

Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser (NitroGäu)

Synthese zu TP 2: Gemüsebau

Projektdauer: 2017 – 2021
Bericht vom 10.06.2022



Bearbeitung: Wolf-Anno Bischoff (TerraQuat) www.terraquat.com
Ernst Spiess (Agroscope) www.agroscope.ch
Frank Liebisch (Agroscope)

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	3
2	Fachliche Synthese (Technical Summary).....	4
2.1	Problematik und Fragestellung.....	4
2.2	Methoden	4
2.3	Wichtigste Ergebnisse und Schlussfolgerungen	4
2.4	Ausblick	6
2.5	Handlungsoptionen	6
3	Ausführliche Zusammenfassung der Einzelberichte TP 2.1.....	7
3.1	Literaturstudie und Bewertungssystem	7
3.2	Lysimeterversuch.....	11
4	Zusammenfassung TP 2.2: Erfassung und Verminderung der N-Verluste im Gemüsebau in der Region Niederbipp – Gäu – Olten.....	14
5	Dank.....	19
6	Literatur	20
7	Anhang: Massnahmen-Steckbriefe.....	22
7.1.1	Steckbrief: Angepasste Düngung nach N _{min} -Methode	22
7.1.2	Steckbrief: Winterbegrünung/Zwischenfrucht	23
7.1.3	Steckbrief: Berücksichtigung organischer Reststoffe und Hofabfälle in der N-Bilanz ..	25

1 Executive Summary

Bisher konnte der Gemüsebau nicht durch Verträge in das Nitrat-Projekt Niederbipp-Gäu-Olten nach Art. 62a eingebunden werden. Hierzu sollten durch das Arbeitspaket 2 *Gemüsebau* innerhalb des begleitenden *Forschungsprojekts NitroGäu* (seit 2017) zunächst wichtige Wissenslücken geschlossen werden. Dafür kamen neben einer Literaturrecherche auch Modellberechnungen, Lysimeterexperimente und praxisbegleitende Erhebungen in der Nitratprojekt-Region zum Einsatz.

Im Lysimeterversuch zeigte sich, dass unter Feldgemüse grosse Stickstoff(N)-Mengen als Folge der hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ausgewaschen werden können. Im Mittel über alle Lysimeter und Jahre lag die Nitratkonzentration des Sickerwassers mit $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ weit über dem Anforderungswert für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist. Die im Nitrat-Projekt Niederbipp-Gäu-Olten beobachtete übliche Gemüsebau-Praxis zeigte 2018 und 2019 jährliche Auswaschungen von im Mittel $271 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Als Nitratkonzentration entspricht das ca. $270 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ im Sickerwasser. Die heute übliche Praxis des Gemüsebaus in diesem problematischen Gebiet mit seinen naturräumlichen Gegebenheiten ist also nicht ausreichend für den Schutz des Grundwassers im Perimeter. Es bedarf einer Reduktion der N-Überschüsse im Gemüsebau auf ein für das Grundwasser im Zuströmbereich verträglicheres Mass.

Es wurde ein neues Bewertungssystem entwickelt, welches wichtige Treiber bzw. Reduktionsmassnahmen der Nitratauswaschung erfasst. Berücksichtigt werden N-Düngungsbedarf, N-Mengen in den Ernterückständen, Wurzeltiefe und Gründüngung. Damit eignet sich die Bewertung besonders für die Beratung, wenn nur wenig Vorinformationen zur Verfügung stehen.

Die Nitratauswaschung lässt sich mit folgenden Massnahmen reduzieren:

- Verbesserte Ermittlung des N-Düngungsbedarfs (z.B. mit N_{\min} -Methode) inklusive der Berücksichtigung von Vorkulturen und Ernterückständen
- Steuerung der Bewässerung (z.B. mit Bodenfeuchtesensoren)
- Anbau von Gründüngungen
- Konsequentes Anwenden der GRUD. Obwohl die aktuellen Werte der GRUD zum N-Düngungsbedarf und zur N-Menge in den Ernterückständen von Feldgemüse, sowie die Berücksichtigung von organischen Düngern aktualisiert und ergänzt werden sollten, ist durch eine konsequente Anwendung der aktuell empfohlenen Düngepraxis der GRUD schon eine deutliche Verbesserung gegenüber der heutigen Situation zu erwarten.

Die ersten Praxistests im Nitratprojekt haben gezeigt, dass mit bekannten Methoden sehr viel Dünger eingespart werden könnte. Es ist möglich, gleichzeitig N-Auswaschung zu reduzieren und qualitativ hochwertiges Gemüse mit üblichem Ertrag zu produzieren. Dazu müssen verschiedene Massnahmen flächendeckend umgesetzt und eine zweckmässige Infrastruktur aufgebaut werden, insbesondere für die Anrechnung von N_{\min} und den Datenaustausch zur Düngeempfehlung.

Die Handlungsmöglichkeiten und Massnahmen werden im Bericht ausführlich beschrieben. Einige davon wurden im Rahmen der Ergebnispräsentationen auch mit Praktikern besprochen und werden von diesen unterstützt. Im Projekt Critical-N als Nachfolgeprojekt von NitroGäu werden die vielversprechendsten Massnahmen nun durch betriebsbegleitende Forschung eingehend geprüft.

2 Fachliche Synthese (Technical Summary)

2.1 Problematik und Fragestellung

Bisher konnte der Gemüsebau nicht in der Beratung und durch Verträge in das Nitrat-Projekt Niederbipp-Gäu-Olten nach Art. 62a eingeschlossen werden. Hierzu sollten durch das Arbeitspaket 2: Gemüsebau innerhalb des begleitenden *Forschungsprojekts NitroGäu* (seit 2017) zunächst wichtige Wissenslücken geschlossen werden:

2.2 Methoden

Zur Erfassung des vorhandenen Wissens und der Konzepte zur N-Reduktion wurde eine ausführliche Literaturstudie angefertigt und daraus ein qualitatives Bewertungssystem entwickelt. In einem Lysimeterversuch auf der Versuchsstation Reckenholz wurden unter kontrollierten Bedingungen 6 Gemüsekulturen in einer Fruchtfolge über 3 Jahre nach guter fachlicher Praxis auf 2 Böden angebaut und hierzu N-Bilanzen erstellt. In Feldversuchen auf insgesamt 13 Flächen von Praxisbetrieben mit 10 verschiedenen Kulturen und 20 Ernten im Nitrat-Projektgebiet wurden ebenfalls parzellenscharfe N-Bilanzen erstellt. In einem kleineren Rahmen wurden auf 4 Flächen mit 6 verschiedenen Kulturen und 6 Ernten auch Vergleiche zwischen aktueller Praxis und Optionen zur Verbesserung der N-Bilanz, insbesondere Anrechnung von N_{\min} , gemacht. Auch hier wurden sowohl die N-Bilanzen als auch Marktqualität und Ertrag erhoben.

Details zu den dabei verwendeten Methoden und Herangehensweisen finden sich in diesem Dokument (Abschnitt 3 folgend) und in den spezifischen Berichten zu den Teilprojekten TP 2.1 (Spiess *et al.* 2021a, b, 2022, Zemek *et al.* 2020a, b) und TP 2.2 (Bischoff *et al.* 2021).

2.3 Wichtigste Ergebnisse und Schlussfolgerungen

TP 2.1a Literaturstudie und Bewertungssystem

Ein neues Bewertungssystem, das mit dem N-Düngungsbedarf, den N-Mengen in den Ernterückständen, der Wurzeltiefe sowie der Gründüngung wichtige Treiber bzw. Reduktionsmassnahmen der Nitratauswaschung erfasst, wurde entwickelt. Es erlaubt eine qualitative Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials, indem es Hinweise gibt, bei welchen Kulturfolgen mit hohen bzw. niedrigen Auswaschungsverlusten zu rechnen ist. Das Bewertungssystem erlaubt aber keine Quantifizierung dieser Verluste. Deshalb eignet es sich besonders für die Beratung von Gemüsebaubetrieben und weniger für den Vollzug von Massnahmen in einem Nitratprojekt.

Die Nitratauswaschung lässt sich mit einer verbesserten Ermittlung des N-Düngungsbedarfs (z.B. mit N_{\min} -Methode), einer Steuerung der Bewässerung (z.B. mit Bodenfeuchtesensoren) sowie dem Anbau von Gründüngungen reduzieren. Die Werte der GRUD zum N-Düngungsbedarf und zur N-Menge in den Ernterückständen von Feldgemüse bedürfen einer Überarbeitung. Bei den organischen Düngern sollte nicht nur der kurz- und mittelfristig verfügbare Stickstoff berücksichtigt werden, sondern auch derjenige Teil des organischen Stickstoffs, der erst nach vielen Jahren oder Jahrzehnten mineralisiert wird.

TP 2.1b Lysimeterversuch

Im Lysimeterversuch zeigte sich, dass unter Feldgemüse grosse N-Mengen als Folge der hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ausgewaschen werden können. Im Mittel über alle Lysimeter

und Jahre lag die Nitratkonzentration des Sickerwassers mit $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ weit über dem Anforderungswert für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist. Wenn die Ernterückstände abgeführt und nicht wie Praxis-üblich auf dem Feld belassen wurden, hatte dies keine Auswirkungen auf den marktfähigen Ertrag und die Sickerwassermenge; die Auswaschung konnte jedoch dank der niedrigeren Nitratkonzentrationen reduziert werden. Auffallend war, dass der Saldo der Nährstoffbilanz bei Belassen der Ernterückstände um $146 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ höher ausfiel als bei Abfuhr. Die um $18 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ erhöhte Nitrat auswaschung erklärt somit nur einen kleinen Teil der Differenz im Bilanzsaldo. Offen bleibt, welche N-Menge während der Versuchsperiode in gasförmiger Form verloren ging und welche im Humus angereichert wurde. Eine Anreicherung im Humus könnte zukünftig zu leicht höheren Erträgen und N-Wegfuhren über die geernteten Produkte führen, dürfte aber über die nächsten Jahre und Jahrzehnte vor allem mit höheren N-Verlusten in die Luft und besonders ins Wasser verbunden sein. Angesichts der teilweise sehr hohen N-Mengen im zurückbleibenden Pflanzenmaterial sollte der Umgang mit den Ernterückständen verbessert werden. Praxistaugliche Methoden zur Abfuhr und Weiterverwertung der Rückstände bzw. zur Steigerung der N-Ausnutzung von auf dem Feld belassenem Pflanzenmaterial sind zu entwickeln.

