deutlich am fehlenden Informationsaustausch mit einem Betrieb gezeigt. Mit den anderen Praxisbetrieben fand weiterhin ein guter Austausch statt mit wichtigen Erkenntnissen für alle Beteiligten.

Der N-Saldo als wichtiger Langfristindikator konnte durch die Bewirtschaftung nach N_{min} auf unter 100 kg N ha⁻¹ gesenkt werden und zeigt damit erste grössere Erfolge. Dennoch liegt angezeigt durch hohe N_{min}-Werte zum Erntezeitpunkt weiterhin ein grosses Dünge-Einsparungspotential vor. Die Einsparungen lassen sich voraussichtlich durch gezieltere Berücksichtigung der N-Mineralisation und der Erntereste der Vorkulturen in den späten Sommerkulturen erreichen.

Die Auswaschungen im Winter 2022/2023 und in der Vegetationsperiode 2023 zeigen die Wirkung von Winterbegrünungen. Während 2022/2023 die Flächen überwiegend begrünt waren, war dies im Herbst 2023 nicht der Fall. Die Auswaschungsmessungen der Vegetationsperiode bis in die ersten schweren Regen des Herbstes hinein zeigen mit durchschnittlich 223 kg N ha^{-1} (Nmin-Variante) bzw. 297 (Kontrolle) kg N ha^{-1} Auswaschung, dass hier weiter Handlungsbedarf besteht. Das Risiko für den Grundwasserschutz durch fehlende Begrünungen in Kombination mit sehr späten Ernten sollte durch angepasste Fruchtfolgeplanung reduziert werden. Die berechneten Werte für den Rest-N stützen das.

Die ersten hohen Werte zur Nitrat-Auswaschung zum Winter 2023/2024 und die verhinderte Nmin-Herbst-Kampagne weisen auf eine wiederkehrende klimatische Besonderheit im Gäu hin. Aufgrund von häufigen hohen Niederschlagssummen im Herbst und Winter sollten die Flächen mit Gründüngungen oder erst spät im Winter zu erntenden Kulturen bewachsen sein. Über den Winter stehende Kohlkulturen entziehen zum Beispiel dem Boden sehr effizient Stickstoff ohne grossen Düngebedarf.

Die N-Mineralisation konnte erstmalig während der Kulturen verfolgt und berechnet werden. Bei vielen Kulturen wurde während ihres Wachstums erhebliche Mengen von im Mittel etwa $1 \text{ kg N (ha*Tag)}^{-1}$ freigesetzt. Diese Ressource soll in den folgenden Jahren systematischer untersucht und genutzt werden.

4.9 Kooperation und Austausch

An der Wintertagung Gemüsebau am Inforama Ins am 16.01.2024 wurden die Ergebnisse des Gemüsebaus im Nitratprojekt Niederbipp – Gäu – Olten vor dem interessierten Fachpublikum, Schülern und Praktikern vorgetragen und durchaus kontrovers diskutiert.

Der Kanton Thurgau überlegt, ein beispielhaftes Nitratprojekt in einem Gebiet mit nennenswertem Gemüsebauanteil zu beantragen. Zur Vorabinformation wurden am 28.03.2024 sowohl das Nitratprojekt Niederbipp - Gäu - Olten als auch die Ergebnisse des Gemüsebaus im CriticalN eingehend vorgestellt und sehr positiv diskutiert.

In einem kooperativen Prozess zur Weiterentwicklung der Massnahmen im Gemüsebau für das Nitrat-Projekt in der nächsten Projektphase wurden die CriticalN-Daten als Grundlage für erreichbare Ziele im Gemüsebau genommen. Auch, wenn die Arbeiten noch nicht abgeschlossen sind, handelte es sich um die adäquateste auf Messwerten beruhende Untersuchung zu Nitratverlusten im Gemüsebau.

In Kooperation mit Agroscope wurde an Lysimeterversuchen zusätzliche Messungen zur Nitratdynamik durchgeführt. In einem nächsten Schritt wird geplant, mit Gemüse- und Ackerböden aus dem Gäu weitergehende Lysimetermessungen zu Nitratdynamik und Ertrag auf der Versuchstation Reckenholz durchzuführen. Hierzu laufen die logistischen Vorarbeiten.

