Stickstoffdüngung im Gemüsebau: Präzision und Praktikabilität aktueller Messinstrumente

Michael Gugger[1], Frank Liebisch[2], Torsten Schöneberg[3]
[1]Agroscope, Versuchsstation Ins, 3232 Ins, Schweiz
[2]Agroscope, Gewässerschutz und Stoffflüsse, 8046 Zürich, Schweiz
[3]Agroscope, Extension Gemüsebau, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Torsten Schöneberg, E-Mail: torsten.schoeneberg@agroscope.admin.ch
https://doi.org/10.34776/afs17-231 Publikationsdatum: 28. September 2026

Abb. 1 | Messung der Chlorophyllabsorption mit dem SPAD-Messgerät an Weisskohl. (Foto: Michael Gugger, Agroscope)

Zusammenfassung

In einem Feldversuch (2022–2024) wurden Analyseverfahren zur Beurteilung der Stickstoffversorgung im Freilandgemüsebau verglichen: die Laboranalyse des mineralischen Stickstoffs (N_{min}), das Sensorsystem Stenon-Farmlab, Nitratbestimmungen im Pflanzensaft (NitraCheck) sowie die Messung der Chlorophyllabsorption (SPAD-Sensor). Die Versuche erfolgten praxisnah in einer Fruchtfolge mit Knollensellerie, Weisskohl und Kopfsalat mit unterschiedlichen N-Düngestufen. Die N_{min}-Analyse ermöglichte die zuverlässigste Differenzierung der Düngestufen, wobei die Aussagekraft kultur- und terminabhängig war. Die Pflanzensaftanalyse erwies sich ebenso als robust und korrelierte gut mit den N_{min}-Werten im Boden. Das Stenon-Farmlab zeigte geringe Korrelationen mit den beiden anderen Methoden und bildete die Düngestufen unzureichend ab. Die SPAD-Messungen lieferten keine konsistenten Ergebnisse. Ertragsunterschiede bei unterschiedlichen N-Düngestufen traten nur 2023 (Weisskohl) und teilweise 2024 (Salat) auf. Eine Düngung über die Norm der Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) hinaus führte zu keinen signifikanten Mehrerträgen. Die Unterschiede zwischen den reduzierten Düngestufen und der ungedüngten Kontrolle waren meist nicht signifikant, was auf eine hohe Stickstoffnachlieferung und -verfügbarkeit am Standort hinweist. Die Ergebnisse verdeutlichen den Validierungsbedarf neuer Sensorverfahren sowie deren Grenzen in der Praxis. Gleichzeitig zeigen sie das Potenzial, Düngestrategien stärker am tatsächlichen N-Bedarf der Kulturen und am verfügbaren Stickstoff im Boden auszurichten und so Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit zu verbessern.

Key words: fertilisation, soil mineral nitrogen (SMN, in German N_{min}), digital nitrogen status estimation

Einleitung

Eine präzise und bedarfsgerechte Stickstoffdüngung ist im Freilandgemüsebau von zentraler Bedeutung, um den Nährstoffbedarf vieler Gemüsearten während der meist kurzen Kulturperioden zu decken und gleichzeitig hohe Erträge und eine gute Produktqualität sicherzustellen (Röber *et al.*, 2008). Aus ökonomischer wie auch ökologischer Sicht ist dabei eine effiziente Nutzung von Düngemitteln anzustreben, um Produktionskosten zu senken und möglichst viel qualitativ hochwertige, vermarktungsfähige Ware zu produzieren sowie unerwünschte Nährstoffverluste z. B. durch Nitratauswaschung ins Grundwasser zu vermeiden (Zemek *et al.*, 2020). Eine sachgerechte Düngung erfordert daher fundierte Kenntnisse über den aktuellen Nährstoffstatus des Bodens und der Pflanzen.

Zur Unterstützung ressourcenschonender und datenbasierter Düngestrategien stehen heute zahlreiche Analysetools zur Verfügung. Neben etablierten Methoden wie der Bodenanalyse des mineralischen Stickstoffs (N_{min}) und der Pflanzensaftanalyse kommen zunehmend sensorbasierte Methoden zum Einsatz, die Echtzeitdaten liefern und damit eine schnelle Anpassung der Düngung ermöglichen. Trotz dieser durch technologische Fortschritte erreichten Vorteile ist eine sorgfältige Validierung neuer Analyseverfahren unerlässlich, da unterschiedliche Messprinzipien, Zielparameter und methodische Schwächen eine unmittelbare Übertragbarkeit der Messresultate in die Praxis erschweren. Für verlässliche Düngeempfehlungen bedarf es daher eines systematischen Abgleichs mit bewährten Referenzmethoden sowie der Entwicklung kulturspezifischer Schwellenwerte auf Basis mehrjähriger Feldversuche. Im Rahmen eines dreijährigen Versuchs an der Versuchsstation Gemüsebau Ins wurden von 2022 bis 2024 verschiedene Analysemethoden hinsichtlich ihrer Praxiseignung zur Beurteilung der Stickstoffversorgung im Gemüsebau geprüft.

Material und Methoden

Im Jahr 2022 wurde an der Versuchsstation Gemüsebau Ins ein Stickstoffdüngungsversuch auf einem sandigen Lehmboden (17 % Ton, 36 % Schluff) mit geringem Humusgehalt (2,4 %) angelegt. Ziel war die Überprüfung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Stickstoffversorgung im Boden bzw. in der Pflanze. Der Versuch war in eine Fruchtfolge von verschiedenen Gemüsearten einer Betriebsgemeinschaft im Berner Seeland integriert, um praxisnahe Bedingungen sicherzustellen. Die Düngestufen orientierten sich am empfohlenen Netto-Nährstoffbedarf (Netto-Norm) für die jeweilige Kultur, gemäss GRUD-Kapitel 10 (Düngung im Gemüsebau) (Schöneberg & Liebisch, 2023). Der Netto-Nährstoffbedarf bezeichnet die Nährstoffmenge, die mit dem Erntegut abgeführt wird und daher zu ersetzen ist. Für Phosphor, Kalium und Magnesium wird er als Differenz zwischen dem Brutto-Nährstoffbedarf und dem gesamten Nährstoffgehalt der auf dem Feld verbleibenden Ernterückstände berechnet. Beim Stickstoff wird derzeit zur Berechnung des Netto-Nährstoffbedarfs nur ein Anteil von 20 % des in den Ernterückständen enthaltenen Nährstoffgehalts vom Brutto-Nährstoffbedarf abgezogen. In den vorliegenden Versuchen wurden fünf Düngestufen untersucht: ungedüngte Kontrolle, Normdüngung –50 %, Normdüngung –25 %, Normdüngung und Normdüngung +25 %. Die Düngemengen für die jeweilige Kultur sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die dreijährige Fruchtfolge umfasste Knollensellerie im Jahr 2022, Weisskohl im Jahr 2023 sowie zwei Sätze Salat (Batavia) im Jahr 2024. Der Versuch wurde in einer randomisierten Blockanlage mit vier Wiederholungen je Düngestufe durchgeführt. Jede Parzelle bestand aus drei Beeten mit jeweils 1,5 m Breite und 10 m Länge. Die Messungen zum Stickstoffgehalt im Boden erfolgten über alle drei Beete hinweg, während die Probenahme für die Stickstoffmessungen im Pflanzensaft sowie die Ernteerhebung ausschliesslich im mittleren Beet durchgeführt wurden. Kulturpflege- und Pflanzenschutzmassnahmen wurden betriebsüblich durch die Betriebsgemeinschaft durchgeführt.