TP 2.2 Praxisversuche im Projektgebiet

Die übliche Gemüsebau-Praxis auf dem jetzigen Stand ist aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten nicht ausreichend für den Schutz des Grundwassers im Perimeter des Nitrat-Projekts Niederbipp-Gäu-Olten. Die aktuellen jährlichen Auswaschungen 2018 und 2019 sind mit im Mittel 271 kg N/ha (ca. 270 mg Nitrat/L) zu hoch. In diesem problematischen Gebiet bedarf es einer Reduktion der N-Überschüsse auf ein verträglicheres Mass für das Grundwasser.

Die grossen labilen N-Reserven aus Ernteresten und Bodenspeicher (Vorräte meist $> 10'000 \text{ kg N/ha}$, labiler Pool ca. 450 kg N/ha) müssen bei der Düngung zum Schutz des Grundwassers angerechnet und auf ein verträgliches Mass zurückgebracht werden. Dies war in einem ersten Schritt über die Anrechnung von N_{\min} ohne Betriebsanpassungen möglich (Massnahme M1). Dadurch wurden direkt die N-Nutzung erhöht, der Düngebedarf im Mittel halbiert und die Jahres-N-Verluste um im Mittel 88 kg N/ha (entspricht ca. -85 mg Nitrat/L) reduziert.

Der besonderen Anforderung an die Marktqualität im Gemüsebau wurde Rechnung getragen. Die Qualität der produzierten Ware in Massnahme M1 (Anrechnung von N_{\min}) war nahezu identisch. In keiner Kultur kam es durch die reduzierte Düngung zu Mängeln, die die Ware unverkäuflich machten. Es gab jedoch eine nicht signifikante Tendenz zur Abnahme der Massenerträge von ca. 5 %. Diese wiederum wurde möglicherweise durch das händische Ausbringen der Dünger in den Versuchsplots hervorgerufen.

Die ersten Praxistests haben also gezeigt, dass es mit dem heutigen Stand der Kenntnis besser verträgliche Optionen mit hohem bis sehr hohem Einsparpotenzial von Dünger gibt. Das Dünge- und Überschuss-Niveau kann also deutlich gesenkt werden, bliebe aber immer noch deutlich höher als im Gesamtgebiet für das Grundwasser anzustreben oder als im Ackerbau. Bei guter Praxis und einem guten Einsparbeitrag hat der Gemüsebau in seinem jetzigen Umfang einen Platz im Perimeter. Kulturen und Flächen müssten nicht weiter eingeschränkt werden. Nach den vorläufigen Ergebnissen können bei guter Ausgestaltung auch der Ertrag und die Qualität des erzeugten Gemüses auf dem jetzigen Niveau gehalten werden.

2.4 Ausblick

Die erarbeiteten Methoden und Handlungsoptionen im Gemüsebau könnten bei Aufnahme in die nächste Phase des Nitratprojekts Niederbipp-Gäu-Olten und bei entsprechender wissenschaftlicher Begleitung zunächst exemplarisch und dann zunehmend flächendeckend auf allen Betrieben im Perimeter eingeführt werden. Damit scheint es wahrscheinlich, die sehr hohen Überschüsse im Gemüsebau deutlich reduzieren zu können. Dazu bedarf es einer gemeinsamen Anstrengung aller Handelnden vom Betrieb über die Beratung bis zu den beteiligten Fachstellen und Bundesämtern.

Für den Gemüsebau bleibt das zentrale Erfordernis, dass eine hohe, verkäufliche Marktqualität mit den Massnahmen erreicht werden kann. Für den Grundwasserschutz bleibt das zentrale Erfordernis, dass die Massnahmen wesentlich und nachweislich Nitrat im Sickerwasser reduzieren müssen, um von dem problematisch hohen Überschussniveau herunterzukommen.

Der gemeinsame Nenner ist die zurzeit geringe Nutzungseffizienz des Boden-N. Die Verschiebung von N-Verlusten zu N im Aufwuchs der Pflanze ist eine Win-Win-Situation, die es zu nutzen gilt. Die Gemüsebetriebe profitieren durch geringere Dünger- und Arbeitskosten. Der Grundwasserschutz und die Umwelt als Ganzes profitieren von jedem Kilogramm Stickstoff weniger in der Landschaft.

Dazu bedarf es der möglichst flächigen Adaption verschiedener Massnahmen bzw. Handlungsoptionen und einer passenden Infrastruktur, insbesondere für die Anrechnung von N_{\min} und den Datenaustausch zur Düngeempfehlung. Beides kann durch das Nitrat-Projekt unterstützt werden.

Eine Reihe dieser Handlungsoptionen wurden im Rahmen der Ergebnispräsentationen mit den Betriebsleitern diskutiert. Die besten Handlungsoptionen für die Zukunft zum Grundwasserschutz, welche von den Praktikern unterstützt werden, und die je nach Ausgestaltung Aussicht auf Umsetzung haben, wurden daraufhin vertieft und werden als Perspektiven in Steckbriefen vorgestellt.

2.5 Handlungsoptionen

Die drei wichtigsten Massnahmen-Steckbriefe (s. Kap. 7), welche den aktuellen Stand der Diskussion zu diesen Massnahmen aus Sicht der Landwirtschaft und des Grundwasserschutzes sowie praktische Gesichtspunkte aufführen sind:

1. Angepasste Düngung nach N_{\min} -Methode
2. Winterbegrünung/Zwischenfrucht
3. Berücksichtigung organischer Reststoffe und Hofabfälle in der N-Bilanz (siehe Anhang, N aus allen Hof- und Recyclingdüngern und Ernterückständen)

3 Ausführliche Zusammenfassung der Einzelberichte TP 2.1

3.1 Literaturstudie und Bewertungssystem

Dieser Projektteil hatte zum Ziel, a) nationale und internationale Daten zu ausgewaschenen N-Frachten im Feldgemüsebau zusammenzustellen, b) die Gemüsearten nach deren Nitratauswaschungspotenzial zu klassifizieren, c) Bewirtschaftungsmassnahmen zur Reduktion der N-Auswaschung zu evaluieren und d) den Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen aufzuzeigen.

a) Ausgewaschene Nitratmengen im Feldgemüsebau

Im Gemüsebau ist aufgrund hoher Erträge und zur Erzielung äusserlich ansprechender Marktqualitäten häufig ein hohes N-Angebot notwendig. Dies kann zu erheblichen N-Bilanzüberschüssen und Auswaschungsverlusten führen. In ihrem Literaturreview zur Nitratauswaschung in Agrarökosystemen der gemässigten Breiten geben Di und Cameron (2002) folgende Reihenfolge an: Mähwiesen < Weide < Ackerbau < Gemüsebau, wobei generell mit Verlusten von 70–180 kg N ha⁻¹ im Gemüsebau gerechnet werden kann. Agostini *et al.* (2010) geben an, dass in Südeuropa unter Freilandgemüse je nach Boden, Niederschlag, Bewässerung und Bewirtschaftung ca. 100–300 kg N ha⁻¹ in das Grundwasser ausgetragen werden können.

Die in der Literatur beschriebenen Daten zu den Auswaschungsverlusten weisen eine hohe Variabilität auf. Diese ist meist weniger auf die verschiedenen Gemüsearten zurückzuführen als darauf, dass sich die Versuche in Boden und Klima, in den Bewirtschaftungsmassnahmen (z. B. Höhe der N-Düngung, Umgang mit den Ernterückständen etc.) und in den Messmethoden (z. B. Lysimeter, Saugkerzen, Anion-Austauschverfahren; Menge an mineralischem N im Boden am Ende der Vegetationszeit als bedeutendste indirekte Schätzmethode) stark unterschieden haben. Letztlich existieren nur wenige repräsentative Studien, in denen explizit nach Unterschieden zwischen Gemüsearten geforscht worden ist. Meist wurden ganze Kultur- oder Fruchtfolgen, die typisch für eine Region sind, untersucht.

b) Bewertungssystem für das Nitratauswaschungspotenzial

Ein erstes System zur Bewertung des Nitratauswaschungspotenzials wurde für 40 Gemüsearten erstellt (Zemek *et al.* 2020a, b). Quantitative Daten von publizierten Versuchen zum N-Düngungsbedarf, zu den N-Mengen in den Ernterückständen und zur Wurzeltiefe wurden zusammengestellt. Viele Gemüsearten wachsen sehr schnell und weisen trotz kurzer Kulturzeit einen hohen N-Düngungsbedarf auf. Im Zuge der Ernte können im Freilandgemüsebau mit den Ernterückständen erhebliche N-Mengen auf dem Feld anfallen. Die Wurzeltiefe ist von Bedeutung, weil Nitrat in tieferen Bodenschichten nur von tiefwurzelnenden Kulturen aufgenommen und damit vor der Auswaschung ins Grundwasser bewahrt werden kann. Das Bewertungssystem wurde in einem zweiten Schritt derart weiterentwickelt, dass es nicht nur für einzelne Kulturen verwendet werden kann, sondern für sämtliche Gemüse- und Zwischenkulturen eines Jahres auf einem bestimmten Schlag (Spiess *et al.* 2022). Zudem wurden die Ausgangswerte für drei Eingangsparameter teilweise überarbeitet (Tab. 1). Mit dem Abzug für den Anbau einer Zwischenkultur (Gründüngung oder Zwischenfutter) im folgenden Winter wurde ein vierter Parameter eingeführt (Tab. 2). Im Weiteren wurde das auf einer Klassenbildung basierende Punktesystem durch Berechnungsformeln ersetzt.