Am 14.09.2023 wurde den interessierten Kollegen der Fachsektion Hydrogeologie der Grundwasserschutz im Gäu und speziell auch die Untersuchungsmethoden in der ungesättigten Zone vorgestellt, die als Inputgrössen für eine Grundwasserqualitätsbetrachtung unerlässlich sind.

4.10 Ausblick

4.10.1 Ausblick 2022

Grundsätzlich bewährt sich das Versuchskonzept. Es sollen durch einige Flächenumstellungen jedoch weniger beteiligte Betriebe noch intensiver begleitet werden und z.B. der Bio-Gemüsebau besser mit einbezogen werden. Hierzu wird gerade die Bereitschaft bei verschiedenen Beteiligten erfragt.

Beratung und wissenschaftliche Begleitung wollen, wenn es mit den Gemüseproduzenten umsetzbar ist, ab 2023 verstärkt das Problem der N-Mineralisierung angehen. Hierzu wurden die Produzenten angefragt, ob sie im Gemüsebau Nulldüngfenster auch schon im Frühjahr ermöglichen. Hier gibt es aktuell nur einen Produzenten, der dazu bereit ist. Des Weiteren sollen im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung Mesokosmen mit 4 verschiedenen Böden aus dem Nitratperimeter aufgebaut und regelmässig auf Nitrat im Sickerwasser untersucht werden. Die vorhandenen, guten Datensätze werden zum Eignungstest von ein bis drei N-Mineralisierungsmodellen benutzt. Sollte sich eines der Modelle bewähren, könnte es einen verbesserten Schätzrahmen sowohl in Kombination mit Nmin als auch zu Fragen der organischen Düngung, z.B. im Bio-Gemüsebau abgeben.

Es wurde im Berichtszeitraum in mehreren Treffen der Austausch mit anderen Fachgruppen angestossen. Aus diesem fachlichen Austausch soll auch ein Mehrwert für die Beteiligten entstehen:

Mit dem Ressourcenschutzprojekt Humus im Kanton Solothurn wird angestrebt, Landwirten eine gemeinsame Veranstaltung anzubieten. Darin sollen die Wechselwirkungen zwischen Humus(aufbau) und N-Speicherung / N-Mineralisation verständlich erklärt und mögliche Zielkonflikte angesprochen werden. Ziel ist es, das Boden-Systemverständnis der Landwirtschaft auf greifbarer Ebene zu fördern.

Im Fachaustausch unter Projektleitenden aus Forschung und Beratung zum Thema «Effizienter N-Einsatz dank digitalen Technologien» gab es Anknüpfungspunkte in den Bereichen Ertragsserhebung, N-Modellierung mit KI und Drohnenbilder als Messtechnik. Hier kann das Projekt CriticalN Raum zur Erprobung innovativer Technologien geben, wertvolle Datensätze als «ground truth» zur Validierung der Technologien bereitstellen und so die vorhandene wissenschaftliche Infrastruktur zusätzlich für andere Gruppen nutzbar machen.

Mit der recht neuen Agroscope-Versuchsstation zum Gemüsebau am Standort Ins, in Person Michael Gugger, wurde ebenfalls eine Zusammenarbeit vereinbart, die auf den Daten aus CriticalN aufbauen soll.

4.10.2 Ausblick 2023

Das in den Jahren 2021 bis 2023 etablierte Versuchskonzept soll in seinen wesentlichen Bestandteilen 2024 fortgeführt werden. Es gibt weiterhin das Ziel, mehr Flächen in die Bewirtschaftung nach Betriebsindividuellen Massnahmen im Gemüsebau (BIM-Verträge) aufzunehmen. Ein Betrieb hat bereits angekündigt einen Grossteil seiner Flächen neu aufzunehmen. Intensiv begleitet werden sollen bei allen Gemüsebauern nur einzelne Flächen, auf denen detaillierte N-Bilanzen erstellt werden. Bei den weiteren Flächen findet Beratung zur angepassten Düngung nach Nmin statt und es werden einzelne Ernteerhebungen zur Erfolgskontrolle durchgeführt. Generell wichtig ist die Erweiterung der Datengrundlage durch Ernteerhebungen und N-Bilanzen, um den lokalen tatsächlichen Kulturaufwuchs mit der GRUD vergleichen zu können, mit dem Ziel die Düngung ertragsspezifisch anpassen zu können. Getestet werden sollen auch angepasste Kulturfolgen, um den Stickstoff aus kulturspezifisch hohen Ernteresten durch Folgekulturen aufnehmen zu können.