Tab. 1 | Übersicht über die Stickstoff-Düngestufen für die jeweiligen Kulturen. Die Angaben zur Normdüngung und zur Ertragserwartung sind gemäss GRUD-Kapitel 10 (Düngung im Gemüsebau, Schöneberg & Liebisch, 2023) aufgeführt.

Kultur	Ertragserwartung kg/a	Ungedüngte Kontrolle [kg/ha]	Normdüngung –50 % [kg/ha]	Normdüngung –25 % [kg/ha]	Normdüngung [kg/ha]	Normdüngung +25 % [kg/ha]
Knollensellerie	600	0	95	143	190	238
Weisskohl	300	0	70	105	140	175
Salat (Batavia)	600	0	50	75	100	125

Der Knollensellerie wurde am 21.03.2022 gepflanzt und mit Vlies abgedeckt. Die Vorfrüchte waren Winterzwiebeln gefolgt von Salat. Nach der Ernte des Knollenselleries wurde Sandhafer als Gründüngung angesät, welcher beweidet wurde. Die Pflanzung des Weisskohls erfolgte am 03.03.2023 mit anschliessender Vliesabdeckung. 2023 wurden als Folgekultur Winterzwiebeln angesät, mit entsprechender Grunddüngung. Aufgrund schlechten Auflaufs wurden die Zwiebeln umgebrochen und am 13.05.2024 der erste Satz Salat gepflanzt. Der zweite Satz Salat wurde am 08.07.2024 gepflanzt.

Zur Bestimmung der Stickstoffversorgung wurden verschiedene Methoden eingesetzt: Laboranalysen von Bodenproben auf N_{min}, Messungen von N_{min} mit dem Stenon-Farmlab (Stenon GmbH, Potsdam, Deutschland), Pflanzensaftanalysen mittels NitraCheck (STEP Systems GmbH, Nürnberg, Deutschland) sowie Chlorophyllabsorption mit dem SPAD-502Plus (STEP Systems GmbH) (Abb. 1, Tab. 2). Die Probenahmen und Messungen erfolgten jeweils vor der ersten Kopfdüngung sowie zur Ernte. Bei Knollensellerie (2022) erfolgte zudem eine Beprobung vor der zweiten Kopfdüngung. Für die Bodenanalysen wurden pro Plot vier Bodenproben aus einer Tiefe von 0–30 cm entnommen und durch die Labor Ins AG in Kerzers analysiert. Eine Beprobung von tieferen Bodenschichten wurde nicht vorgenommmen, auch wenn diese je nach Kultur sinnvoll ist und entsprechend GRUD-Kapitel 10 (Düngung im Gemüsebau) (Schöneberg & Liebisch, 2023) angegeben ist. Eine Beprobung des Bodens von 0–30 cm ermöglichte einen direkten Vergleich mit dem Stenon-Farmlab. Beim Einsatz des Stenon-Farmlabs wurden drei Messpunkte je Plot erhoben, wobei jeder Messpunkt aus drei Einzelmessungen bestand. Daraus ergeben sich pro Plot neun Einzelmessungen und auf die Fläche des Versuchs (900 m^2) verteilt insgesamt 180 Einzelmessungen. Für die Analyse des Pflanzenpresssafts wurden fotosynthetisch aktive Blätter mittleren Alters von zehn Pflanzen pro Plot geerntet und gemeinsam extrahiert (Neuweiler, 2011). Die SPAD-Messungen (Abb. 1) erfolgten an insgesamt 20 fotosynthetisch aktiven, mittelalten Blättern je Plot.

Für die Ernteerhebung wurden aus der mittleren Reihe des mittleren Beetes acht Pflanzen pro Plot geerntet. Anschliessend wurden sowohl das Bruttogewicht sowie nach dem Abrüsten das Nettogewicht erfasst. Die Ernte erfolgte am 19.07.2022 für den Knollensellerie, am 12.06.2023 wurde der Weisskohl geerntet. Die Ernte des ersten Salatsatzes erfolgte am 18.06.2024, der zweite Satz wurde am 12.08.2024 geerntet.

Die statistische Auswertung wurde mit R (Version 4.2.3) (R Core Team, 2023) durchgeführt. Zur Varianzanalyse wurde ein lineares gemischtes Modell verwendet, bei dem die Düngestufe als fixer Faktor und die Wiederholung als zufälliger Faktor berücksichtigt wurden. Die Voraussetzungen der Varianzhomogenität sowie Normalverteilung der Residuen für die Varianzanalyse wurden grafisch geprüft. Zur Bestimmung von Korrelationen wurde der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient berechnet.

Tab. 2 | Übersicht über die verwendeten Methoden zur Bestimmung des Stickstoffgehalts.

Methodenname	Messprinzip	Messgegenstand
N_{min}	Laboranalyse	Bodenproben
Stenon-Farmlab	Multisensor	Im Boden
Pflanzensaft	Reflektometermessung mit Nitrat-Teststreifen	Pflanzensaft
SPAD	Chlorophyllabsorption	Intaktes Blatt