Tab. 1: N-Düngungsbedarf, N-Menge in den Ernterückständen, effektive Wurzeltiefe, durchschnittliche Kulturdauer sowie korrigierte effektive Wurzeltiefe für die wichtigsten Freilandgemüsekulturen (Bezeichnung der Kulturen nach GRUD).

Kultur (nach GRUD)	N-Düngungs- bedarf kg N/ha	N-Menge in Rückständen kg N/ha	effektive Wurzeltiefe cm	Kultur- dauer Tage	korr. eff. Wurzeltiefe cm
Blumenkohl	260	200	60	63	8
Broccoli	220	150	50	64	7
Chinakohl, gepflanzt	160	80	60	56	7
Weisskohl, Lager-	190	150	70	90	14
Kohlrabi	130	40	60	42	6
Kohlrabi, Verarbeitung	170	50	60	49	6
Radies, 10 Bund/m ²	50	0	30	28	2
Rettich, 8-9 Stück/m ²	110	40	80	40	7
Rosenkohl	260	200	60	150	20
Speiserüben, Herbst-, Mai-	140	60	60	49	6
Wirz, schwer	140	150	60	120	16
Rucola, ein Schnitt	150	0	60	35	5
Cicorino rosso, gepflanzt	110	40	60	65	9
Frisée, gepflanzt	130	60	60	45	6
Endivien, gepflanzt	160	100	60	60	8
Salate, diverse	110	50	30	35	2
Schnittsalat	60	20	30	30	2
Zuckerhut, gepflanzt	130	60	60	66	9
Zuckerhut Convenience	160	60	60	66	9
Fenchel, Knollen-, gepflanzt	160	100	80	60	10
Karotten, Bund-, Früh-	100	20	60	90	12
Karotten, Lager-, Verarbeitung	130	100	60	198	26
Petersilie, gepflanzt	100	20	60	80	10
Sellerie, Knollen-	190	100	40	130	11
Sellerie, Stangen-	180	80	40	85	7
Randen	140	60	60	140	18
Spinat, nicht überwintert ¹⁾	130	40	40	42	4
Bohnen, Busch-, Handpflück-	0	150	50	77	8
Bohnen, Verarbeitung-	0	140	50	70	8
Erbsen, Verarbeitung-	0	120	70	70	11
Zucchetti, Kürbis, Patisson	130	100	70	119	18
Lauch, gepflanzt	200	100	40	100	9
Schnittlauch, gepflanzt	170	60	15	84	3
Zwiebeln, gesteckt	130	0	40	140	12
Nüsslisalat	50	0	15	50	2
Zuckermais	150	120	80	105	18

¹⁾ Aussaat nach Mitte April, ein Schnitt

Tab. 2: Herleitung der Punktzahlen für die vier Parameter "N-Düngungsbedarf" (1), "N-Menge in den Ernterückständen" (2), "korrigierte effektive Wurzeltiefe" (3) und "Zwischenkultur" (4) sowie Gesamttotal anhand von Beispielen aus Praxisbetrieben im Gäu und aus dem Lysimeterversuch in Zürich-Reckenholz. Die Punktzahlen der ersten drei Parameter wurden zur besseren Visualisierung eingefärbt (grün = tiefer Wert; rot = hoher Wert). Ein hohes Gesamttotal bei den Punktzahlen bedeutet ein hohes Nitratauswaschungspotenzial.

Kulturfolge im Jahr			1) N-Düngungsbedarf (kg N/ha)				2) N-Menge in Ernterückständen (kg N/ha)				3) korrigierte effektive Wurzeltiefe (cm)				Punktzahlen				
Kultur 1	Kultur 2	Kultur 3	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	Ku.1	Ku.2	Ku.3	Total	1)	2)	3)	4)	Total
															N-Dü.	N-Me.	Tiefe	ZK	Total
Cicorino rosso	Frisée	Gründüngung	110	130	30	270	40	60	85	185	9	6	12	26	0.5	0.6	0.4	-0.5	1.0
Frisée	Cicorino rosso	Gründüngung	130	110	30	270	60	40	85	185	6	9	12	26	0.5	0.6	0.4	-0.5	1.0
Weisskohl, Lager-	Gründüngung		190	30		220	150	85		235	14	12		26	0.4	0.8	0.4	-0.5	1.1
Salate, div.	Frisée	Gründüngung	110	130	30	270	50	60	85	195	2	6	12	20	0.5	0.7	0.5	-0.5	1.2
Endivien	Salate, div.	Gründüngung	160	110	30	300	100	50	85	235	8	2	12	22	0.6	0.8	0.5	-0.5	1.4
Salate, div.	Endivien	Gründüngung	110	160	30	300	50	100	85	235	2	8	12	22	0.6	0.8	0.5	-0.5	1.4
Salate, div.	Zucchetti		110	130		240	50	100		150	2	18		20	0.5	0.5	0.5	0	1.5
Weisskohl, Lager-			190			190	150			150	14			14	0.4	0.5	0.6	0	1.5
Fenchel, Knollen-	Chinakohl		160	160		320	100	80		180	10	7		18	0.6	0.6	0.6	0	1.8
Weisskohl, Lager-	Zuckerhut		190	130		320	150	60		210	14	9		22	0.6	0.7	0.5	0	1.8
Chinakohl	Lauch		160	200		360	80	100		180	7	9		16	0.7	0.6	0.6	0	1.9
Endivien	Broccoli		160	220		380	100	150		250	8	7		15	0.8	0.8	0.6	0	2.2
Salate, div.	Blumenkohl		110	260		370	50	200		250	2	8		11	0.7	0.8	0.7	0	2.3
Blumenkohl	Salate, div.	Nüsslisalat	260	110	50	420	200	50	0	250	8	2	2	12	0.8	0.8	0.7	0	2.4
Broccoli	Salate, div.	Salate, div.	220	110	110	440	150	50	50	250	7	2	2	12	0.9	0.8	0.7	0	2.4
Broccoli	Broccoli		220	220		440	150	150		300	7	7		14	0.9	1.0	0.6	0	2.5

Ku. = Kultur; N-Dü. = N-Düngungsbedarf; N-Me. = N-Menge in den Ernterückständen; Tiefe = "korrigierte effektive Wurzeltiefe"; ZK = Zwischenkultur

Mit diesem Bewertungssystem werden bedeutende kulturspezifische Treiber der Nitratauswaschung erfasst. Beim N-Düngungsbedarf wird allerdings bei organischen Düngern nur der kurz- und mittelfristig verfügbare Stickstoff berücksichtigt, nicht aber derjenige Teil des organischen Stickstoffs, der erst langfristig, d.h. nach vielen Jahren oder Jahrzehnten mineralisiert wird. Um diesen Stickstoff berücksichtigen zu können, müssten verlässliche Daten von Praxisbetrieben zum Einsatz von organischen Düngern im Feldgemüsebau verfügbar sein. Die Daten, die den GRUD entnommen worden sind (N-Düngungsbedarf und N-Menge in den Ernterückständen), bedürfen einer Überarbeitung und bei der effektiven Wurzeltiefe ist die Datenbasis bei den meisten Gemüsekulturen ungenügend.

Das Bewertungssystem erlaubt eine qualitative, jedoch keine quantitative Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials. Es gibt Hinweise, bei welchen Kulturfolgen eher mit hohen bzw. niedrigen Auswaschungsverlusten zu rechnen ist, lässt aber nicht die Quantifizierung dieser Verluste zu. Deshalb eignet sich das Bewertungssystem vor allem als Bestandteil für die Beratung von Gemüsebaubetrieben oder in Gebieten mit wenigen Vorinformationen bezüglich N Nachlieferung und nicht als Massnahme für den Vollzug in einem Nitratprojekt.

c) Massnahmen zur Reduktion der Nitratverluste

Vier Massnahmen eignen sich laut Literatur besonders zur Reduktion der Nitratauswaschung:

- Verbesserte Ermittlung des N-Düngungsbedarfs z. B. mit der N_{\min} -Methode (Neuweiler und Krauss 2017), welche auf der Messung der N_{\min} -Menge in der von den Wurzeln nutzbaren Bodenschicht zu Kulturbeginn beruht.
- Fruchtfolgen mit Anbau von Zwischenkulturen, die Wasser und Stickstoff aus dem Boden aufnehmen. Dadurch wird die Sickerwasserbildung reduziert, und das anfallende Sickerwasser weist eine geringere Nitratkonzentration auf.
- Optimierung des Ernterückstandmanagements durch Abfuhr der Rückstände mit nachfolgender Weiterverwertung in Vergärungs- und Kompostieranlagen, insbesondere beim Anbau von Gemüsearten mit hohen N-Mengen im zurückbleibenden Pflanzenmaterial sowie beim letzten Satz in der Vegetationsperiode.
- Steuerung der Bewässerung z. B. mit Hilfe der Berechnung der klimatischen Wasserbilanz oder Bodenfeuchtesensoren (z. B. Tensiometer, FDR).

d) Forschungsbedarf

- Gezielte Versuche in Zusammenarbeit mit Gemüsebaubetrieben sind notwendig, einerseits um die Wirksamkeit von Reduktionsmassnahmen zu belegen und andererseits um ihre Durchführbarkeit auf Betriebsebene zu testen.
- Die Düngungsnormen sollten überprüft werden, wobei die aktuellen Ertrags- und Qualitätserwartungen und die Sortenunterschiede berücksichtigt werden müssen. Existierende Expertensysteme wie z. B. N-Expert sollten unter schweizerischen Bedingungen getestet werden.
- Es sind nur wenige Versuchsergebnisse vorhanden, in welchem Ausmass die konservierende Bodenbearbeitung die N-Dynamik im Boden und die Nitratauswaschung im Freilandgemüsebau beeinflusst. Deshalb sollten vermehrt Versuche zu dieser Thematik durchgeführt werden.
- Zur Verbesserung des Umgangs mit den Ernterückständen sollte untersucht werden, wie der Stickstoff im zurückbleibenden Pflanzenmaterial besser konserviert werden kann.