Die N-Mineralisierung muss verstärkt weiter untersucht werden. Geplant sind umfassende Untersuchungen mit Nulldüngfenstern. Wie im Jahr 2023 sollen erste und zweite Salatsätze ohne Düngung untersucht werden. Ein weiterer Betrieb ist bereit, Nulldüngung ab der Kopfdüngung zu testen.

In den Gesprächen mit den Gemüsebauern, hat sich das Vertrauen in die Düngung nach Nmin gezeigt und es wurde Potential für eine weitere Düngereduktion geäussert. In der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode 2024 sollen angepasste Düngeempfehlungen unter Berücksichtigung von Vorkultur, erwarteter Mineralisation und Nmin in Absprache mit den Betrieben getestet werden. Dies könnte eine deutliche Düngereduktion bei späten Sätzen bedeuten.

Weiterhin wird die Bodenbearbeitung vor und während der Kulturen dokumentiert, um später die Wirkung auf die N-Mineralisation nachvollziehen zu können. Auch der Effekt von geringen Düngegaben im Vergleich zu Düngeverzicht bei der Kopfdüngung sollte in Bezug auf die N-Freisetzung beobachtet werden. Nach Möglichkeit werden weitere Untersuchungen zur Wirkung unterschiedlicher Winterbegrünung und der Effekt nicht umgebrochener Flächen mit Ernteresten unter Berücksichtigung des Boden-Nmins im Winter durchgeführt.

Das Planungsfenster für die Herbst-Nmin-Kampagne ist nun für 2024 festgelegt. Die Planung soll früher erfolgen. Gleichzeitig soll eine zuverlässige Vertretung für den Probennehmer organisiert werden, um Beprobungsausfälle zu verhindern. Der oder die Probennehmer sollen nochmals geschult werden, um eine korrekte, repräsentative Beprobung der Parzellen sicherzustellen.

Die später erfolgte Winter-Nmin-Kampagne konnte die N-Speicherentleerung durch die Niederschläge aufzeigen. Im Frühjahr 2024 kann in deren Folge nur mit geringen Abzügen durch Nmin in den Düngeempfehlungen gerechnet werden. Inwieweit sich das unter anderen Bedingungen verhält, sollte auch im Frühjahr 2025 untersucht werden.

5 Literaturverzeichnis

- AfU Solothurn. 2022.** Das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten - Amt für Umwelt - Kanton Solothurn. (<https://so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/wasser/grundwasser/schutz/das-nitratprojekt-niederbipp-gaeu-olten/>)
- AfU Solothurn, Fachbereich Hydrometrie. 2023.** Hydrometrie - Daten - Umweltdaten - Kanton Solothurn. (<https://so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/umweltdaten/wasser/hydrometrie/daten/>)
- Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. 2018.** Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage, Berlin; [Heidelberg]: Springer Spektrum.
- Bischoff, W.-A. 2009.** Development and Applications of the Self-Integrating Accumulators: A Method to Quantify the Leaching Losses of Environmentally relevant Substances. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 91, Herausgeber: Kandeler, E.; Kuzyakov, Y.; Stahr, K.; Streck, T.; Kaupenjohann, M., Universität Hohenheim, Stuttgart. 145 S.
- Bürge, D. und Agroscope. 2020.** Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. Version 1.2. Agroscope Reckenholz, Zurich (Switzerland).
- Feller, C.; Fink M.; Laber, H.; Maync, A.; Paschold, P.; Scharpf, H.C.; Schlaghecken, J.; Strohmeyer, K.; Weier, U.; Ziegler, J. 2011.** Düngung im Freilandgemüsebau. In: Fink, M. (Hrsg.): Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), 3. Auflage, Heft 4, Großbeeren.
- Neuweiler & Krauss. 2017** , Kap. 10 in: Sinaj, S., Richner, W. 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).
- Sinaj, S., Richner, W. 2017.** Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).