Resultate

2022 – Knollensellerie

Im ersten Versuchsjahr (2022) zeigten sich zum Messtermin vor der ersten Kopfdüngung weder in der N_{min}-Laboranalyse ($F_{(4,12)}=2{,}3$, $p=0{,}124$) noch in der Messung mit dem Stenon-Farmlab ($F_{(4,12)}=0{,}9$, $p=0{,}483$) oder in der Pflanzensaftanalyse ($F_{(4,12)}=0{,}9$, $p=0{,}518$) Unterschiede zwischen den Düngestufen (Tab. 3 und 4). Die Beprobung vor der zweiten Kopfdüngung ergab in der Variante Normdüngung +25 % höhere N_{min}-Gehalte ($F_{(4,12)}=3{,}8$, $p=0{,}032$) als in der ungedüngten Variante. Zwischen den anderen Düngestufen waren keine Unterschiede zu erkennen (Tab. 3). Bei den Messungen mit dem Stenon-Farmlab konnten zu diesem Zeitpunkt keine Unterschiede zwischen den Düngestufen inklusive Nulldüngung festgestellt werden ($F_{(4,12)}=2{,}2$, $p=0{,}128$) (Tab. 3). Die Pflanzensaftanalyse ergab in den Varianten Normdüngung –25 %, Normdüngung und Normdüngung +25 % höhere Nitratgehalte ($F_{(4,12)}=10{,}8$, $p<0{,}001$) als in der ungedüngten Variante (Tab. 4). Zum Erntezeitpunkt wurde mit der N_{min}-Laboranalyse in der Variante Normdüngung +25 % ein höherer N_{min}-Gehalt gemessen ($F_{(4,12)}=5{,}9$, $p=0{,}007$) als in den Varianten ungedüngt und Normdüngung –50 %. Insgesamt spiegelten die Ergebnisse der Laboranalysen die erwartete Differenzierung gemäss den Düngevarianten wider (Tab. 3). Die Stenon-Farmlab Messungen zeigten hingegen keine deutliche Trennung der unterschiedlichen Düngestufen ($F_{(4,12)}=1{,}4$, $p=0{,}287$). Die Nitratgehalte im Pflanzensaft entsprachen zum Erntezeitpunkt den erwarteten Abstufungen entsprechend der Düngestufen: alle gedüngten Varian-

Tab. 3 | Übersicht über die Ergebnisse (Mittelwerte ± Standardabweichung) der Bodenanalysen gemessen im Labor und mittels Stenon-Farmlab sowie die durchschnittliche Messabweichung von Stenon-Farmlab und Labor in Prozent. Ergebnisse mit unterschiedlichen Buchstaben je Jahr unterscheiden sich signifikant voneinander.

Versuchsjahr	Kultur	Messtermin	Variante	N_{min} Labor [kg N/ha]	N_{min} Stenon–Farmlab [kg N/ha]	Differenz [%]
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Ungedüngt	059,4 ± 10,6 a	64,1 ± 14,7 a	7,9
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –50 %	072,9 ± 16,4 a	73,8 ± 07,6 a	1,2
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –25 %	107,4 ± 16,8 a	74,4 ± 09,6 a	–30,7
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm	079,7 ± 09,8 a	91,3 ± 12,4 a	14,6
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm +25 %	108,5 ± 14,5 a	89,0 ± 09,5 a	–18,0
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Ungedüngt	043,2 ± 05,9 b	64,3 ± 05,4 a	48,8
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm –50 %	068,5 ± 02,2 ab	68,4 ± 02,7 a	–0,1
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm –25 %	084,3 ± 07,0 ab	69,0 ± 05,9 a	–18,1
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm	080,0 ± 16,6 ab	77,4 ± 04,4 a	–3,2
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm +25 %	092,5 ± 08,3 a	73,4 ± 04,4 a	–20,6
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Ungedüngt	022,5 ± 02,1 b	41,3 ± 02,0 a	83,6
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm –50 %	051,4 ± 06,0 b	50,3 ± 06,3a	–2,1
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm –25 %	088,4 ± 30,6 ab	60,9 ± 05,6 a	–31,1
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm	076,1 ± 17,4 ab	52,8 ± 04,8 a	–30,6
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm +25 %	140,5 ± 26,7 a	61,8 ± 11,4 a	–56,0
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Ungedüngt	21,8 ± 8,7 a	81,3 ± 5,0 a	272,9
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –50 %	16,9 ± 2,3 a	70,8 ± 1,8 a	318,9
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –25 %	24,2 ± 6,5 a	70,6 ± 2,3 a	191,7
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm	32,4 ± 9,0 a	77,4 ± 8,4 a	138,9
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm +25 %	49,0 ± 25,1 a	76,0 ± 2,1 a	55,1
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Ungedüngt	95,6 ± 72,9 a	72,3 ± 2,0 a	–24,4
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm –50 %	30,2 ± 09,0 a	66,8 ± 3,1 a	121,2
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm –25 %	21,7 ± 05,2 a	67,5 ± 4,2 a	211,1
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm	77,8 ± 47,9 a	62,8 ± 3,7 a	–19,3
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm +25 %	35,7 ± 13,8 a	70,5 ± 3,0 a	97,5
2024	Bataviasalat	Vor Pflanzung 1. Satz	Ungedüngt	39,2 ± 9,2 a	137,6 ± 10,0 a	251,0
2024	Bataviasalat	Vor Pflanzung 1. Satz	Norm –50 %	31,1 ± 2,3 a	145,4 ± 11,3 a	367,5
2024	Bataviasalat	Vor Pflanzung 1. Satz	Norm –25 %	28,3 ± 2,4 a	141,0 ± 14,1 a	398,2
2024	Bataviasalat	Vor Pflanzung 1. Satz	Norm	36,9 ± 2,4 a	127,9 ± 12,9 a	246,6
2024	Bataviasalat	Vor Pflanzung 1. Satz	Norm +25 %	28,6 ± 1,2 a	136,5 ± 11,4 a	377,3
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Ungedüngt	14,7 ± 1,3 a	66,4 ± 5,8 a	351,7
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm –50 %	14,6 ± 00,9 a	68,0 ± 2,8 a	365,8
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm –25 %	19,9 ± 04,5 a	67,1 ± 7,0 a	237,2
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm	24,9 ± 08,4 a	68,7 ± 3,6 a	175,9
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm +25 %	26,9 ± 11,2 a	72,8 ± 3,3 a	170,6
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Ungedüngt	34,6 ± 07,6 ab	59,4 ± 04,1 a	71,7
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm –50 %	48,6 ± 08,5 ab	70,9 ± 06,9 a	45,9
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm –25 %	60,6 ± 11,1 ab	73,4 ± 07,6 a	21,1
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm	72,7 ± 12,1 ab	74,5 ± 12,7 a	2,5
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm +25 %	94,6 ± 15,0 a	80,3 ± 02,9 a	–15,1

Tab. 4 | Übersicht über die Ergebnisse (Mittelwerte ± Standardabweichung) der Pflanzensaftanalysen gemessen mittels Nitracheck und der SPAD-Messung (Chlorophyllabsorption). NA = nicht gemessen. Ergebnisse mit unterschiedlichen Buchstaben je Jahr unterscheiden sich signifikant voneinander.