3.2 Lysimeterversuch

Auf zwölf grossen Lysimetern in Zürich-Reckenholz wurde während drei Jahren (April 2017 - März 2020) untersucht, wie viel Nitrat unter einer Gemüsefruchtfolge ohne Winterbegrünung ausgewaschen wird und wie sich der Umgang mit den Ernterückständen auf die Auswaschung auswirkt. Je sechs Lysimeter waren mit einer Braunerde auf Schotter ("Schotterboden") bzw. mit einer Braunerde auf Moränelehm ("Moräneboden") gefüllt. Die Fruchtfolge wurde auf den beiden Böden um ein Jahr versetzt angebaut (Abb. 1). Um den Einfluss des Ernterückstandsmanagements auf die Nitratauswaschung zu untersuchen, wurden die Ernterückstände bei jedem Boden auf drei Lysimetern abgeführt und auf den drei anderen belassen und eingearbeitet. Die Bewirtschaftung erfolgte möglichst praxisüblich. Die N-Düngung erfolgte gemäß den Empfehlungen von Agroscope (GRUD 2017). Insgesamt wurden die Gemüsekulturen mit 135 bis 200 mm Jahr⁻¹ bei Bedarf bewässert. Bei Niederschlägen von 826 bis 981 mm Jahr⁻¹ betrug somit die gesamte Wasserzufuhr durchschnittlich 1092 mm Jahr⁻¹. Die Sickerwassermenge wurde mit Kippwaagen erfasst. Wasserproben wurden 14-täglich entnommen und auf Nitrat (NO₃⁻) und Ammonium (NH₄⁺) untersucht.



Abbildung 1: Anbau von Weisskohl und Chinakohl im Juni 2018 (links) und Kopfsalat im August 2017 (rechts).

Ertrag der Kulturen

Die marktfähigen Erträge lagen im Mittel über alle Gemüsekulturen und beide Böden in der gleichen Größenordnung wie im gewerbsmäßigen Freilandanbau. Das Ernterückstandsmanagement hatte auf beiden Böden keinen Einfluss auf die Ertragshöhe.

Nährstoffbilanz

Die Nährstoffbilanz als Gegenüberstellung von Düngung und Entzug durch die weggeführten Pflanzenprodukte zeigt, dass der N-Umsatz im Feldgemüsebau viel höher ist als bei Ackerkulturen. Die Düngung und die Aufnahme durch die Pflanzen (Marktware und Ernterückstände) lagen im Bereich von 300 bis 500 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Tab. 3). Auf den Lysimetern mit Abfuhr der Ernterückstände wurden durchschnittlich 417 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ ausgebracht. Bei den Lysimetern mit Einarbeitung der Rückstände wurde der Kulturbedarf gemäss GRUD (2017) jeweils um 20% der in den Ernterückständen der Vorkultur enthaltenen N-Menge reduziert (minus 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹). Der N-Entzug betrug bei Belassen der Ernterückstände und im Mittel beider Böden 257 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ und bei Abfuhr sogar 443 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹. Der Vergleich beider Verfahren zeigt, dass die Bilanz bei Belassen der Ernterückstände um 146 kg N ha⁻¹

Jahr⁻¹ höher ausfiel als bei Abfuhr. Zwar war die Düngung infolge der 20%igen Anrechnung des Stickstoffs in den Ernterückständen der Vorkultur 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ niedriger als bei Abfuhr, aber der Entzug fiel um 186 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ geringer aus, weil er nur die marktfähige Ware umfasste, nicht aber die auf den Lysimetern belassenen Ernterückstände.

Tabelle 3: N-Bilanz (= N-Düngung minus N-Entzug durch die weggeführten Produkte) bei Abfuhr und bei Belassen sowie N-Menge in den Ernterückständen bei Belassen (Mittel beider Böden; in kg N ha⁻¹).

	N-Bilanz			Belassen			N-Menge der Ernte- rückstände
	Abfuhr Düngung	Entzug	Bilanz	Düngung	Entzug	Bilanz	
Broccoli	250	230	20	245	71	174	156
Kopfsalat 1	120	96	24	90	74	16	28
Kopfsalat 2	120	65	55	110	48	62	19
Total 1. Jahr	490	390	100	445	193	252	203
Chinakohl	180	268	-88	175	125	50	135
Lauch	220	226	-6	200	178	22	73
Total 2. Jahr	400	495	-95	375	302	73	208
Weisskohl	220	217	3	200	130	70	80
Zuckerhut	140	226	-86	110	145	-35	95
Total 3. Jahr	360	443	-83	310	275	35	175
3-Jahresmittel	417	443	-26	377	257	120	195

Menge und Nitratkonzentration des Sickerwassers sowie ausgewaschene N-Menge

Die Sickerwassermenge betrug im Mittel der drei Jahre und beider Böden rund 500 mm (Tab. 4) und war damit fast halb so hoch wie die Wasserzufuhr über den Niederschlag und die Bewässerung. Das unterschiedliche Ernterückstandsmanagement beeinflusste die Sickerwassermenge auf beiden Böden nur minimal.

Die Verlaufskurven der Nitratkonzentration des Sickerwassers lagen in beiden Verfahren und Böden größtenteils über dem schweizerischen Anforderungswert von 25 mg NO₃⁻ L⁻¹ für Gewässer, die der Trinkwassernutzung dienen (Abb. 3). Im Januar 2020 erreichten die Nitratkonzentration beim Moräneboden Werte von über 400 mg NO₃⁻ L⁻¹. Mit Ausnahme des Moränebodens zwischen August 2017 und Mai 2018 waren die Nitratkonzentrationen bei Belassen der Ernterückstände jeweils höher als bei Abfuhr. Im Mittel über alle Lysimeter und Jahre betrug die Nitratkonzentration 110 mg NO₃⁻ L⁻¹.

Im Durchschnitt wurden 127 kg N ha⁻¹ ausgewaschen. Die jährlichen Schwankungen waren insbesondere auf dem Moräneboden sehr groß, wo die maximale N-Fracht 305 kg N ha⁻¹ betrug (Tab. 4). Da der mittlere Sickerwasseranfall in unserem Versuch 500 mm Jahr⁻¹ beträgt, dauert es etwa ein Jahr, bis der größte Teil des Nitrats aus dem Oberboden durch den Lysimeter gesickert ist. Deshalb ist es nicht möglich, eine bestimmte Nitratfracht einer einzelnen Gemüsekultur zuzuordnen.

Schlussfolgerungen

Der Lysimeterversuch zeigte, dass unter Feldgemüse grosse N-Mengen als Folge der hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ausgewaschen werden können. Bei der heute gängigen Bewirtschaftungspraxis, dem Belassen der Ernterückstände auf dem Feld, fiel der Saldo der Nährstoffbilanz 146 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ höher aus als bei der Abfuhr. Die zusätzliche Nitratauswaschung von 18 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ im

Mittel beider Böden bei Belassen erklärt jedoch nur einen kleinen Teil der Differenz im Bilanzsaldo. Offen bleibt, welche N-Menge im Humus angereichert wurde, in gasförmiger Form verloren ging oder in den nächsten Jahren noch ausgewaschen wird.

Tabelle 4: Sickerwassermenge, Nitratkonzentration des Sickerwassers und ausgewaschene N-Fracht in den verschiedenen Verfahren, Böden und Versuchsjahren.

