

Standortangepasste Stickstoffdüngung: aktuelle Methoden und Erfahrungen

Joël Grossrieder¹, Cecil Ringger², Francesco Argento^{2,3}, Raphaël Grandgirard¹, Thomas Anken³, Frank Liebisch²

¹Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg, 1725 Posieux, Schweiz

²Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

³Agroscope, 8356 Ettenhausen, Schweiz

Auskünfte: Frank Liebisch, E-Mail: frank.liebisch@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs13-103g> Publikationsdatum: 12. Juli 2022



Abb. 1 | Standortangepasste Stickstoffdüngung – Feldversuche in Grangeneuve.
(Foto: Joël Grossrieder, Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg)

Zusammenfassung

Die Reduktion der Stickstoff(N)-Überschüsse ist ein Fokusthema der aktuellen Schweizer Agrarpolitik. Verschiedene Methoden der standortangepassten N-Düngung (StaD) haben das Potenzial, bestehende N-Überschüsse zu reduzieren, werden aber in der Schweizer Landwirtschaftspraxis kaum angewendet. Agroscope und das landwirtschaftliche Institut Grangeneuve haben fünf Methoden der StaD in Winterweizenversuchen an zwei Standorten und in zwei Jahren getestet. Dies waren: Düngung nach der Methode der korrigierten Norm, N_{min} , N-Tester, Nitracheck und ein nicht berührendes optisches Verfahren zur teilflächenspezifischen Düngung. Die Resultate zeigen, dass durch die StaD der Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Produktivität entschärft werden kann. Bei den unter-

suchten Methoden der StaD wurden zwischen –40 % und +10 % der N-Menge der Düngernorm eingesetzt. Generell hatten alle Methoden im Vergleich zur Norm und der stark gedüngten Kontrolle eine höhere N-Nutzungseffizienz ohne signifikante Ertragsreduktion. Die Proteingehalte waren erwartungsgemäss durch die N-Düngung beeinflusst, aber auch stark durch Standort, Jahr und Sorte bedingt. In diesem Kontext bedarf es weiterer Forschung für mehr Anwendungssicherheit. Die erreichbare Effizienzsteigerung zeigt, dass die StaD signifikante Beiträge zur Reduktion von Stickstoffüberschüssen leisten kann.

Keywords: Nitrogen management, winter wheat, site-specific, precision farming, variable rate application.

Einleitung

Stickstoff (N) ist ein wichtiger Baustein von organischen Verbindungen wie Nuklein- und Aminosäuren, die das Wachstum von Pflanzen erst ermöglichen (Sinclair, 1990). Sein bedarfsgerechter Einsatz in der Pflanzenproduktion gewährleistet Ertrag und Qualität von Ernteprodukten (Alva, 2004; Chatterjee *et al.*, 2018; Zörb *et al.*, 2018). Gleichzeitig kann N in verschiedenen Formen aus landwirtschaftlichen Produktionssystemen entweichen. Zu den bedeutendsten Verlustwegen von N aus der Landwirtschaft zählen die Auswaschung von Nitrat (NO_3) ins Grundwasser, die durch die Denitrifikation verursachte Verflüchtigung des Treibhausgases Lachgas (N_2O) in die Atmosphäre oder von Ammoniak (NH_3), das ebenfalls in die Atmosphäre entweicht und in empfindliche Ökosysteme gelangen kann (Omara *et al.*, 2019; Zörb *et al.*, 2018). Im Ackerbau besteht ein erhöhtes Risiko für Nitratauswaschung, wenn mehr N in Form von Nitrat vorliegt, als die Pflanzen unmittelbar aufnehmen können. Eine standortangepasste N-Düngung (StaD) kann die Nitratauswaschung (Delgado *et al.*, 2005), aber auch das Risiko für andere N-Verluste reduzieren.