Versuchsjahr	Kultur	Messtermin	Variante	Nitrat Pflanzensaft [mg/l]	SPAD–Messung
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Ungedüngt	2871,7 ± 215,7 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –50 %	2788,3 ± 212,0 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –25 %	2715,0 ± 312,5 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm	2746,7 ± 227,4 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 1. Kopfdüngung	Norm +25 %	3240,0 ± 130,5 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Ungedüngt	1739,2 ± 197,3 ab	NA
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm –50 %	2556,7 ± 403,2 ab	NA
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm –25 %	3355,0 ± 220,9 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm	3182,5 ± 325,9 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor 2. Kopfdüngung	Norm +25 %	3776,7 ± 652,6 a	NA
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Ungedüngt	000 82,3 ± 00 43,9 c	NA
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm –50 %	0 2925,8 ± 0 204,3 b	NA
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm –25 %	0 4507,5 ± 00 68,3 b	NA
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm	0 5181,7 ± 1 576,7 b	NA
2022	Knollensellerie	Vor Ernte	Norm +25 %	11 075,0 ± 0 897,1 a	NA
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Ungedüngt	NA	81,3 ± 5,0 a
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –50 %	NA	70,9 ± 2,3 a
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm –25 %	NA	70,6 ± 1,8 a
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm	NA	77,4 ± 8,4 a
2023	Weisskohl	Vor 1. Kopfdüngung	Norm +25 %	NA	76,0 ± 2,1 a
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Ungedüngt	0 190,0 ± 088,2 ab	65,1 ± 3,7 a
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm –50 %	0 262,1 ± 089,7 ab	66,7 ± 1,8 a
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm –25 %	0 359,2 ± 112,0 ab	69,7 ± 2,5 a
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm	1147,5 ± 864,9 ab	70,9 ± 2,7 a
2023	Weisskohl	Vor Ernte	Norm +25 %	2226,3 ± 639,0 a	73,2 ± 2,0 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 1. Satz	Ungedüngt	0 625,0 ± 101,7 bb	21,4 ± 0,2 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 1. Satz	Norm –50 %	0 825,0 ± 036,3 ab	22,3 ± 0,3 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 1. Satz	Norm –25 %	0 722,5 ± 089,3 ab	22,5 ± 0,3 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 1. Satz	Norm	1004,2 ± 036,0 ab	22,0 ± 0,3 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 1. Satz	Norm +25 %	1162,5 ± 126,0 a	22,4 ± 0,3 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Ungedüngt	00 76,7 ± 032,7 ab	23,3 ± 1,1 ab
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm –50 %	0 943,3 ± 113,8 ab	28,2 ± 0,7 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm –25 %	1013,3 ± 294,5 a	27,1 ± 0,7 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm	1298,3 ± 149,0 a	27,1 ± 1,0 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 1. Satz	Norm +25 %	1533,3 ± 284,3 a	29,5 ± 0,5 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 2. Satz	Ungedüngt	0 743,3 ± 041,2 abcd	24,0 ± 0,5 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 2. Satz	Norm –50 %	1104,2 ± 085,6 abcd	24,5 ± 0,8 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 2. Satz	Norm –25 %	1251,7 ± 073,8 abc	25,7 ± 0,5 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 2. Satz	Norm	1574,2 ± 119,6 ab	24,9 ± 0,7 a
2024	Bataviasalat	Vor Kopfdüngung 2. Satz	Norm +25 %	2028,3 ± 157,9 a	25,7 ± 0,6 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Ungedüngt	0 594,2 ± 085,4 b	22,4 ± 1,1 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm –50 %	1079,2 ± 040,3 a	23,3 ± 0,5 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm –25 %	1121,7 ± 127,8 a	23,0 ± 0,2 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm	1296,7 ± 076,2 a	22,6 ± 0,4 a
2024	Bataviasalat	Vor Ernte 2. Satz	Norm +25 %	1268,3 ± 105,9 a	22,4 ± 0,2 a

ten wiesen höhere Nitratwerte auf, als die ungedüngte Kontrolle ($F_{(4,12)} = 22{,}6$, $p < 0{,}001$), mit den höchsten Werten in der Variante Normdüngung +25 % (Tab. 4).

Zwischen Labor- und Stenonmessungen des Boden-N_{min} konnten vor der ersten Kopfdüngung ($R = 0{,}12$, $p = 0{,}63$) und vor der zweiten Kopfdüngung ($R = 0{,}34$, $p = 0{,}14$) keine Korrelationen festgestellt werden. Zum Zeitpunkt der Ernte wurde eine moderate Korrelation beobachtet ($R = 0{,}52$, $p = 0{,}025$). Trotz dieser besseren Übereinstimmung wiesen die N_{min}-Werte zwischen Labor- und Stenonmessung die grössten Abweichungen auf (–56 % bis +84 %) (Tab. 3). An den ersten beiden Messterminen wurden Abweichungen von –18 % bis +49 % gemessen. Die genaueste Übereinstimmung wurde an allen Messterminen bei der Variante Normdüngung –50 % festgestellt (Tab. 3).

Der Vergleich der Messdaten der Laboranalyse und der Pflanzensaftanalyse ergab vor der ersten Kopfdüngung keine Korrelation ($R = 0{,}02$, $p = 0{,}950$), während vor der zweiten Kopfdüngung ($R = 0{,}61$, $p = 0{,}005$) und zum Erntezeitpunkt ($R = 0{,}79$, $p < 0{,}001$) deutlich stärkere Korrelationen bestanden. Ein ähnliches Muster zeigte der Vergleich zwischen Stenonmessungen und der Pflanzensaftanalyse: keine Korrelation vor der ersten Kopfdüngung ($R = -0{,}1$, $p = 0{,}67$), aber ein deutlich stärkerer Zusammenhang vor der zweiten Kopfdüngung ($R = 0{,}66$, $p = 0{,}002$) und zum Erntezeitpunkt ($R = 0{,}5$, $p = 0{,}033$). Zum Zeitpunkt der Ernte wurden keine Ertragsunterschiede zwischen den Düngungsvarianten festgestellt ($F_{(4,12)} = 1{,}7$, $p = 0{,}222$) (Abb. 2).

2023 – Weisskohl

Im zweiten Versuchsjahr (2023) wurden vor der ersten Kopfdüngung mit den geprüften Messmethoden keine signifikanten Unterschiede im N_{min} des Bodens zwischen den Düngestufen festgestellt, weder mit der N_{min}-Laboranalyse ($F_{(4,12)} = 1{,}9$, $p = 0{,}181$) noch mit dem Stenon-Farmlab ($F_{(4,12)} = 1{,}4$, $p = 0{,}296$) (Tab. 3). Während mit der Laboranalyse eine tendenzielle Abstufung gemäss der angelegten Düngestufen sichtbar war, ergaben die Messungen mit dem Stenon-Farmlab über die gesamte Versuchsfläche weitgehend homogene Werte. Zum Erntezeitpunkt wurden auch mit der Laboranalyse keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten festgestellt ($F_{(4,12)} = 1{,}1$, $p = 0{,}417$). An diesem Messtermin gab es eine sehr hohe Streuung der Daten