	Schotterboden		Moräneboden	
	Abfuhr	Belassen	Abfuhr	Belassen
Sickerwassermenge (mm):				
2017/18	489	491	450	443
2018/19	469	479	478	462
2019/20	582	593	605	571
Mittel	513	521	511	492
Nitratkonzentration (mg NO₃⁻ L⁻¹):				
2017/18	99	132	116	85
2018/19	56	71	43	56
2019/20	77	108	200	236
Mittel	78	104	126	134
Ausgewaschene N-Fracht (kg N ha⁻¹):				
2017/18	109	146	118	85
2018/19	60	77	46	58
2019/20	101	144	273	305
Mittel	90	123	145	149

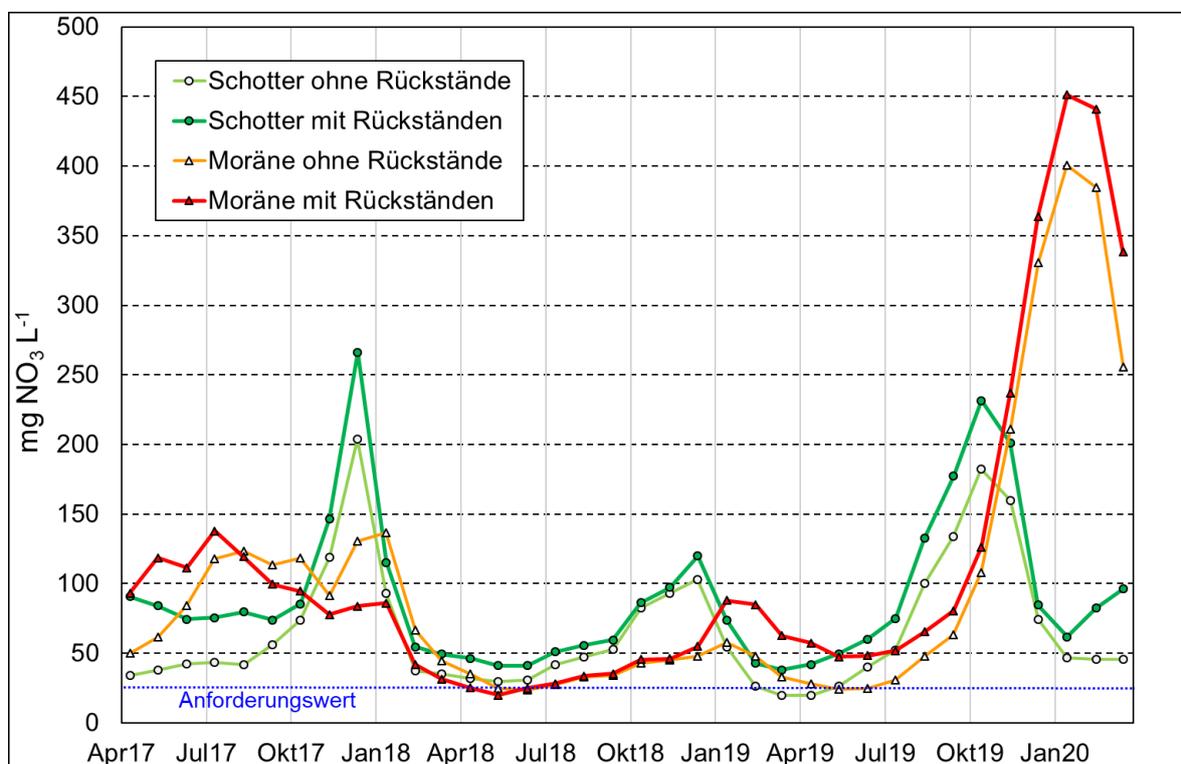


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der abflussgewichteten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in beiden Verfahren und beiden Böden.

4 Zusammenfassung TP 2.2: Erfassung und Verminderung der N-Verluste im Gemüsebau in der Region Niederbipp – Gäu – Olten

Ziel des Teilprojekts 2.2: «Gemüsebau in der Praxis» innerhalb des Forschungsprojekts «NitroGäu» (Endbericht: Bischoff *et al.* 2021, 83 S.) war es zunächst, exemplarisch die Stickstoffverluste durch Auswaschung unter Praxisflächen des Gemüsebaus zu erheben. Die Ziele wurden im Projektverlauf erweitert. Es sollten vollständige N-Bilanzen erhoben und Massnahmen getestet werden. Aus den Ergebnissen sollten, wenn möglich, Handlungsoptionen zur Verbesserung der Düngepraxis abgeleitet werden.

Entsprechend wurden 2018 exemplarische Praxisdaten beginnend im Kanton Solothurn, 2019 gefolgt vom Kanton Bern, auf insgesamt drei Betrieben erhoben. Zusätzlich wurden erste Praxistests zur Wirksamkeit von Massnahmen im Grundwasserschutz im Jahr 2019 durchgeführt.

Für die Ist-Zustandserhebungen wurden 2018 fünf Flächen auf einem Betrieb und 2019 acht Flächen auf drei Betrieben untersucht. Zusätzlich wurden Massnahmen zur N-Reduktion auf vier Flächen getestet. Insgesamt wurden 21 Sätze von 10 Gemüsearten auf 13 Flächen untersucht.

Methodisch wurden quantitativ Ernten, N-Auswaschungen, N_{\min} , N-Vorräte und N-Düngung gemessen oder erhoben. Daraus wurden N-Bilanzen mit Aussagen zu Überschüssen, Effizienz und zur Beurteilung des N-Haushalts berechnet. Für den Vergleich der Massnahmen mit der aktuellen Praxis wurde analog verfahren. Ausserdem wurden die für die Betriebe wichtigen Ertrags- und Qualitätsgrössen quantifiziert, um mögliche betriebliche Einbussen zu erkennen.

In der jetzigen Praxis werden vom verfügbaren Nitrat etwa zwei Drittel ausgewaschen und nur ein Drittel für den Pflanzenaufwuchs genutzt.

Alle drei Betriebe arbeiteten nach üblicher fachlicher Praxis und blieben mit ihrer Düngung ca. 60 kg N/(ha*Kultur) unter dem Entzug durch die oberirdische Biomasse (Ernte und Erntereste). Dennoch bedeutet dies aufgrund des hohen Anfalls von Ernteresten einen durchschnittlichen N-Überschuss von ebenfalls ca. 60 kg N/(ha*Kultur). Hinzu kommt der mögliche Totalausfall bei Qualitätsmängeln oder Problemen bei der Abnahme durch den Markt.

Die N-Verluste für 2018/19 und 2019/20 mit dem Sickerwasser waren mit 271 kg N/(ha* Jahr) 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, davon labile N-Reserven ca. 370 kg N/(ha*Jahr), mittlerer N_{\min} in 0 – 60 cm Tiefe: 245 kg N/ha).

Unter dem Blickwinkel der N-Dynamik, der N-Effizienz und des Grundwasserschutzes stellt sich die heutige Praxis wie folgt dar (Abb. 3):

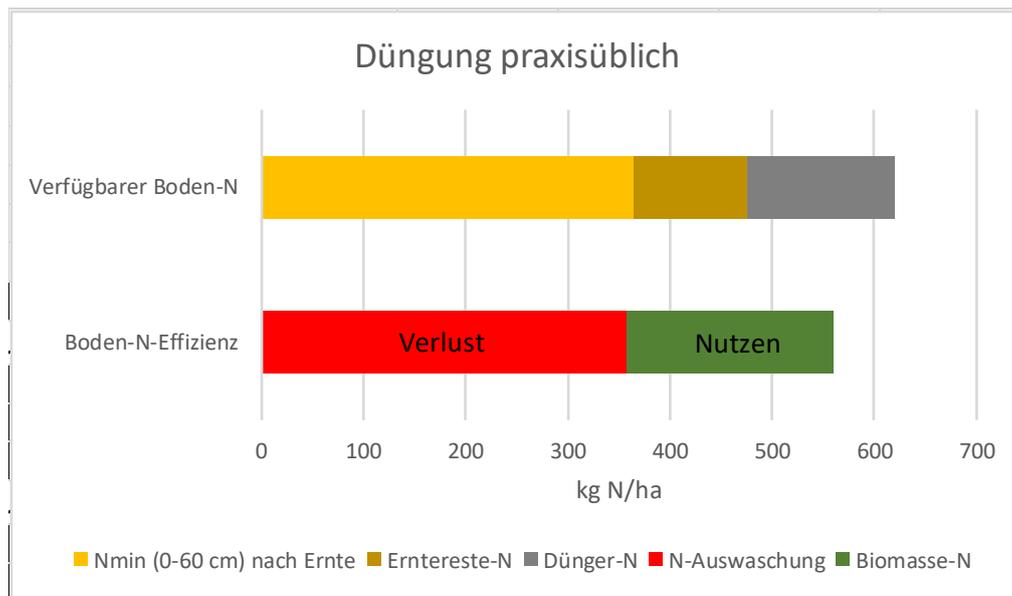


Abbildung 3: Gesamt verfügbares N im Boden im Jahr 2019 (Summe aus N_{min} + Erntereste + Dünger, oberer Balken) und dessen Verbleib in Sickerwasser und Pflanzen (unterer Balken, nicht dargestellt Änderungen im Bodenpool).

Das Angebot an gesamt verfügbarem N im Jahr 2019 (s.a. Tabelle 5) war mit über 600 kg/ha auf den Gemüseflächen extrem hoch und bedingte die potenziell und tatsächlich mit 334 kg N/(ha*Jahr) sehr hohe Auswaschung von N Richtung Grundwasser. Das hohe N-Angebot setzt sich aus 3 Fraktionen zusammen:

- 1) Die Nachlieferung von N_{min} aus dem Boden ist teils naturbedingt, teils durch die hohen organischen Inputs und Akkumulation mehrjähriger Überschüsse verursacht. Hier verbergen sich vermutlich auch (noch) als Strukturverbesserer wahrgenommene organische Recyclingdünger (z.B. Kompost, festes Gärgut).
- 2) Die labilen Erntereste des Gemüses mit geringem Strukturanteil werden innerhalb von wenigen Wochen fast restlos abgebaut. Der in den Pflanzenresten gespeicherte N beträgt im Mittel 60 % des Pflanzenbedarfs. Dieser Pool steht schnell wieder zur Verfügung. Der Abbau beginnt unmittelbar nach dem Mulchen, so dass die Erntereste unmittelbar zur Ernährung der Folgekulturen beitragen können (Weier, 1999). Der genaue Verlauf ist von Bodenfeuchte und -temperatur abhängig (Robertson *et al.*, 1988; Bruckler *et al.*, 1997; De Neve *et al.*, 1996; Magid *et al.*, 2001).
- 3) Die Düngemenge orientiert sich z.Zt. am Entzug durch die Ganzpflanze. Sie wird in der Praxis aus der Erfahrung heraus mit kleinen Abschlägen insbesondere bei den Sommerkulturen nach unten korrigiert.

Das Ergebnis ist, dass in den heutigen Anbausystemen die N-Verluste fast zwei Drittel ausmachen und der durch Pflanzen genutzte N nur etwas mehr als ein Drittel.