Im In- und Ausland werden verschiedene Methoden zur Umsetzung der StaD vorgeschlagen. In den Grundlagen der Düngung für landwirtschaftliche Kulturen in der Schweiz (GRUD, Sinaj & Richner, 2017) werden die Methode der korrigierten N-Norm sowie die N_{\min} -Methode für die Schweiz ausführlich beschrieben. Weiter gibt es etablierte Schnelltests, mit denen der Nitratgehalt im Pflanzensaft (Jemison & Fox, 1988) oder der Chlorophyllgehalt der Blätter (N-Tester) gemessen wird (Sinaj & Richner, 2017). Anhand dieser Parameter kann der Ernährungsstatus der Kulturpflanzen abgeschätzt werden. Berührungslose, sensorbasierte Verfahren, wie die der Fernerkundung, bieten ebenfalls Möglichkeiten, den N-Bedarf von Pflanzenbeständen zu ermitteln und auf Parzellenebene teilflächenspezifisch zu bewirtschaften (Argento *et al.*, 2020; Gnyp *et al.*, 2016). Dafür werden anhand von Spektraldaten sogenannte Vegetationsindizes berechnet, die Auskunft über die vorhandene Biomasse und deren N-Ernährungsstatus geben.

Winterweizen ist mit rund 80 000 ha (2019) die mit Abstand meistangebaute Ackerkultur der Schweiz (BLW, 2021), weshalb eine Optimierung der N-Düngung wesentlich zur Reduktion von N-Überschüssen beitragen kann. Die Prinzipien der StaD lassen sich aber auch auf andere Ackerkulturen anwenden. In dieser Studie wurden verschiedene Methoden der StaD im Winterweizen auf folgende Fragestellungen untersucht:

1. Eignen sich verfügbare Methoden der StaD zur N-Düngebedarfsermittlung von Winterweizen und sind sie geeignet, Ertrag und Qualität zu gewährleisten?
2. Können die Methoden der StaD zu einer besseren N-Nutzungseffizienz und damit zur Reduktion der N-Überschüsse beitragen?
3. Sind diese Methoden in der Praxis mit einem angemessenen Aufwand anwendbar?

Dafür wurden am Standort Grangeneuve die Methode der korrigierten Norm (korrNorm), die Düngung nach N_{\min} -Methode, der N-Tester (Chlorophyllgehalt) sowie der Nitratecheck (Nitratanalyse im Pflanzensaft) in den Jahren 2019 und 2020 angewendet und verglichen. Am Standort Tänikon wurde in den gleichen Jahren ein optisches Messverfahren zur teilflächenspezifischen Düngung mit N_{\min} Düngung kombiniert. An beiden Versuchsstandorten wurde mit einem für Winterweizen in der Praxis üblichen Drei-Split-Düngeverfahren mit Ammonsalpeter gedüngt und eine ungedüngte bzw. erhöhte Düngung zu Vergleichszwecken integriert.

Material und Methoden

Versuchsstandorte und Versuchsdesign

In den beiden Jahren 2019 und 2020 wurden an den Standorten Grangeneuve (46,76975° N, 7,11392° E) und Tänikon (47,4790021° N, 8,9059287° E) verschiedene Methoden der StaD getestet (Abb. 2). Der Versuch in Grangeneuve wurde auf Kleinparzellen (7,5 m²) mit vier Wiederholungen und den Sorten Baretta (Agroscope/DSP-Delley, Schweiz) im Jahr 2019 (F1a) und CH Claro (Agroscope/DSP-Delley, Schweiz) im Jahr 2020 (F1b) durchgeführt. Der Dünger wurde auf den Kleinparzellen von Hand ausgebracht. In Tänikon wurde der Versuch in Praxisfeldern mit Grossparzellen (15 m × 90 m = 1350 m²) angelegt, um der Ausbringtechnik mit einem Scheibenstreuer (Sulky X40+ ECONOV, Sulky-Burel, Châteaubourg, Frankreich) gerecht zu werden. Es wurden die Sorten Arnold (Saatzucht Donau, Österreich) im Jahr 2019 (F2, F3, F4) und Montalbano (Agroscope/DSP-Delley, Schweiz) im Jahr 2020 (F5, F6, F7) angebaut.