6 Anhang

6.1 Datentabellen

6.1.1 Datentabelle 2021

Tabelle 12: Erhobene Daten 2021

Ernte-Datum	Parzelle	Kultur	Variante	Masse Ernte [dt ha ⁻¹]	Masse Aufwuchs [dt ha ⁻¹]	N-Sickerung Nach-Vegetation [kg/ha]	marktfähig [Stück/Stück ges.]	Biomasse [%] Abfuhr	N Düngung [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr/ Ernte [kg ha ⁻¹]	N Ernterest [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1: Düngung - Abfuhr	N2: Düngung - Aufwuchs	N3: N-Effizienz Ernte /Düngung [%]	N4: Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Bemerkung
25.06.21	Muermatten Süd	Eisberg-salat	Nmin	233	430	38	78%	54%	245	25	41	41	66	219	179	10%	n.b.	20	6	
25.06.21	Muermatten Süd	Eisberg-salat	Kontrolle	268	449	33	78%	60%	208	29	37	37	66	179	141	14%	n.b.	n.b.	4	
01.07.21	Dich oben	Frisée	Nmin	331	450	n.b.	98%	73%	126	57	21	21	78	69	48	45%	n.b.	n.b.	47	
01.07.21	Dich oben	Frisée	Kontrolle	453	584	n.b.	98%	78%	186	79	21	21	100	107	86	42%	n.b.		39	
14.09.21	Dich oben	Eisberg-salat	Nmin	251	396	n.b.	94%	63%	103	25	30	30	55	78	47	24%	213	183	47	Nach Ernte wurde hier
14.09.21	Dich oben	Eisberg-salat	Kontrolle	188	341	n.b.	81%	55%	135	19	31	31	50	116	85	14%	203	172	39	W-Weizen gesät
18.10.21	Bahnwärterhaus	Lauch	Nmin	297	498	121	95%	60%	237	50	44	44	94	187	143	21%	73	29	6	Beide Varianten
18.10.21	Bahnwärterhaus	Lauch	Kontrolle	262	426	112	96%	61%	237	56	40	40	95	181	142	23%	96	56	51	wurden gleich gedüngt

6.1.2 Datentabelle 2022

Tabelle 13: Erhobene Daten 2022

Betrieb	Parzelle	Variante	Kultur	Start	Ernte	Masse Erntegut [dt ha ⁻¹]	Masse Ernterest [dt ha ⁻¹]	Marktfähigkeit	Aufwuchs [dt/ha]	Biomasse Abfuhr [%]	N Düngung Gesamt [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1 Düngung - Abfuhr	N2 Düngung - Aufwuchs	N3 N-Effizienz Ernte/Düngung [%]	N4 Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin zum Start 0-60 [kg/ha]	Netto Mineralisation [kgN/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-30cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]
Bobst	10	Nmin	Zwiebel	30.09.21	01.06.22	536	170	99%	707	76%	114	59	45	104	55	10	52%						
Bösiger	Aebisholz	Kontrolle	Eissalat	28.03.22	31.05.22	181	450	67%	631	29%	120	24	102	126	96	-6	20%						
Bösiger	Aebisholz	Nmin	Eissalat	28.03.22	31.05.22	204	436	64%	641	32%	96	24	70	94	72	2	25%						
Bösiger	Aebisholz	Nmin	Kopfsalat	04.07.22	09.08.22	275	110	82%	385	71%	110	67	27	94	43	16	61%	233	170	20	46	107	206
Bösiger	Aebisholz	Monitoring	Zucchetti	04.07.22	10.10.22	696	289	99%	985	71%	104	157	147	303	-53	-199	151%	355			76	112	208
Bösiger	Bahnwärterhaus	Kontrolle	Brokkoli	25.04.22	07.07.22	180	610	98%	790	23%	174	66	188	254	108	-80	38%						
Bösiger	Bahnwärterhaus	Nmin	Brokkoli	25.04.22	07.07.22	164	620	93%	784	21%	168	56	168	224	111	-56	34%						
Müller	Dich oben	Kontrolle	Eissalat	29.03.22	31.05.22	326	240	91%	566	58%	180	40	59	98	140	82	22%						
Müller	Dich oben	Nmin	Eissalat	29.03.22	31.05.22	293	227	95%	520	56%	150	34	50	84	116	66	23%						
Müller	Dich oben	Kontrolle	Endivie Frisée	27.06.22	10.08.22	288	142	93%	430	67%	122	119	59	178	3	-56	98%	211	158	50	74	94	152