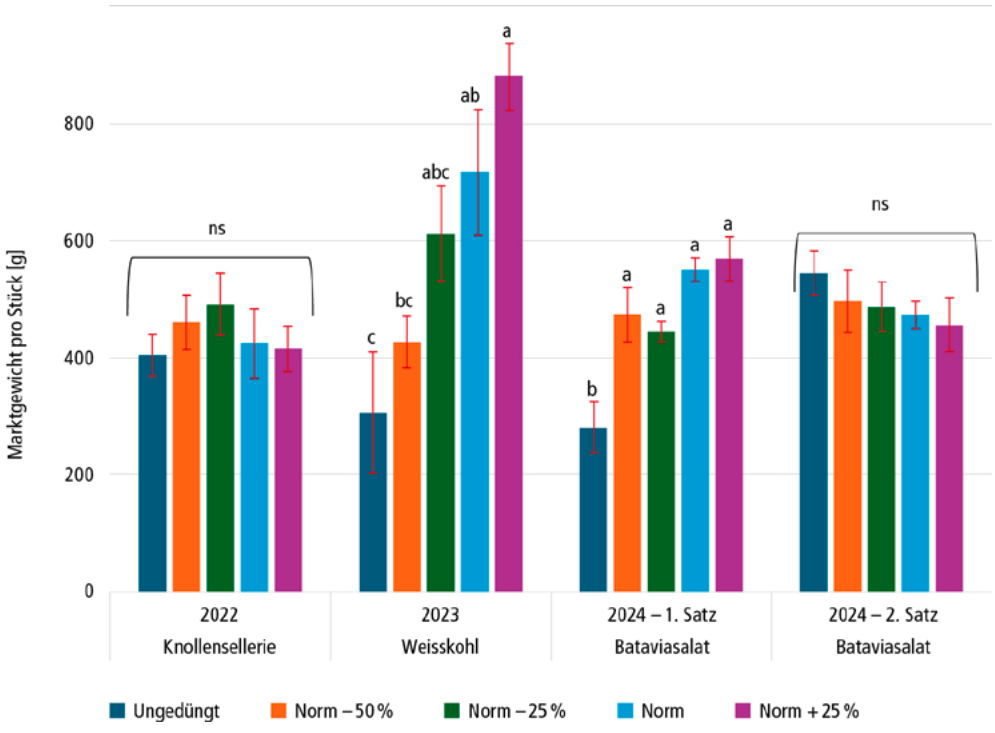

Abb. 2 | Übersicht des Marktgewichts (Mittelwert ± Standardfehler) pro Stück Erntegut in Abhängigkeit der unterschiedlichen Düngestufen. Die Normdüngung entspricht der Stickstoff-Nettonorm der jeweiligen Kultur, wie sie in den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD, www.grud.ch), Kapitel 10 aufgeführt ist. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben je Kultur unterscheiden sich signifikant voneinander (Tukey-Kramer-Test, α = 0,05); ns = nicht signifikant.

in den Varianten Ungedüngt und Normdüngung. Trotz Neubeprobung und Analyse dieser Plots wurden sehr hohe N_{min}-Werte gemessen, die besonders in der ungedüngten Kontrolle nicht eindeutig zu erklären sind. Die Stenon-Farmlab-Messungen zeigten keine Unterschiede zwischen den Varianten ($F_{(4,12)}=1,3$, $p=0,322$) und die Messwerte waren, wie beim ersten Messtermin, über die gesamte Parzelle homogen. Lediglich die Nitratgehalte im Pflanzenpresssaft ermöglichten eine Differenzierung der Düngestufen ($F_{(4,12)}=15,4$, $p<0,001$). Besonders die Variante Normdüngung +25 % unterschied sich deutlich von den Varianten Ungedüngt, Normdüngung –50 % und Normdüngung –25 % (Tab. 4). Der im Jahr 2023 erstmals eingesetzte SPAD-Sensor konnte weder vor der Kopfdüngung ($F_{(4,12)}=0,8$, $p=0,556$), noch zum Erntezeitpunkt ($F_{(4,12)}=2,8$, $p=0,078$) Unterschiede zwischen den angelegten Varianten aufzeigen (Tab. 4). Dennoch zeigte sich zum Zeitpunkt der Ernte eine Tendenz zur Differenzierung zwischen den angelegten Düngestufen. Auch im Jahr 2023 konnte keine Korrelation zwischen Labor- und Stenonmessungen festgestellt werden. Vor Kopfdüngung: $R=-0,24$, $p=0,312$, Erntezeitpunkt $R=0,03$, $p=0,893$. Am Messtermin vor der ersten Kopfdüngung überschätzte der Stenon-Farmlab immer die im Labor gemessenen Werte mit Abweichungen zwischen +55 % und +319 % (Tab. 3). Zum Erntezeitpunkt wurden die Laborwerte je nach Variante sowohl unter- als auch überschätzt, mit einer Streuung von –24 % bis +211 % (Tab. 3). Der Vergleich der Daten der Blattmessungen (Pflanzensaft und SPAD) zeigten eine gute Korrelation ($R=0,57$, $p=0,008$), wohingegen bei den Daten von Presssaft und Laboranalyse ($R=-0,16$, $p=0,512$) sowie Stenon und Presssaft ($R=0,06$, $p=0,786$) kein Zusammenhang festgestellt wurde. Zum Erntezeitpunkt waren deutliche Ertragsunterschiede zwischen den Varianten sichtbar ($F_{(4,12)}=7,0$, $p=0,004$). Die Erträge korrespondierten mit den angelegten Düngestufen, mit den höchsten Erträgen in der Variante Normdüngung +25 %, gefolgt von den Varianten Normdüngung, Normdüngung –25 % und Normdüngung –50 %. Die geringsten Erträge wurden in der ungedüngten Variante gemessen (Abb. 2).