An beiden Versuchsstandorten wurde mineralisch mit Ammonsalpeter (50 % $\text{NH}_4\text{-N}$ / 50 % $\text{NO}_3\text{-N}$) gedüngt. Die Düngung wurde in drei Splits aufgeteilt und in den Wachstumsstadien BBCH 23–25, BBCH 31–32 und BBCH 39–50 ausgebracht (Tab. 2).

Am Standort Grangeneuve wurde in beiden Jahren ein Herbizid (Othello®, Bayer, Deutschland) zur Unkraut-

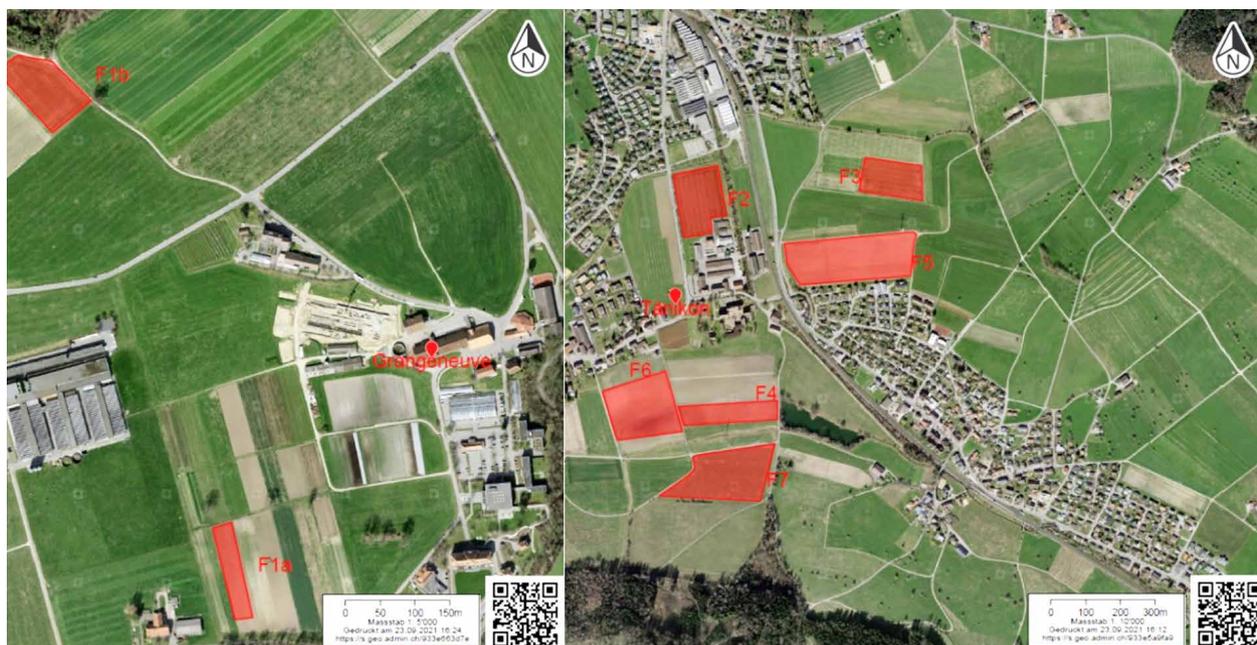


Abb. 2 | Luftaufnahme der beiden Versuchsstandorte Grangeneuve, (F1a, F1b) und Tänikon (F2-7).

regulierung im Frühjahr eingesetzt. Weiter wurde ein Wachstumsregulator (CCC 720®, Bayer, Deutschland) und ein Fungizid (Aviator® Xpro, Bayer, Deutschland) appliziert. Am Standort Tänikon wurde die Unkrautregulierung kombiniert mit einem Präzisionsstriegel (Treffler, Deutschland) und chemisch (Pacifica Plus® und Mero®, Bayer, Deutschland) durchgeführt. Wichtige Parzellendaten sind in Tab. 1 aufgeführt.