Eine Haupteckenerkenntnis dieses Projektes ist es, dass diese sehr grossen Verluste für die Betriebe unsichtbar waren, weil sie dazu keine Daten hatten. Im Gegenteil waren die Betriebe überzeugt, ökonomisch und nach Bedarf zu düngen. Tatsächlich arbeiteten alle drei Betriebe für ihren Kenntnisstand besser als die übliche Praxis und blieben mit ihrer Düngung im Mittel um 30 % unter dem Entzug durch die Ganzpflanzen, bei geringen Unterschieden zwischen den Betrieben.

Es wurden im Jahr 2019 parallel vier Massnahmen zur Reduzierung der N-Überschüsse getestet:

M1: Breitwürfige Düngung (entspricht der Praxis) unter Berücksichtigung von N_{\min} (4 Flächen)

M2: Platzierte Düngung unter Berücksichtigung von N_{\min} (4 Flächen)

M3: Fertigation unter Berücksichtigung von N_{\min} (1 Fläche)

M4: Entfernung der Erntereste bei nicht reduzierter Düngung (1 Fläche)

Da die Einzelergebnisse von M3 und M4 nicht wiederholt waren, können sie nicht gesichert ausgewertet werden und werden für die Synthese nicht berücksichtigt. Sie sind dem Volltext des Berichtes zu entnehmen (Bischoff *et al.* 2021).

Wichtige Mittelwerte aus dem Vergleich von üblicher Praxis und den Massnahmen 1&2 sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst:

Tabelle 5: N-Bilanz 2019: Alle Mittelwerte zu Ernte und Dünger pro Kultur, Auswaschung pro Jahr, N_{\min} als Stichtagsbeprobungen nach Ernte; «leicht verfügbares N» = Summe aus N_{\min} nach Ernte und Ernteresten.

N-Pools	Alle Praxis- flächen	Kontrollen (praxis- üblich)	M1:	M2:
			Anrechnung von N_{\min} breitwürfig	Anrechnung von N_{\min} platziert
Zur Verfügung	kg N/ha			
N_{\min} (0-30 cm) nach Ernte	158	233	103	96
N_{\min} (0-60 cm) nach Ernte	245	365	179	177
Erntereste	123	111	97	107
Leicht verfügbares N (0-30 cm)	281	344	200	203
Leicht verfügbares N (0-60 cm)	368	476	276	285
Dünger-N	142	145	80	74
Output				
Feldabfuhr = Ernte	81	90	80	76
Auswaschung	334	359	271	296
N-Saldo = Dünger - Abfuhr	61	55	0	-2

Die beste Massnahme im Test war **M1**. Hierbei kam es im Durchschnitt zu geringen (ca. 5 %), nicht signifikanten Ertragseinbussen. Die Warenqualität war nahezu identisch. Die Düngung konnte im Durchschnitt um ca. 65 kg N/(ha*Kultur) gesenkt werden. Daraus resultierten um 88 kg N/(ha*Jahr) niedrigere Auswaschungen als in den Kontrollen, was einer Minderung um 25 % entspricht.

Auch bei **M2** konnte die Düngung um ca. 70 kg N/(ha*Kultur) gesenkt werden. Die Auswaschung ging um 63 kg N/(ha*Jahr) zurück. Es kam nicht zu grossen Qualitätseinbussen. Der Massenertrag ging aber im Mittel über alle Kulturen von 420 dt/ha (Kontrollen) auf 348 dt/ha um 17 % zurück. Zwar gab es ein paar Sondereffekte, die bei der kleinen Stichprobe ins Gewicht fallen. Jedoch ist **M2** mit neuer Technik für die Betriebe verbunden und war hier nicht nachweislich besser als **M1**.

Die Ergebnisse des Massnahmenvergleichs zeigen das Veränderungspotenzial und den Weg zu einer kooperativen Verbesserung, wie er mit den Pilotversuchen in 2019 angefangen wurde. Die Einsparungen werden aus diesen ersten, einjährigen Ergebnissen sichtbar (Abb. 4).

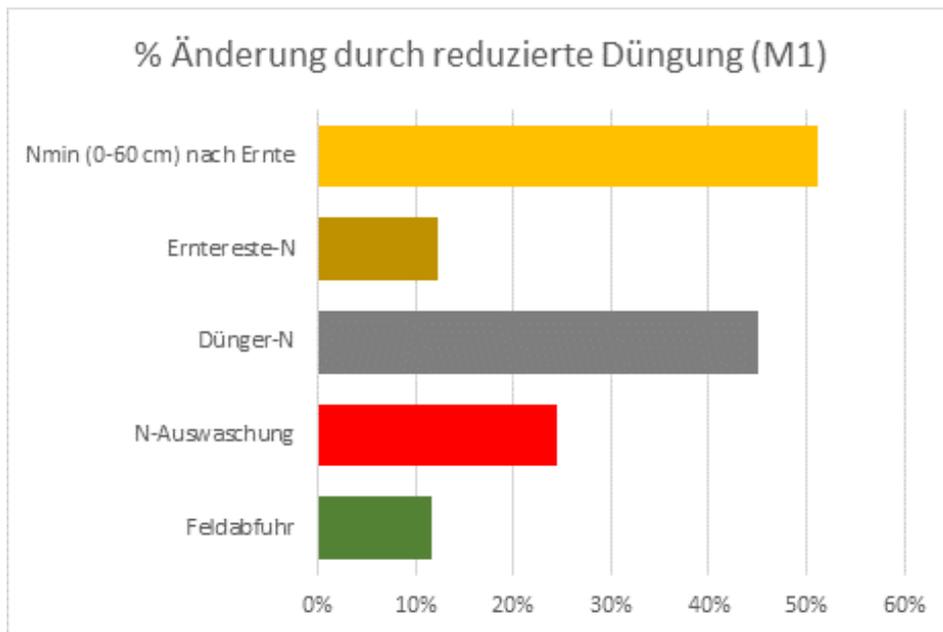


Abbildung 4: Auswirkungen der angepassten Düngung nach N_{min} (M1) auf Umwelt und Ertrag. Prozentuale Änderungen berechnet aus der Differenz Kontrollen – M1 aus Tab. 5.

Die Ergebnisse wurden mit den beteiligten Betrieben ausführlich diskutiert und über mögliche Lösungen zur Reduktion der Nitrat-Problematik im Gemüsebau gesprochen.

Schlussfolgerungen

Die übliche Düngepraxis im Gemüsebau auf dem heutigen Stand ist aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten nicht ausreichend für den Schutz des Grundwassers im Perimeter des Nitrat-Projekts Niederbipp-Gäu-Olten. Die aktuellen Auswaschungen sind mit im Mittel 271 kg N/ha (ca. 270 mg Nitrat/L) zu hoch. In diesem problematischen Gebiet bedarf es einer Reduktion der N-Überschüsse auf ein verträglicheres Mass für das Grundwasser.

Die grossen labilen N-Reserven aus Ernteresten und Bodenspeicher müssen bei der Düngung zum Schutz des Grundwassers angerechnet und verkleinert werden. Dies war in einem ersten Schritt über die Anrechnung von N_{min} bei der Düngung ohne sonstige Betriebsanpassungen möglich. Die Anrechnung von N_{min} bei der Düngung führte nicht zu signifikanten Ertrags- oder Qualitätseinbussen.

Ausblick und Handlungsoptionen

Für den Gemüsebau bleibt das zentrale Erfordernis, dass eine hohe, verkäufliche Marktqualität mit den Massnahmen erreicht werden kann.

Für den Grundwasserschutz bleibt das zentrale Erfordernis, dass die Massnahmen wesentlich und nachweislich Nitrat im Sickerwasser reduzieren müssen, um von dem problematisch hohen Überschussniveau abzukommen.

Der gemeinsame Nenner ist die zurzeit geringe Nutzungseffizienz des Boden-N. Die Verschiebung von N-Verlusten zu N im Aufwuchs der Pflanze stellt eine Win-Win-Situation dar, die es zu nutzen gilt. Die Gemüsebetriebe profitieren durch geringere Dünger- und Arbeitskosten. Der Grundwasserschutz und die Umwelt als Ganzes profitieren von geringeren Stickstoffverlusten in die Umwelt.

Es wurden drei Handlungsoptionen herausgearbeitet, die sich gegenseitig ergänzen.

1. Die Reduzierung der Düngemenge durch Berücksichtigung von N_{\min} senkt die bisherigen, zu hohen N-Inputs, die über den Entzügen liegen und die Nachlieferung aus den labilen N-Pools nicht berücksichtigen.
2. Die Winterbegrünung/Zwischenfrucht reduziert den labilen N-Pool über Winter und bewahrt als Zwischenspeicher einen Teil des labilen N für die Kulturen des nächsten Jahres.
3. Das Gesamt-N aus Hof- und Recyclingdüngern (auch organischen Reststoffen und Hofabfällen) sowie Erntereste sind voll umweltwirksam. Auch die nicht direkt düngewirksamen Anteile stocken die Boden-Gesamtvorräte und den labilen N-Pool auf. Die organischen Materialien, die auf die Felder kommen, müssen deshalb voll in der N-Bilanzierung und Düngung berücksichtigt werden.

Für die notwendige starke Reduktion der N-Auswaschung bedarf es der möglichst flächigen Adaption der Massnahmen und deren fachlicher Begleitung in der Einführungsphase. Diese kann durch das Nitrat-Projekt Niederbipp-Gäu-Olten und eine wissenschaftliche Begleitung unterstützt werden.

5 Dank

Dieses Projekt wurde durch das Amt für Umwelt des Kantons Solothurn (AfU), das Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA), das Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern (LANAT), das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) gefördert und begleitet.