2024 – Bataviasalat

Im dritten Versuchsjahr (2024) wurden auf der Versuchsparzelle zwei aufeinanderfolgende Sätze Bataviasalat angebaut. Weder vor der Pflanzung des ersten Satzes ($F_{(4,12)}=1,7$, $p=0,221$) noch zur Ernte des ersten Satzes ($F_{(4,12)}=0,9$, $p=0,484$) konnten in der Laboranalyse Unterschiede zwischen den angelegten Düngestufen festgestellt werden (Tab. 3). Eine klare Abstufung der Düngevarianten war zu keinem der Messtermine erkennbar. Die Messungen mit dem Stenon-Farmlab zeigten ebenfalls keine Unterschiede zwischen den Düngeverfahren am ersten ($F_{(4,12)}=0,5$, $p=0,737$) und zweiten Messtermin ($F_{(4,12)}=0,2$, $p=0,912$). Beim zweiten Satz erfolgte aufgrund der zeitlichen Nähe zwischen der Beprobung vor der Ernte des ersten Satzes und der Pflanzung des zweiten Satzes keine Analyse. Zur Ernte des zweiten Satzes konnten die Düngestufen mit der Laboranalyse deutlich unterschieden werden ($F_{(4,12)}=5,4$, $p=0,010$) (Tab. 3). Das Stenon-Farmlab zeigte nur in der ungedüngten Variante tendenziell geringere Werte ($F_{(4,12)}=1,2$, $p=0,356$) (Tab. 3). Die Stenon-Farmlab-Messungen überschätzten an den beiden Messterminen des ersten Satzes die Laborwerte deutlich, während die Abweichungen zum Erntezeitpunkt des zweiten Satzes geringer ausgeprägt waren (Tab. 3). Die Nitratgehalte im Pflanzensaft zeigten zu allen Zeitpunkten eine Differenzierung zwischen den Düngestufen (Tab. 4). Die SPAD-Messungen zeigten keine Unterschiede zwischen den Düngestufen (Tab. 4). Zwischen Labor- und Stenonmessungen bestand weder vor der Pflanzung des ersten Satzes ($R=0,10$, $p=0,673$) noch zur Ernte des ersten Satzes ($R=0,03$, $p=0,899$) eine Korrelation. Zum Erntezeitpunkt des zweiten Satzes war eine moderate Korrelation ($R=0,55$, $p=0,012$) feststellbar. Der Vergleich der Daten der Blattmessungen (Pflanzensaft und SPAD) zeigte beim ersten Salatsatz vor der Kopfdüngung keine Korrelation ($R=0,26$, $p=0,262$), wohingegen zum Erntezeitpunkt eine deutliche Korrelation vorhanden war ($R=0,79$, $p<0,001$). Beim zweiten Salatsatz wurde zu keinem Messtermine eine Korrelation festgestellt (vor Kopfdüngung: $R=0,28$, $p=0,240$; Erntezeitpunkt: $R=0,16$, $p=0,504$). Ein Vergleich der Pflanzenpresssaftmessungen mit den Bodenanalysen (Labor und Stenon) wurde nicht durchgeführt, da die Pflanzenproben drei bis vier Wochen später als die Bodenmessungen vorgenommen wurden. Diese zeitliche Differenz ergab sich daraus, dass die Presssaftanalysen vor der Kopfdüngung bzw. Ernte erfolgten, während die Bodenanalysen vor der Pflanzung bzw. vor der Ernte vorgenommen wurden.

Bei der Ernte des ersten Satzes wiesen alle Varianten, abgesehen von der ungedüngten Kontrolle, vergleichbare Kopfgewichte auf ($F_{(4,12)}=43,1$, $p<0,001$) (Abb. 2). Beim zweiten Satz wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt ($F_{(4,12)}=1,3$, $p=0,341$). Die höchsten Kopfgewichte wurden tendenziell in der ungedüngten Kontrolle festgestellt, während die niedrigsten in der Variante Normdüngung +25 % gemessen wurden (Abb. 2).

Diskussion

Technische Hilfsmittel

Die über drei Jahre durchgeführten Feldversuche zeigten ein überwiegend homogenes Bild hinsichtlich der Sensitivität und Eignung der getesteten Methoden zur Differenzierung von Stickstoff-Düngestufen in verschiedenen Gemüsekulturen. Insgesamt erwiesen sich die Laboranalyse des mineralischen Stickstoffs (N_{min}) und die Presssaftanalyse über alle Versuchsjahre hinweg als am zuverlässigsten, um Unterschiede zwischen den Düngevarianten abzubilden, während Stenon- und SPAD-Messungen nur eine eingeschränkte Sensitivität zeigten. Die Aussagekraft der N_{min}-Werte variierte jedoch deutlich in Abhängigkeit vom Messtermin und vom jeweiligen Versuchsjahr. Die je nach Versuchsjahr zum Erntezeitpunkt teils hohen N_{min}-Gehalte in der ungedüngten Kontrolle lassen sich vermutlich auf die Mineralisation von Ernterückständen des Vorjahres und aus der Mineralisierung von organischer Substanz im Boden zurückführen.

Der Stenon-Farmlab zeigte in keinem Versuchsjahr eine konsistente Differenzierung der Düngestufen, weshalb der Einsatz im Gemüsebau in dem von uns getesteten technologischen Entwicklungsstatus des Gerätes nicht empfehlenswert ist.

Der DLG-Prüfbericht (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, 2021) formuliert zwar insgesamt ein positives Ergebnis, zeigt bei näherer Betrachtung jedoch auch eine schwache Beziehung zwischen Stenon und N_{min} auf, was sich in unseren Versuchen in Form erheblicher Abweichungen zu den Labormessungen widerspiegelte. In 70 % der Fälle betrugen die Abweichungen mehr als 20 %, mit Spannweiten von –56 % (79 kg N /ha) bis +398 % (113 kg N/ha). Vergleichbar grosse Diskrepanzen bei Nitratmessungen mittels Stenon-Farmlab wurden auch von Bauer *et al.* (2022) sowie von Vikuk *et al.* (2024) berichtet. Im Gegensatz zu Bauer *et al.* (2022) und Steiger *et al.* (2025) konnten wir jedoch keine überdurchschnittliche Streuung der Stenon-Messwerte feststellen. Aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien erfassen beide Methoden nicht dieselbe Bodenprobe, sodass Abweichungen in den Messungen erwartbar sind. Die Stenon-Messungen erfolgten stets in der nahen Umgebung (Umkreis 50 cm) von der Beprobungsstelle für die Bodenproben. Obwohl innerhalb eines Feldes natürliche Heterogenitäten zu erwarten sind, zeigen die beobachteten teils hohen Abweichungen eine derzeit begrenzte Praxistauglichkeit der Methode. Dies steht im Einklang mit der Einschätzung des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) wonach bei derartigen Abweichungen keine ausreichende Zuverlässigkeit für eine praxisorientierte Anwendung gegeben ist (Lorenz *et al.*, 2023). Ähnliche Ergebnisse wurden in Deutschland, Österreich und der Schweiz berichtet, wo zwischen verschiedenen Messparametern, z.B. N_{min}, N_{gesamt} und anderen Bodennährstoffen (P, K, Mg) ebenfalls nur geringe Korrelationen festgestellt wurden (Lorenz *et al.*, 2023; Olfs, 2023; Vikuk *et al.*, 2024).

Im Gegensatz dazu wurden zwischen Laboranalyse und Pflanzensaftanalyse insbesondere zu späteren Zeitpunkten moderate bis starke Zusammenhänge beobachtet, was das Potenzial pflanzenbasierter Methoden zur Einschätzung der N-Versorgung unterstreicht. Die Pflanzensaftanalyse erwies sich insgesamt als robuste Methode zur Unterscheidung der Düngestufen. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in anderen Studien berichtet. So konnte unter Gewächshausbedingungen bei Tomate und Zuckermelone eine sehr hohe Korrelation zwischen den Nitratgehalten im Pflanzensaft und Stickstoffgehalten in der Pflanze festgestellt werden (Peña-Fleitas *et al.*, 2015). Ebenso konnten unter Gewächshausbedingungen Unterschiede in der N-Düngung mithilfe der Pflanzensaftanalyse in verschiedenen Kulturen, darunter Gurke, Melone und Paprika zuverlässig detektiert werden (Rodríguez *et al.*, 2023). Auch im Freilandversuch mit Brokkoli erwies sich die Presssaftanalyse als geeignet, um den N-Versorgungsstatus der Pflanzen abzubilden und als praxisrelevantes Managementinstrument eingesetzt zu werden (Bélec *et al.*, 2001).