Umsetzung der standortangepassten N-Düngung

In Grangeneuve wurden vier Methoden der StaD getestet: die Methode der korrigierten Norm (korrNorm), die N_{\min} -Methode, der N-Tester (YARA GmbH & Co. KG, Deutschland) und Nitratecheck (Step Systems GmbH, Deutschland). Zusätzlich wurde eine kombinierte Variante (Combi = N_{\min} + Nitratecheck) geprüft. Neben der

ungedüngten Kontrolle (Minus) wurde eine Variante mit einem sehr hohen N-Input (Plus, $1,5 \times \text{Norm}_{\text{Ertrag}}$) als Kontrolle angelegt. In Tänikon wurde eine weitere Methode der StaD, die teilflächenspezifische Düngung (TSD), mit der ertragskorrigierten N-Düngenorm ($\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$) sowie mit einer Minus- und Plus-Kontrolle verglichen (Tab. 2).

Im Folgenden ist die Düngebemessung der untersuchten Methoden beschrieben.

1. $\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$

Die N-Norm für Winterweizen (140 kg N/ha, Referenertrag 60 dt/ha) wurde gemäss den GRUD (Sinaj & Richner, 2017) den Ertragserwartungen (Grangeneuve: 70 dt/ha, Tänikon: 75 dt/ha) angepasst.

Tab. 1 | Parzellendaten der beiden Versuchsstandorte Grangeneuve und Tänikon.

Standort/Jahr	Parzelle	Saatzeitpunkt	Vorfrucht	pH ¹	C _{org} (%)	Ton (%)	N _{min} ²
Grangeneuve 2019	1a	10.10.2018	Kartoffeln	7,6	4,8	20	116
Grangeneuve 2020	1b	24.10.2019	Mais	6,4	1,6	15	70
Tänikon 2019	2	09.10.2018	Mais	6,6	2,3	40	34
	3	12.10.2018	Mais	6,8	1,3	26	18
	4	05.11.2018	Kunstwiese	7,6	3,2	29	58
Tänikon 2020	5	24.10.2019	Mais	7,7	1,6	27	31
	6	26.10.2019	Zuckerrübe	7,8	1,9	28	43
	7	14.11.2019	Raps	7,7	3,8	27	37

¹H₂O-Methode (Sinaj & Richner, 2017); ²N_{min} 0–90 cm bei Vegetationsbeginn (Sinaj & Richner, 2017).

$\text{Norm}_{\text{Ertrag}} \text{ (kg N/ha)} = \text{Norm (kg N/ha)} + ((\text{Ertragserwartung (dt/ha)} - \text{Referenzertrag (dt/ha)}) * 1 \text{ kg N/dt})$

Die $\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$ betrug demnach 150 kg N (Grangeneuve), 155 kg N pro Hektare (Tänikon).

2. Die Methode der korrigierten Norm

Bei der korrNorm (GRUD 2017: Kapitel 8) wurden zusätzlich zur $\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$ Faktoren zu Boden- Umwelt- und Kulturmassnahmen zur Berechnung der N-Düngemenge berücksichtigt:

- Einfluss der organischen Substanz und des Tongehalts des Bodens (f_{OSB}) auf die N-Mineralisierung.
- Einfluss der Vorfrucht und des Einarbeitungszeitpunkts auf die N-Mineralisierung (f_{VF}).
- Der Anteil des im Vorjahr mit Hofdüngern ausgebrachten organischen N (N_{org}), der im Jahr nach der Ausbringung verfügbar wird (f_{NOD}).
- Einfluss der Niederschläge im Winter und Frühjahr auf die Auswaschung von N (f_{Regen}).

Die daraus resultierende N-Düngemenge wurde schliesslich den drei Splits zugeteilt, wobei der zeitliche Einfluss der Korrekturfaktoren berücksichtigt wurde. So war beispielsweise die starke Korrektur der N-Menge im Jahr 2019 vor allem auf die Vorfrucht Kartoffeln sowie die unterdurchschnittlichen Winterniederschläge zurückzuführen. Aus diesem Grund wurden vor allem die Mengen der ersten und zweiten Gabe reduziert. Im Jahr 2019 betrug f_{OSB} , f_{VF} sowie f_{Regen} -10, -10 und -20 (Summe -40). Ausgehend von einer Verteilung der drei Splits von 40/70/40 (bei einer Standardmenge von 150 kg N), wurden f_{VF} und f_{Regen} dem ersten und zweiten Split abgezogen und f_{OSB} dem dritten. Daraus resultierte die Aufteilung 30/50/30.