Wir bedanken uns ganz herzlich bei den Mitarbeitern und Betriebsleitern der beteiligten Gemüsebaubetriebe, der Projektleitung und den Projektmitarbeitern welche beigetragen haben: Else Bünemann-König, Andreas Schwarz, Antje Franzen, Stefanie Kühfuß, Sarah Schleicher, Hanna Frick und Hannah Wey, Clay Humphrys, Karin Meyer-Zimmermann, Oliver Zemek, Walter Richner und Reto Neuweiler, sowie allen weiteren Beteiligten aus den Kantonen und Ämtern am Projekt NitroGäu für den immer freundlichen und interessanten fachlichen Austausch in den gemeinsamen Treffen. Ebenso bedanken wir uns bei der Begleitgruppe für offene Diskussionen und ihre Unterstützung.

6 Literatur

Im Projekt erbrachte Leistungen sind **fett** gedruckt.

- Agostini F., Tei F., Silgram M., Farneselli M., Benincasa P. und Aller M. F. (2010): Decreasing nitrate leaching in vegetable crops with better N management. In: Lichtfouse E. (ed.): Genetic engineering, biofertilisation, soil quality and organic farming. Springer Netherlands, Dordrecht, 147-200.
- Agroscope (2017): Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD (GRUD). Agrarforschung Schweiz 8(6), Spezialpublikation.
- Bischoff W.-A., Schwarz A., Kühfuss K., Williams D. (2021): Abschlussbericht zu TP 2.2: N-Verluste und N-Bilanzen im praktischen Gemüsebau der Region Niederbipp-Gäu-Olten 83 S. Teilprojekt 2.2 im Projekt NitroGäu: Stickstoffeffizienz im Acker- und Gemüsebau für eine Reduktion des Nitratreintrages ins Grundwasser**
- Bruckler L.; De Cockborne A.M.; Rebault P.; Claudot B. (1997): Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. Irrigation Science 17(2):53-61.
- De Neve S.; Pannier J.; Hofman G. (1996): Temperature effects on C- and N-mineralization from vegetable crop residues. Plant and Soil 181(1): 25-30.
- Di H. J. und Cameron K. C. (2002): Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. Nutrient Cycling in Agroecosystems 64 (3), 237-256.
- Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Grossbeeren und Erfurt (IGZ, 2011): Düngung im Freiland-gemüsebau; Schriftenreihe des Institutes für Gemüse- und Zierpflanzenbau Grossbeeren und Erfurt, Autoren: Feller, C. *et al.*, 265 S.
- KTBL (2018): Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL, Hrsg.): Faustzahlen für die Landwirtschaft, 15. Auflage, Darmstadt, 1379 S.
- Magid J.; Henriksen O.; Thorup-Kristensen K.; Mueller T. (2001): Disproportionately high N-mineralisation rates from green manures at low temperatures - implications for modeling and management in cool temperate agro-ecosystems. Plant and Soil 228(1): 73-82.
- Robertson G. P.; Huston M.A.; Evans F.C.; Tiedje J.M. (1988): Spatial variability in a successional plant community: patterns of nitrogen availability. Ecology 69: 1517-1524.
- Spiess E., Humphrys C., Liebisch F., Prasuhn V. und Neuweiler R. (2021a): Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement. In: 19. Gumpensteiner Lysimeter-tagung. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 87-94.**
- Spiess E., Liebisch F., Neuweiler R. und Zemek O. (2021b): Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Feldgemüsebau. In: 19. Gumpensteiner Lysimetertagung. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 153-156.**
- Spiess E., Neuweiler R. und Liebisch F. (2022): Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Feldgemüsebau. NitroGäu: Zusatzbericht zu Teilprojekt 2.1: Bewertungssystem für das Nitratauswaschungspotenzial unter Feldgemüse. Agroscope, Zürich-Reckenholz.**
- SZG (2018): Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG, Hrsg.): ProfiCost Gemüse, Vollkosten und Deckungsbeiträge für den Anbau von Gemüse, Ausgabe 2018, Koppingen, 208 S.
- Weier, U. (1999): Späte Einarbeitung von Ernterückständen verringert die Gefahr der Nitratauswaschung über Winter. Versuche im deutschen Gartenbau, LVG Hannover-Ahlem.
- Die folgenden drei Publikationen stellen Übersetzungen der gleichen Arbeit dar:

- Zemek O., Neuweiler R., Richner W., Liebisch F. und Spiess E. (2020a): Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Gemüsebau. Agrarforschung Schweiz 11, 76-81.**
- Zemek O., Neuweiler R., Richner W., Liebisch F. et Spiess E. (2020a): Estimation et réduction du lessivage des nitrates dans les cultures maraîchères. Recherche Agronomique Suisse 11, 76-81.**
- Zemek O., Neuweiler R., Richner W., Liebisch F. and Spiess E. (2020a): Estimating and reducing nitrate leaching in vegetable production. Agrarforschung Schweiz 11, 76-81.**
- Zemek O., Neuweiler R., Spiess E., Stüssi M. und Richner W. (2020b): Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science Nr. 95, 117 pp.**

weiterer Output aus dem Projekt:

- Excel-tool aus TP2.1 (liegt der Projektleitung vor)

7 Anhang: Massnahmen-Steckbriefe

7.1.1 Steckbrief: Angepasste Düngung nach N_{min} -Methode

Kurzbeschreibung:

Kurz vor dem Düngungstermin wird der im Boden vorhandene mineralische Stickstoff (N_{min}) in verschiedenen Tiefen gemessen. Der gemessene N_{min} -Wert wird vom Soll-Wert der Düngung abgezogen (= Anrechnung von N_{min}). Die Düngung wird entsprechend reduziert. Bis zu welcher Tiefe der N_{min} angerechnet wird, hängt von der Kultur und dem Zeitpunkt ab.

Perspektive Grundwasser:

- Massnahme mit direkter Wirkung. Jedes angerechnete kg N_{min} spart ein kg Dünger-N. Der umweltwirksame Überschuss wird 1:1 reduziert und steht nicht zur Auswaschung zur Verfügung.

Perspektive Landwirtschaft:

- Eine geringere N-Düngung könnte theoretisch den Pflanzen schaden und sollte daher eine Zeit lang auf Erfolg beobachtet werden.
- Die N_{min} -Messung stellt sicher, dass genügend N im Boden ist. Zuvor wurde dieser Wert nicht berücksichtigt oder teils aus Erfahrung geschätzt.
- Daher kann mit im Wesentlichen gleichen Erträgen und Qualitäten gerechnet werden. Auch Totalausfälle sollten nicht häufiger als vorher werden. Auch dieses sollte aber zunächst beobachtet und kann gegebenenfalls korrigiert werden.
- N_{min} -Probenahme, Analytik und Anrechnung erfordern Absprachen und/oder Zusatzarbeit und/oder Wartezeit. Diese müssen so klein und kurz wie möglich gehalten werden, um den Betriebsablauf nicht zu stören.
- Bei genügend grossen N_{min} -Vorräten im Boden können Düngetermine komplett entfallen oder Dünger gespart werden. Arbeits-, Dünger- und Maschinenkosten in der Bewirtschaftung können reduziert werden.

Akzeptanz: gut

Aufwand / Ablauf:

1. Keine Änderungen der Technik oder der Bewirtschaftung nötig.
2. Stunde 0: Landwirt meldet Fläche zur N_{min} -Beprobung an.
3. Stunde 1-24: Feld-Probenahme + Laboreinlieferung
4. Innerhalb 24 h nach Probeneingang: Laborergebnis + Rückmeldung zum anrechenbaren N_{min} bzw. direkte Angabe der Düngemenge pro Fläche
5. Spätestens 48 h nach Meldung: Düngung mit betriebsüblicher Technik möglich

Voraussetzungen:

- a) Externe Beauftragung an Dienstleister *oder*
 - b) Invest in Logistik (Probenahme, Transport, Kühlkette) und Labor (Analysengerät)
- Invest in Anpassung und Automatisierung der Düngerdatenbank zur Anrechnung von N_{min} , basierend auf GRUD (Agroscope, 2017) bzw. detaillierter N_{min} -Sollwert-System (IGZ, 2011).
 - Probenahme, Analytik, Auswertung, Rückmeldung zur Düngung nahtlos verzahnt, im 2. Schritt automatisiert und digitalisiert.

Laufende Kosten und Ersparnisse:

- Probenahme, Transport, Analytik: 225 CHF/(Fläche*Düngetermin)
- Berechnung und Düngeempfehlung: Phase 1 kontrolliert: 32 CHF / Phase 2 automatisiert: 16 CHF
- Ersparnis N-Dünger: 160 – 320 CHF/(ha*Jahr) (bei 3,00 CHF/kg N; Landor AS; Stand: Juli 2022)
- Ersparnis pro entfallenem Düngetermin Arbeitskosten + Maschinenkosten: 67 CHF (SZG, 2018)

7.1.2 Steckbrief: Winterbegrünung/Zwischenfrucht

Kurzbeschreibung:

Möglichst kurz nach der Ernte der letzten Gemüsekultur erfolgt die Einsaat einer Zwischenfrucht. Sie sollte den kurzen Rest der Vegetationsperiode für starkes Wachstum nutzen. Dabei wird der verfügbare Stickstoff aus dem Boden in die Pflanze eingelagert. In der für das Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten vorgesehenen Ausgestaltung sollen abfrierende Zwischenfrüchte wie *Phacelia* oder *Sommerhafer* eingesetzt werden, die frühestens am 15. Januar umgebrochen werden dürfen.