Betrieb	Parzelle	Variante	Kultur	Start	Ernte	Masse Erntegut [dt ha ⁻¹]	Masse Ernterest [dt ha ⁻¹]	Marktfähigkeit	Aufwuchs [dt/ha]	Biomasse Abfuhr [%]	N Düngung Gesamt [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1 Düngung - Abfuhr	N2 Düngung - Aufwuchs	N3 N-Effizienz Ernte/Düngung [%]	N4 Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin zum Start 0-60 [kg/ha]	Netto Mineralisation [kgN/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-30cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]
Müller	Dich oben	Nmin	Endivie Frisée	27.06.22	10.08.22	301	125	94%	426	71%	93	99	55	154	-6	-61	106%	210	133	82	25	88	155
Müller	Dich oben	Nmin	Endivie	27.06.22	10.08.22	335	123	93%	458	73%	115	114	43	157	1	-42	99%	161	133	26	23	35	118
Müller	Dich Unten	Kontrolle	Eissalat	28.03.22	30.05.22	310	292	83%	601	51%	180	36	72	109	144	71	20%						
Müller	Dich Unten	Nmin	Eissalat	28.03.22	30.05.22	335	288	88%	623	54%	119	37	64	101	82	18	31%						
Müller	Dich Unten	Kontrolle	Eissalat	27.06.22	16.08.22	179	480	69%	659	27%	153	27	120	147	126	6	18%	318	203	-11	69	108	198
Müller	Dich Unten	Nmin	Eissalat	27.06.22	16.08.22	218	446	76%	664	33%	113	33	102	134	80	-21	29%	277	169	27	32	66	175
Müller	Dich Unten	Null	Eissalat	27.06.22	16.08.22	204	461	74%	665	31%	0	28	99	128	-28	-128		266	203	91	91	114	167
Müller	Muer-matten Süd	Nmin	Randen	19.05.22	06.09.22	540	400	62%	940	57%	155	151	123	274	4	-119	97%	237	103	130	45	69	113
Bösiger	Oensingener	Nmin	Kopfsalat	11.05.22	27.06.22	343	39	99%	382	90%	97	66	5	71	31	26	68%						
Müller	Rickenbach	Kontrolle	Eissalat	14.04.22	14.06.22	223	327	73%	550	41%	180	31	66	97	149	83	17%						
Müller	Rickenbach	Nmin	Eissalat	14.04.22	14.06.22	151	363	61%	513	29%	117	16	54	70	101	47	13%						
Müller	Rickenbach	Kontrolle	Endivie Frisée	21.07.22	07.09.22	464	267	96%	731	63%	108	77	46	123	31	-15	71%	154	182	-60	40	73	107
Müller	Rickenbach	Nmin	Endivie Frisée	21.07.22	07.09.22	435	288	92%	723	60%	101	76	44	121	25	-20	76%	198	182	-8	51	93	154
Müller	Rickenbach	Null	Endivie Frisée	21.07.22	07.09.22	363	187	96%	550	66%		54	27	81				95	182	-33	19	47	68