3. N_{min} -Methode

Bei der N_{min} -Methode wurde der Gehalt an Nitrat- (NO_3^- -N) und Ammonium-N (NH_4^+ -N) im Boden für die drei Tiefen 0–30 cm, 30–60 cm sowie 60–90 cm an einer Mischprobe für das gesamte Feld gemessen, um die Düngermenge für den 1. Split zu bestimmen. In Tänikon

Tab. 2 | Applizierte Stickstoffmenge (Mittelwert \pm Standardabweichung) der Düngemethoden: Splits einzeln, total und im Verhältnis zur $\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$ (als % der $\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$). Splits mit einer Standortanpassung sind grün eingefärbt.

Ort/Jahr	Düngemethode	Split 1 [kg N/ha]	Split 2 [kg N/ha]	Split 3 [kg N/ha]	Total [kg N/ha]	% der Norm ^c [%]
Grangeneuve 2019	Minus	0	0	0	0	0
	Plus	65	80	80	225	150
	korrNorm	30	50	30	110	73
	N_{min}	28,5 \pm 12,7	70	40	138,5 \pm 12,7	92
	N-Tester	40	26,5 \pm 5	25 \pm 5,8	91,5 \pm 5	61
	Nitracheck	40	37,5 \pm 5	55 \pm 5,8	132,5 \pm 9,6	88
Grangeneuve 2020	Minus	0	0	0	0	0
	Plus	65	80	80	225	150
	korrNorm	40	60	30	130	87
	N_{min}	70,5 \pm 7,5	60	30	160,5 \pm 7,5	107
	N-Tester	40	55 \pm 5,8	70	165 \pm 5,8	110
	Nitracheck	40	60	47,5 \pm 5	147,5 \pm 5	98
Tänikon 2019	Combi	70,5 \pm 7,5	51,25 \pm 2,5	40	161,75 \pm 9	108
	Minus	0	0	0	0	0
	$\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$	70	60	23/24 ^a	153/154 ^a	102
	Plus	100	60	0/18 ^b	160/178 ^b	111
Tänikon 2020	TSD	68,4 \pm 4,7	59,8 \pm 4,8	18 \pm 3,1	145,8 \pm 4,2	97
	Minus	0	0	0	0	0
	$\text{Norm}_{\text{Ertrag}}$	70	60	25	155	103
	Plus	90	70	0	160	107
Tänikon 2020	TSD	42,7 \pm 7,5	39,1 \pm 12,3	21,9 \pm 3,4	103,75 \pm 14,8	69
	Plus	90	70	0	160	107

^aF2/F3; ^bF2 & F3/ein Plot in F2; ^cNorm aus den GRUD, angepasst an Referenzertrag 70 dt/ha (150 kg N/ha = 100%).

wurde 2019 nur der N_{\min} -Gehalt (kg/ha) von 0–60 cm berücksichtigt, im Jahr 2020 hingegen von 0–90 cm. Die Mengen für den 2. und 3. Split wurden anhand der $Norm_{\text{Ertrag}}$ und Erfahrungswerten in Anlehnung an die GRUD (Kapitel 8) festgelegt.

4. N-Tester

Mit dem N-Tester wird der SPAD-Index (Soil Plant Analysis Development) vor dem 2. und 3. Split ermittelt, der Aufschluss über den Chlorophyllgehalt der Pflanzen gibt. Dabei wird gemessen, wie viel Licht im roten und nahinfraroten Bereich durch das Chlorophyll im Blatt absorbiert wird. Da es einen signifikanten Einfluss der Sorte auf den SPAD-Index gibt (Monostori *et al.*, 2016), wird bei der Anwendung, wie sie die Firma YARA in Deutschland anbietet, der Faktor Sorte für die Bestimmung der N-Menge einbezogen. Da es für Schweizer Sorten keine Kalibrierung gibt, konnte dieser Faktor nicht oder nur bedingt angewendet werden. So wurde die N-Menge anhand einer Tabelle der Firma LANDOR angepasst. Diese Werte basieren jedoch nicht für alle Sorten auf mehrjährigen Versuchen.