Perspektive Grundwasser:

- Massnahme mit indirekter Wirkung. Die Pflanzen der Winterbegrünung dienen als Zwischenspeicher für N und schützen es so temporär vor der sonst unvermeidbaren Winter-Auswaschung. Der Erfolg der Massnahme hängt im Wesentlichen von 2 Faktoren ab:
 1. Bei grossen Gesamtüberschüssen nutzt auch eine Zwischenspeicherung nichts. Sind die N-Gesamtüberschüsse also so klein, dass die N-Auswaschung nicht einfach nur nach hinten verschoben wird?
 2. Gelingt es, das gespeicherte N als anrechenbaren Dünger in die Kulturen des nächsten Jahres zu übertragen und so mit der Gemüseernte wieder abzufahren?

Wenn diese beiden Fragen mit Ja beantwortet werden können, handelt es sich um eine sehr wirksame Massnahme, um den Anteil vermeidbarer Überschüsse stark zu reduzieren. Die Winterauswaschung nach Kulturrende im Gemüsebau ist insbesondere nach Kohlgewächsen ein grosses Problem. Je nach Saattermin, Witterungsverlauf und Zwischenfrucht können 20 – 200 kg N/ha in der Winterbegrünung zwischengespeichert werden. Wirksam wird aber nur der Anteil, der über anrechenbaren Stickstoff von den Nachfolgekulturen aufgenommen wird.

- Ein Umbruch nach dem 15. Januar stellt einen Kompromiss zwischen Schutz vor Auswaschung (Umbruch je später desto besser) und Bodenstrukturproblemen (wetterabhängig, Umbruch je früher desto besser) dar.

Perspektive Landwirtschaft:

- Die Zwischenfrucht oder Winterbegrünung bedeutet einen Zusatzaufwand im Spätsommer und Herbst bei der Aussaat.
- Das eingearbeitete Pflanzenmaterial wirkt sich in der Regel gut auf die Bodenstruktur, den Humusgehalt und die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen aus.
- Das gespeicherte N reduziert die Düngekosten und trägt zum Entfallen von Düngeterminen bei.
- Einige Ausgestaltungen der Massnahmen sind für den Gemüsebau problematisch und wurden daher nicht verpflichtend gemacht. Dazu gehören:
 1. Winterharte Zwischenfrüchte -> «Unkraut», ggf. zusätzliche Bodenbearbeitung und/oder Pflanzenschutzmittel
 2. später bis sehr später Umbruchtermin -> mögliche Probleme mit Struktur, Frostgare, Gesundheit, zusätzliche Bodenbearbeitung
 3. Feldabfuhr -> Befahrbarkeit im Winter, Bodenstruktur, Logistik, zusätzliche Bodenbearbeitung
 4. Brassicaceae sind zu vermeiden (Krankheitsdruck)
- Eine Verschlechterung der Bodenstruktur wird besonders kritisch gesehen, weil sie sich auf Ertrag und Qualität der nachfolgenden Kulturen auswirken kann. Ein Umbruch nach dem 15. Januar stellt einen Kompromiss zwischen Schutz vor Auswaschung (Umbruch je später desto besser) und Bodenstrukturproblemen (wetterabhängig, Umbruch je früher desto besser) dar.

Akzeptanz: mittel

Aufwand / Ablauf

1. Auswahl einer geeigneten Zwischenfrucht
2. Einsatz zügig nach Ernte der letzten Kultur
3. Umbruch oder Abfuhr der Zwischenfrucht
4. (Zusätzliche) Bodenbearbeitung

Voraussetzungen:

- Bei aktueller Ausgestaltung keine. Die Technik ist entweder auf den Betrieben oder bei Nachbarn vorhanden.

Laufende Kosten und Ersparnisse:

- Saatgut: 130 – 250 CHF/ha (SZG, 2018)
- Maschinen- und Arbeitskosten: 190 – 224 CHF/ha (SZG, 2018)
- Ersparnis: Dünger und Düngetermine durch erhöhtes Rest-N_{min} im Frühjahr (s. 7.1.1), Zahlen noch unbekannt

7.1.3 Steckbrief: Berücksichtigung organischer Reststoffe und Hofabfälle in der N-Bilanz

Kurzbeschreibung:

Jede Beaufschlagung eines Gemüsefeldes mit organischem Material wie Mist, Gülle, Biogasgärreste, Kompost, Grünschnitt, Ernteabfälle von anderen Feldern etc. soll in Menge, Art und ggf. Qualität erfasst werden. Dazu müssen sie auf den Datenblättern der Teilparzellen erfasst sein, um bei der Düngebilanz berücksichtigt werden zu können.

Für die verschiedenen Materialien sollten innerhalb des Projekts von Zeit zu Zeit lokale Stichproben genommen werden, die die Spannweite der N-Importe charakterisieren.

Im Rahmen der Umsetzung 2021 – 2026 sollte kooperativ zwischen Betrieb und Beratern entschieden werden, wie organische Dünger und Zuschlagsstoffe in Zukunft eingesetzt werden. Dabei geht es um Zeitpunkt der Ausbringung und Art des organischen Materials. Hierbei sollen insbesondere die Aspekte Düngewirkung, Auswaschungsgefahr, Bodenstruktur und Hygiene berücksichtigt werden.

Perspektive Grundwasser:

- Massnahme mit indirekter Wirkung. Die Anrechnung der organischen Inputs erfolgt z.Zt. noch praxisüblich durch Abschätzung und nach Suisse Bilanz / HoDuFlu. Danach werden organische Dünger nur teilweise oder rudimentär angerechnet und bilden eine zusätzliche Quelle von N-Überschüssen. Das ist zu Zwecken des Grundwasserschutzes nicht ausreichend.
- Organische Dünger sind in ihrer Umwelt- und Düngewirkung schwerer abschätzbar als mineralische Dünger. In der vorgeschlagenen Ausgestaltung werden sie über Parzellenbilanzierung und N_{\min} i.d.R. ausreichend miterfasst und angerechnet. Zumindest in den Sommermonaten führt dies vermutlich zu einer sehr effizienten Berücksichtigung und Vermeidung.
- Nach Einführung flächendeckender Massnahmen zur korrekten Berücksichtigung aller Düngarten wäre der Einsatz organischer Dünger jahreszeitabhängig nicht mehr problematisch und könnte sogar in der Region zu einer Entlastung anderer Flächen führen (Verbesserung der regionalen N-Bilanz). Ein generelles Verbot der Ausbringung im Gemüsebau ist also auch aus Umweltsicht nicht sinnvoll.
- Jedoch muss der Umgang mit Zeitpunkt der Ausbringung, Art und Menge in der Praxis vermutlich noch deutlich verbessert werden. Dazu gehört die Vermeidung N-reicher, strukturarmer organischer Dünger nach Ende der Kulturen im Herbst / Winter. Hierzu ist wahrscheinlich ein Lernprozess zum bewussten und verantwortlichen Umgang mit diesen vielfältigen Materialien nötig.

Perspektive Landwirtschaft:

- Das eingearbeitete Material wirkt sich in der Regel gut auf die Bodenstruktur, den Humusgehalt und die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen aus. Richtig verwendet kann es einen guten Anteil der Düngung darstellen.
- Gerade im konventionellen Gemüsebau (und im Gegensatz zum Bio-Gemüsebau) wird organischer Dünger aber recht selten angerechnet, weil seine Wirksamkeit direkt nach Aufbringung nicht gut dokumentiert ist oder vorsichtig mit geringer Wirkung angerechnet wird. Im Rahmen der Suisse Bilanz / HoDuFlu-Erhebungen wird er jedoch auf die Betriebsbilanz angerechnet und auch teilweise anteilig berücksichtigt, um den Düngevorgaben gerecht zu werden.
- Die Aufbringung organischer Reste anderer Betriebe hat häufig eine soziale (Entsorgungs-) Komponente.
- Bei der Verwendung organischer Dünger, insbesondere tierischer Reststoffe, sind die Hygienevorschriften zu beachten.
- Bei der Übernahme von Feldern wird teilweise organischer Dünger beliebiger Herkunft und Menge zum Humusaufbau und zur Strukturverbesserung genommen. Diese Praxis gehört je-

doch überprüft. Sinnvoll wäre ein Humusaufbau bzw. -erhalt mit eigenen Ernteresten, Zwischenfrucht und/oder teils holzigen oder strohigen Materialien mit hohem C/N-Verhältnis vor allem im Herbst.

- Damit kann auch der Besorgnis begegnet werden, die externen organischen Dünger würden für die Bodenstruktur gebraucht.
- Die Technik zur Ausbringung ist entweder auf den Betrieben oder bei Nachbarn vorhanden. Der Stand der Technik entscheidet mit über die Art der N-Emissionen (in Luft, Wasser, Boden)

Akzeptanz: mittel (in dieser Ausgestaltung)

Aufwand / Ablauf

1. Schulung zur Wirkung unterschiedlicher organischer Dünger zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit den praktisch Verantwortlichen
2. Kooperation mit beratenden Stellen vor der geplanten Ausbringung oder vor der Saison
3. Ausbringungstechnik wie bisher
4. Erfassung in der Parzellendatei von Art und Menge des Materials sowie Zeitpunkt der Ausbringung
5. Berücksichtigung bei der N-Düngeplanung
6. Stichprobenartige Analysen auf Wassergehalt, C, N, Trockensubstanz.

Voraussetzungen:

- Keine

Laufende Kosten und Ersparnisse:

- Transport- und Ausbringungskosten: 5 CHF/m³; z.B. 50 CHF für 10 m³/ha (Latscha, 2020)
- Düngerersparnis durch erhöhtes N_{min}: bei 10 m³ Rinderflüssigmist/ha und 50 % N-Ausnutzung z.B. 1,90 CHF/ha (KTBL, 2018; SZG, 2018), möglicherweise weniger Düngetermine