Die SPAD-Messungen lieferten hingegen in keinem Versuchsjahr für die Abschätzung einer Düngeentscheidung verwertbare Unterschiede zwischen den Düngestufen und zeigten zudem keine konsistenten Korrelationen mit den anderen untersuchten Messmethoden, was auf deutliche Limitierungen in der praktischen Anwendung hinweist. Die beobachteten nicht unterscheidbaren SPAD-Werte könnten dabei auf eine geringere Sensitivität von Chlorophyll-Messgeräten bei hohen Chlorophyllgehalten hindeuten. Dieser sogenannte Sättigungseffekt äussert sich darin, dass die Messwerte trotz weiter steigender Chlorophyllgehalte ein Plateau erreichen und Unterschiede in der Stickstoffaufnahme somit nicht mehr erkannt werden können. Allerdings wurde dieser Effekt nicht in allen Gemüsekulturen beobachtet und wird vermutlich durch artspezifischen Unterschiede in der Aufnahme von nicht ertragsbildendem Stickstoff (Luxuskonsum), variierenden Chlorophyllgehalten zwischen Pflanzenarten sowie durch die verwendeten Berechnungsformeln der Messgeräte beeinflusst (Padilla *et al.*, 2018, 2020).

Zwar wurden in anderen Studien Düngereinsparungen von 12–43 % bei SPAD-gestützter Düngung berichtet,

wobei in Pflanzkulturen keine, in Säkulturen hingegen rund 10 % Ertragsverluste auftraten (Armburster *et al.*, 2014). Bei Versuchen mit Kohl, Zwiebeln und Karotten wurde zudem beobachtet, dass Stickstoffmangelsituationen nur dann zuverlässig erkannt werden können, wenn auf derselben Fläche optimal gedüngte Referenzparzellen zur Kalibrierung und Überwachung vorhanden sind (Westerveld *et al.*, 2004). Die Anwendung von Düngefenstern oder Referenzplots ist generell, und insbesondere bei der Anwendung von neuen Technologien ein sinnvolles Hilfsmittel, um lokale Bedingungen, Sorten und Anbausysteme besser zu verstehen und Empfehlungen und Düngemassnahmen unabhängig zu überprüfen bzw. zu bewerten.

Einordung des Düngebedarfs

Trotz deutlicher Unterschiede in den N_{min}-Gehalten konnten im Jahr 2022 keine Ertragsunterschiede festgestellt werden. Bei dem im Frühjahr 2022 unter Vlies angebautem Sellerie zeigte sich einerseits eine tendenziell erhöhte Mineralisation aus dem Boden, andererseits führten sehr hohe Temperaturen während der letzten Wachtumsphase (13 Tage > 25 °C) sowie kurz vor der Ernte (8 Tage > 25 °C) vermutlich zu einem Wachstumsstopp und einer eingeschränkten Nährstoffaufnahme. Zudem erfolgte der Anbau des Selleries für den Frischkonsum, weshalb die Ernte aufgrund der Marktlage vergleichsweise früh erfolgte und das vollständige Ertragspotenzial zu diesem Zeitpunkt wahrscheinlich noch nicht ausgeschöpft war. Unter diesen Umständen war die N-Versorgung offenbar auch bei den reduzierten Düngestufen ausreichend. Dies bestätigte sich auch im Jahr 2024, in dem sogar ohne Düngung im zweiten Satz Bataviasalat keine Ertragseinbussen beobachtet wurden. Die N-Nachlieferung aus der organischen Bodensubstanz und den Ernterückständen der Vorfrucht sowie potenzielle Reststickstoffmengen aufgrund der bereits langjährigen gemüsebaulichen Nutzung der Fläche dürften die Gründe dafür sein. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in anderen Gemüsekulturen beobachtet: bei Salat, Lauch und Rosenkohl hatte eine reduzierte Stickstoffdüngung keinen Einfluss auf den marktfähigen Ertrag oder die Produktqualität, während bei Spinat und Karotten eine geringe Reaktion auf reduzierte N-Gaben festgestellt wurde (Canali, 2008; D'Haene *et al.*, 2018). Im Gegensatz dazu reagierte Blumenkohl deutlich auf verminderte Düngung mit klaren Ertragseinbussen (D'Haene *et al.*, 2018). Beim Weisskohl im Jahr 2023 sowie beim ersten Salatsatz 2024 zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des Ertrags vom Düngeniveau, mit signifikant geringeren Erträgen in der ungedüngten Kontrolle. Beim zweiten Salatsatz traten hingegen keine signifikanten Unterschiede auf. Die höchsten Kopfgewichte in der ungedüngten Variante lassen sich auf die nahezu vollständige Verfügbarkeit des Stickstoffs aus den Ernteresten der Vorkultur (Salat) in Kombination mit einer erhöhten Mineralisation erklären. Dies verdeutlicht, dass eine gezielte, an den tatsächlichen Bedarf angepasste Stickstoffversorgung entscheidend ist, um sowohl hohe Erträge als auch eine gute Produktqualität zu gewährleisten. Ergänzend zu den untersuchten Methoden können auch Schätzmetoden (z. B. korrigierte Norm, kulturbegleitendes N_{min}-Sollwertsystem), Expertenmodelle (N-Expert) sowie andere praxisnahe Vor-Ort-Methoden (Lorenz *et al.*, 2023) dazu beitragen, fundierte Entscheidungen zu treffen und von der heute üblichen GRUD-Düngeempfehlung, mit festgelegten N-Düngevorgaben, abweichende Massnahmen abzusichern. Solche Ansätze bieten die Möglichkeit, die Stickstoffversorgung gezielter an den tatsächlichen Bedarf der Kultur anzupassen, Ertrags- und Qualitätsverluste zu vermeiden und gleichzeitig den Ressourceneinsatz nachhaltiger zu gestalten.