5. Nitratecheck

Bei der Methode nach Nitratecheck wurde der Nitratgehalt des Pflanzensaftes in den Stadien BBCH 31 und 39 vor den jeweiligen Düngergaben (2./3. Split) gemessen. Dabei wurde der Pflanzensaft von 50 Trieben durch das Auspressen an der Basis extrahiert. Dieser wurde auf Nitrat-Teststäbchen (MQuant®, Merck, Deutschland) gegeben und mit dem Nitratecheck 404, ausgewertet. Zur Festlegung der N-Düngermenge wurden die Empfehlungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft verwendet (Ernst *et al.*, 2003), welche neben der gemessenen Nitratkonzentration auch Ertrags- und Qualitätsziel (Brotgetreide) berücksichtigt.

6. Combi

Bei der Methode Combi wurden N_{\min} (1. Split) und Nitratecheck (2. und 3. Split) kombiniert.

7. Teilflächenspezifische Düngung

In Tänikon wurde für die Bestimmung der N-Düngermenge teilflächenspezifische Applikationskarten erstellt anhand der N_{\min} -Werte (1. Split) und einem sensorbasierten, optischen Vegetationsindex (2. und 3. Split). Als Vegetationsindex wurde der «normalized difference red edge» Index (NDRE) verwendet (Barnes *et al.*, 2000), da zwischen diesem und der N-Aufnahme des Pflanzenbestandes ein starker Zusammenhang besteht (Argento *et al.*, 2022). Dieser Zusammenhang wurde für die Bestim-

mung der N-Düngermenge der Teilflächen genutzt, indem das relative Verhältnis des NDRE der Teilfläche zum Mittelwert der Parzelle berechnet und auf die $Norm_{\text{Ertrag}}$ angewendet wurde.

N-Nutzungseffizienz NUE

Die N-Effizienz (NUE) wurde wie folgt berechnet:

$$NUE = \text{Kornertrag (kg/ha)} / \text{applizierter N-Dünger (kg/ha)} \quad (\text{Basso et al., 2016})$$

Der Kornertrag wurde dafür auf 14,5 % Feuchtigkeit standardisiert. Dieser düngerbasierte NUE-Indikator wird in der angewandten Forschung oft verwendet, um den Effekt des N-Inputs auf die Produktivität zu beurteilen (Congreves *et al.*, 2021). Die Berechnung komplexerer Effizienzindikatoren war mit den verfügbaren Daten (z.B. keine Stroherträge) nicht möglich.

Statistik

Die beiden Standorte wurden einzeln ausgewertet. Um den Effekt von Düngemethode und Jahr zu evaluieren, wurde eine 2-faktorielle ANOVA (Y ~ Düngemethode × Jahr) durchgeführt (in R 4.1.0, R Studio V1.41717). Als Post-hoc-Test wurde der Tukey-HSD-Test durchgeführt, um zu ermitteln, welche Düngemethoden sich unterscheiden. Da mit dem Jahr an beiden Standorten auch Sorte und Feld gewechselt haben, können diese den Jahreseffekt beeinflusst haben. Der Versuch in Grangeneuve wurde in randomisierten Blöcken mit vier und in Tänikon mit drei Wiederholungen angebaut.