6.1.3 Datentabelle 2023

Tabelle 14: Erhobene Daten 2023

Betrieb	Parzelle	Variante	Kultur	Start	Ernte	Masse Erntegut [dt ha ⁻¹]	Masse Ernterest [dt ha ⁻¹]	Marktfähigkeit [%]	Aufwuchs [dt/ha]	Biomasse Abfuhr [%]	N Düngung Gesamt [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1 Düngung - Abfuhr	N2 Düngung - Aufwuchs	N3 N-Effizienz Ernte/Düngung [%]	N4 Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin zum Start 0-60 [kg/ha]	Netto Mineralisation [kgN/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-30cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]
Bösiger	Aebisholz	Kontrolle	Lauch	09.06.2023	17.11.2023	480	101	100%	581	83%	174	114	42	156	60	18	65%	125	21	43	19	48	83
Bösiger	Aebisholz	Nmin	Lauch	09.06.2023	17.11.2023	436	95	99%	531	82%	132	83	38	121	49	11	63%	121	22	51	26	50	84
Bio Rotb.	Tela	Kontrolle	Sellerie	28.06.2023	16.11.2023	541	149	100%	690	78%		85	19	104				30	73		3	8	11
Bio Rotb.	Tela	Nmin	Sellerie	28.06.2023	16.11.2023	666	261	100%	927	72%		117	39	156				51	132		3	9	12
Bio Rotb.	Matte	Nmin	Chicorino rosso	31.07.2023	16.11.2023	284	240	77%	524	54%		43	32	75				84	73		18	33	52
Bio Rotb.	Matte	Nmin	Zuckerhut	31.07.2023	15.11.2023	874	146	100%	1021	86%		102	18	120				81	73		20	41	63
Müller	Dich Unten	Kontrolle	Endivie	23.08.2023	23.10.2023	297	159	92%	456	65%	135	48	26	74	87	61	36%	349	145	117	182	225	323
Müller	Dich Unten	Nmin	Endivie	23.08.2023	23.10.2023	432	162	100%	594	73%	116	75	28	103	41	13	65%	141	111	-11	38	56	113
Müller	Dich Unten	Null	Endivie	23.08.2023	23.10.2023	382	163	98%	545	70%	0	58	24	81	-58	-81	0%	94	129	23	12	22	70
Müller	Dich Unten	Null2	Endivie	23.08.2023	23.10.2023	415	172	96%	587	71%	0	70	28	98	-70	-98	0%	95	77	88	20	32	68

Betrieb	Parzelle	Variante	Kultur	Start	Ernte	Masse Erntegut [dt ha ⁻¹]	Masse Ernterest [dt ha ⁻¹]	Marktfähigkeit [%]	Aufwuchs [dt/ha]	Biomasse Abfuhr [%]	N Düngung Gesamt [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1 Düngung - Abfuhr	N2 Düngung - Aufwuchs	N3 N-Effizienz Ernte/Düngung [%]	N4 Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin zum Start 0-60 [kg/ha]	Netto Mineralisation [kgN/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-30cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]
Bösiger	Bahnwärterhaus	Kontrolle	Sellerie	25.05.2023	17.10.2023	125	54	94%	179	70%	212	37	25	61	175	151	17%	132	11	-54	42	65	108
Bösiger	Bahnwärterhaus	Nmin	Sellerie	25.05.2023	17.10.2023	219	83	91%	301	73%	230	64	35	99	166	131	28%	150	11	-27	40	63	114
Bösiger	3/4/5	Nmin	Brokkoli	20.07.2023	04.10.2023	203	430	97%	633	32%	187	95	190	285	92	-98	51%	286	44	149	30	59	95
Bösiger	1/2	Nmin	Romanesco	05.07.2023	28.09.2023	237	778	87%	1015	23%	133	98	273	371	35	-238	74%	357	126	195	25	44	83
Bösiger	Kestenholz	Nmin	Eissalat	11.08.2023	28.09.2023	265	379	84%	644	41%	68	34	84	118	34	-50	50%	293	204	55	48	78	209
Müller	Muermatten Süd	Kontrolle	Kabis (weiss)	06.05.2023	18.08.2023	1285	321	100%	1606	59%	256	241	77	318	96	-62	63%	207	47	65	12	21	49
Müller	Muermatten Süd	Nmin	Kabis (weiss)	06.05.2023	18.08.2023	1308	327	92%	1635	57%	256	275	93	368	88	-112	66%	351	49	214	53	65	152
Bösiger	Oensing	Nmin	Brokkoli	19.05.2023	02.08.2023	82	544	80%	626	13%	179	39	198	237	140	-58	22%	288	46	103	36	56	90
Bobst	Aebisholz	Nmin	Grössere Steckzwiebe	06.03.2023	11.07.2023	425	226	90%	652	65%	43	63	56	120	-20	-77	147%	124	42	147	17	33	68
Bösiger	Kestenholz	Nmin	Eissalat	05.06.2023	11.07.2023	184	336	73%	520	35%	60	27	74	102	33	-42	46%	496	116	156	131	170	421
Müller	Dich oben	Kontrolle	Eissalat	05.05.2023	28.06.2023	226	300	82%	526	43%	141	27	72	99	114	42	19%	186	77	-5	47	60	114