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass unter praxisnahen Feldbedingungen im Gemüsebau derzeit die klassische Laboranalyse des mineralischen Stickstoffs im Boden sowie die Nitratbestimmung im Pflanzensaft die zuverlässigsten Methoden zur Differenzierung von N-Düngestufen darstellen. Die Aussagekraft der SPAD-Messung erwies sich dagegen als limitiert, und das Stenon-Farmlab bietet in dem von uns getesteten Entwicklungsstand keine verlässliche Alternative zur etablierten Laboranalyse. Die Versuche verdeutlichten zudem, dass die Norm-düngung in allen Fällen ausreichend war, um die geforderten Marktgewichte zu erreichen, gleichzeitig jedoch Potenzial für eine reduzierte N-Düngung besteht, insbesondere bei Kulturen, deren Hauptvegetationszeit in der warmen Jahreszeit stattfindet. Sowohl laborbasierte als auch technische Messmethoden können dabei helfen, die jeweiligen Situationen richtig einzuschätzen und die N-Düngemassnahmen gezielt anzupassen. Der deutliche Einfluss saisonaler und jahresabhängiger Faktoren auf die N_{min}-Dynamik und Ertragsbildung unterstreicht die Notwendigkeit, N-Diagnoseverfahren mehrfach im Verlauf der Vegetationsperiode anzuwenden und ihre Ergebnisse standortspezifisch zu validieren. Die beobachteten Schwankungen der Messmethoden unterstreichen zudem den Bedarf an robusten, validierten Schnelltests, um eine präzise und ressourcenschonende N-Düngung im Gemüsebau zu ermöglichen. Daher sollte weiterhin intensiv an der Weiterentwicklung praxistauglicher Analysetools gearbeitet werden, um eine nachhaltige Nährstoffversorgung im Gemüsebau zu unterstützen. ■

Dank

Wir bedanken uns bei dem Betrieb Occhini-Löffel für die Unterstützung bei der Durchführung der Kulturmassnahmen. Vielen Dank an die Berner Fachhochschule (Stefan Gfeller) und Thomas Wyssa für das zur Verfügung stellen des Stenon-Farmlab. Ebenso bedanken wir uns bei den Partnern der Versuchsstation Ins: den Kantonen Bern und Freiburg sowie der Gemüseproduzenten-Vereinigung der Kantone Bern und Freiburg für die Unterstützung.

Literatur

- Armbruster, M., Heger, A., Laun N., Wiesler, F. (2014). Integriertes Stickstoff-Managementsystem als Massnahme zur Verbesserung der N-Effizienz in der Pflanzenproduktion – dargestellt am Beispiel Gemüsebau. In Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.), Kongressband 2013 Berlin. VDLUFA-Kongress: Untersuchen, Bewerten, Berten, Forschen: 125 Jahre VDLUFA im Dienste von Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucherschutz (VDLUFA-Schriftenreihe, Band 69, S. 182–191). VDLUFA-Verlag. ISBN 978-3-941273-15-3.
- Bauer, C., Mann, T., Höcker S., Raible, S., Butz, A., Breuer, J., Möller, K. (2022). Digitale und konventionelle Bodenanalyse – Erste Vergleichsergebnisse des Einsatzes des Stenon FarmLab-Gerätes unter praxisnahen Bedingungen in Baden-Württember. In Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.), Kongressband 133. VDLUFA-Kongress: Sensorsysteme in der Landwirtschaft – Chancen und Herausforderungen (VDLUFA-Schriftenreihe, Band 78, S. 33). VDLUFA-Verlag. ISBN 978-3-941273-34-4.
- Bélec, C., Villeneuve, S., Coulombe, J., & Tremblay, N. (2001). Influence of nitrogen fertilization on yield, hollow stem incidence and sap nitrate concentration in broccoli. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(4), 765–772. https://doi.org/10.4141/P00-108
- Canali, S., Montemurro, F., Tittarelli, F., Masetti, O. (2008). Effect of nitrogen fertilisation reduction on yield, quality and N utilisation of processing spinach. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Vol 6 (3&4) : 242–247.
- D'Haene, K., Salomez, J., Verhaeghe, M., Van De Sande, T., De Nies, J., De Neve, S., & Hofman, G. (2018). Can optimum yield and quality of vegetables be reconciled with low residual soil $_{min}$eral nitrogen at harvest? *Scientia Horticulturae*, **233**, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.034
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft. (2021). DLG-Prüfbericht 7197: Stenon FarmLab mit Softwareversion d-1.3.0 und Kalibriermodell p-2.1.0 – NO_3-Gehalt, N_{min}-Gehalt, Bodenfeuchte. https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7197.pdf
- Lorenz, F., Liebisch, F., Lohr, D., Olfs H-W. (2023). Vor-Ort-Methoden zur Bodenuntersuchung. VDLUFA-Schriftenreihe 79/2023. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt. ISBN 978-3-941273-37-5.
- Neuweiler R. (2011). Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW.
- Olfs, H-W. (2023). Erfahrungen beim Einsatz des Stenon FarmLab zur Erfassung der pflanzenverfügbaren P-, K-und Mg-Gehalte sowie der pH-Werte von Böden auf Praxisflächen und in Dauerversuchen. In Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 33. S 147-148. 64. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.
- Padilla, F. M., Farneselli, M., Gianquinto, G., Tei, F., & Thompson, R. B. (2020). Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. *Agricultural Water Management*, **241**, 106356. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356
- Padilla, F. M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M. T., De Souza, R., & Thompson, R. B. (2018). Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. *Sensors*, **18**(7), 2083. https://doi.org/10.3390/s18072083
- Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Thompson, R. B., Farneselli, M., & Padilla, F. M. (2015). Assessing crop N status of fertigated vegetable crops using plant and soil monitoring techniques. *Annals of Applied Biology*, **167**(3), 387–405. https://doi.org/10.1111/aab.12235
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.
- Röber, R., Schacht, H., & Belau, T. (Hrsg.). (2008). *Pflanzenernährung im Gartenbau: [Mit] 190 Tabellen* (4. Aufl). Ulmer.
- Rodríguez, A., Peña-Fleitas, M. T., Padilla, F. M., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2023). Effect of cultivar on measurements of nitrate concentration in petiole sap and leaf N content in greenhouse soil-grown cucumber, melon, and sweet pepper crops. *Scientia Horticulturae*, **320**, 112200. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112200
- Schöneberg T., Liebisch F. (2023). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kuturen in der Schweiz (GRUD 2023) – Kapitel 10. *Agroscope Spezialpublikation*. https://doi.org/10.34776/grud23-10
- Steiger, A., Qaswar, M., Bill, R., Mouazen, A. M., & Grenzdörffer, G. (2025). Comparing the handheld Stenon FarmLab soil sensor with a Vis-NIR multi-sensor soil sensing platform. *Smart Agricultural Technology*, **10**, 100717. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100717
- Vikuk, V., Spirkaneder, A., Noack, P., & Duemig, A. (2024). Validation of a sensor-system for real-time measurement of $_{min}$eralized nitrogen in soils. *Smart Agricultural Technology*, **7**, 100390. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100390
- Westerveld, S. M., McKeown, A. W., McDonald, M. R., & Scott-Dupree, C. D. (2004). Assessment of Chlorophyll and Nitrate Meters as Field Tissue Nitrogen Tests for Cabbage, Onions, and Carrots. *HortTechnology*, **14**(2), 179–188. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.14.2.0179
- Zemek, O., Neuweiler, R., Spiess, E., Stüssi, M., & Richner, W. (2020). Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau-eine Literaturstudie. *Agroscope Science*, (95), 117. https://doi.org/10.34776/as95g