Resultate

StaD reduziert den N-Input

Je nach Jahr (bzw. Sorte/Standort) und Düngemethode resultierten N-Einsparungen bis zu –39 %, (59 kg N/ha) oder eine Mehrdüngung von bis +10 % (15 kg N/ha) gegenüber der $Norm_{\text{Ertrag}}$ (Tab. 2). 2019 resultierten alle getesteten Methoden der StaD an beiden Standorten in einer N-Einsparung gegenüber der $Norm_{\text{Ertrag}}$ (zwischen –3 bis –40 %). 2020 hingegen war dies nur bei einem Teil der Methoden der Fall (Nitratecheck –2 %, korrNorm –13 %, TSD –31 %); die anderen empfahlen eine Mehrdüngung (N_{\min} +7 %, Combi +8 %, N-Tester +10 %). Beim Vergleich der StaD-Methoden sticht die N-Düngerempfehlung des N-Testers durch grosse Schwankungen heraus: 2019 hatte er das grösste N-Einsparpotenzial, 2020 hingegen die stärkste Mehrdüngung gegenüber der $Norm_{\text{Ertrag}}$. Von den Methoden der GRUD hatte die korrNorm in beiden Jahren einen tieferen N-Input (ca.

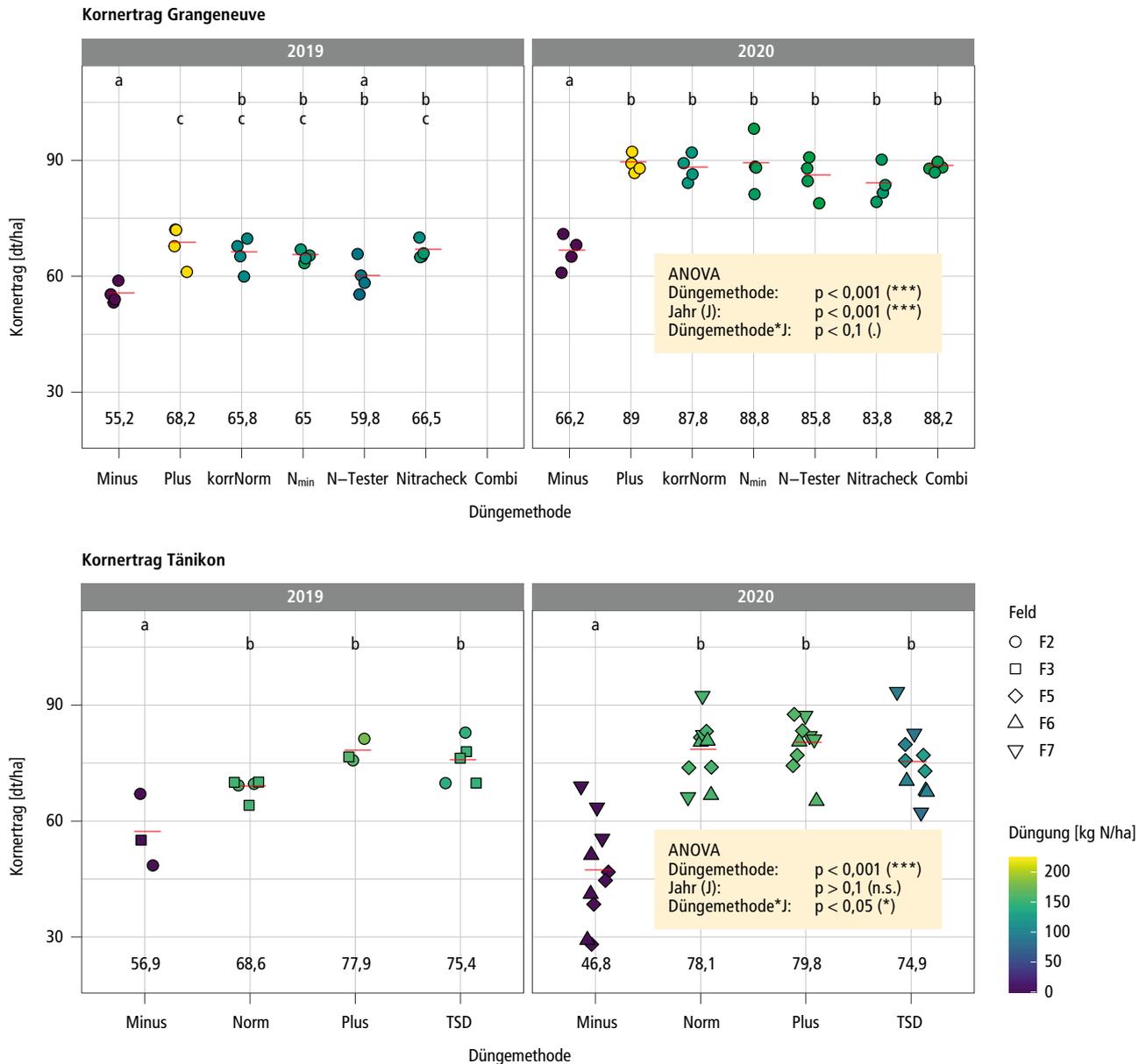


Abb. 3 | Kornertrag (14,5 % Feuchtigkeit) in Grangeneuve (oben) und Tänikon (unten). Die Resultate der Post-hoc Analyse (Tukey HSD) sind als Kleinbuchstaben integriert. Der Post-hoc Test wurde pro Standort und Jahr separat durchgeführt. Die einzelnen Plots sind als Punkte bzw. Symbole dargestellt. Der Mittelwert ist als roter Balken und Wert angegeben. Die Abkürzungen der Dünghmethoden finden sich im Methodenteil.

30 kg/ha) als N_{min}. Nitratecheck hatte in beiden Jahren einen N-Input, der zwischen den Methoden der GRUD lag. Combi hatte einen höheren N-Input als die beiden zugrundeliegenden Methoden, da die 1. Split-Applikation basierend auf N_{min} höher war als der fixe N-Input von Nitratecheck. Die TSD, die als einzige Methode die Heterogenität im Plot berücksichtigt, führte primär 2020 zu grösseren Einsparungen (-31 %).

Kein Einfluss auf den Kornertrag – ausser beim N-Tester