Betrieb	Parzelle	Variante	Kultur	Start	Ernte	Masse Erntegut [dt ha ⁻¹]	Masse Ernterest [dt ha ⁻¹]	Marktfähigkeit [%]	Aufwuchs [dt/ha]	Biomasse Abfuhr [%]	N Düngung Gesamt [kg ha ⁻¹]	N Abfuhr [kg ha ⁻¹]	N Verbleib [kg ha ⁻¹]	N Aufwuchs [kg ha ⁻¹]	N1 Düngung - Abfuhr	N2 Düngung - Aufwuchs	N3 N-Effizienz Ernte/Düngung [%]	N4 Nmin + N Verbleib nach Ernte	Nmin zum Start 0-60 [kg/ha]	Netto Mineralisation [kgN/ha]	Nmin nach Ernte 0-15cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-30cm [kg/ha]	Nmin nach Ernte 0-60cm [kg/ha]
Müller	Dich oben	Nmin	Eissalat	05.05.2023	28.06.2023	275	298	85%	572	48%	141	31	63	95	110	46	22%	154	29	16	29	44	91
Müller	Dich oben	Null	Eissalat	05.05.2023	28.06.2023	0	130	0%	130	0%	0	23	23					75		8	11	23	52
Bio Rotb.	Tela	Kontrolle	Salate	10.05.2023	28.06.2023	0	169	0%	169	0%	50		15					70	42		13	29	55
Bio Rotb.	Tela	Nmin	Salate	10.05.2023	28.06.2023	0	175	0%	175	0%	50		25					160	46		50	71	135
Müller	Dich Unten	Kontrolle	Kopfsalat	19.05.2023	27.06.2023	288	66	90%	354	81%	98	49	12	61	49	37	50%	195	85	62	65	85	183
Müller	Dich Unten	Nmin	Kopfsalat	19.05.2023	27.06.2023	320	74	88%	394	81%	98	51	14	65	46	32	53%	167	51	70	59	82	153
Müller	Dich Unten	Null	Kopfsalat	19.05.2023	27.06.2023	161	53	74%	215	75%	0	24	10	34	-24	-34	0%	76			21	36	66
Bobst	Aebisholz	Nmin	Steckzwiebe	06.03.2023	27.06.2023	380	268	97%	648	59%	43	43	58	100	0	-57	99%	134	42	99	17	40	77
Bobst	1/2	Nmin	Zwiebel	06.03.2023	05.06.2023	344	35	98%	379	91%	21	56	21	77	-35	-56	267%	137	180	91	30	67	117
Bio Rotb.	Tela	Kontrolle	Lauch	04.07.2022	17.02.2023	201	123	86%	324	62%		69	40	109				88	145		19	35	48
Bio Rotb.	Tela	Nmin	Lauch	04.07.2022	17.02.2023	224	102	92%	325	69%		78	34	111				76	112		21	34	42
Bösiger	10/11	Nmin	Wirz	07.07.2022	08.02.2023	371	276	88%	647	57%	59	169	177	347	-110	-288	287%	288	245	153	35	61	110

6.2 N-Bilanz Nulldüngerversuche

Tabelle 16: Messdaten und Indikatoren auf der Fläche Dich oben, Eisbergsalat, 1. Satz, 13.05.-28.06.2023

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Kontrolle	Null 1
N _{min} Start _{0-60cm}	29	77	-
Dünger-N	141	141	0
Nmin Ernte 0-60cm	91	114	52
Erntereste	63	72	23
Output [kg N/ha]			
Feldabfuhr = Ernte	31	27	0
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	110	114	0
Rest-N = Nmin + Ernterest	154	186	75
Netto-N-Mineralisation/Kultur	16	-5	8

*Tabelle 15: Messdaten und Indikatoren auf der Fläche Dich unten, Kopfsalat, 1. Satz, 19.05.-27.06.2023 (*Netto-N-Mineralisation mit Nmin zur Kopfdüngung berechnet)*

Zur Verfügung [kg N/ha]	Nmin	Kontrolle	Null 1
N _{min} Start _{0-60cm}	51	85	-
Dünger-N	98	98	0
Nmin Ernte 0-60cm	153	183	66
Erntereste	14	12	10
Output [kg N/ha]			
Feldabfuhr = Ernte	51	49	24
N-Saldo = Dünger – Abfuhr	46	49	-24
Rest-N = Nmin + Ernterest	167	195	76
Netto-N-Mineralisation/Kultur	70	62	13*