Die Kornerträge der StaD unterschieden sich an beiden Standorten/Jahren nicht signifikant von der Plus-Düngung und Norm_{Ertrag} – trotz der z.T. grossen N-Einsparungen. Einzig beim N-Tester wurde 2019 eine Ertragsreduktion gegenüber der Plus-Düngung beobachtet. Der N-Tester war 2019 auch die Düngung mit dem tiefsten N-Input (Abb. 3).

Der Jahreseffekt war nur in Grangeneuve signifikant, wobei die Erträge 2020 höher (ANOVA, Abb. 3) waren als 2019. Der Unterschied könnte aber auch auf Sorten- oder Feldeffekte zurückzuführen sein. In Grangeneuve war 2020 zudem der N-Input in den Verfahren der StaD höher als 2019. Der höhere N-Input der StaD kann als Hauptfaktor für die Ertragssteigerung jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, denn auch in den Kontrollverfahren waren die Kornerträge 2020 deutlich höher (Abb. 3).

Einfluss auf den Proteingehalt

Beim Proteingehalt scheint der Standort bzw. die Sortenwahl ausschlaggebend zu sein. Die Proteingehalte in Grangeneuve waren generell sehr hoch (2020 sogar in der Minus-Kontrolle 13,6%), in Tänikon waren sie hingegen eher tief (2020 sogar in der Plus-Kontrolle unter 11,5%). Beim Proteingehalt scheint der Standort bzw. die Sortenwahl ausschlaggebend zu sein. Die Proteingehalte in Grangeneuve, waren generell sehr hoch (2020

sogar in der Minus-Kontrolle 13,6%); in Tänikon hingegen eher tief (2020 sogar in der Plus-Kontrolle unter 11,5%) – aber standortüblich. Denn die TSD unterschied sich im Proteingehalt nicht signifikant von der Norm-Düngung (Tab. 3). Allerdings resultierten die Verfahren der StaD in 2019 in Grangeneuve und 2020 in Tänikon in tiefere Proteingehalte als in der Plus-Kontrolle (ANOVA, Tab. 3). In Grangeneuve waren die Proteingehalte der überdüngten Variante mit 15,2% aber deutlich über dem Qualitätsförderbereich von SwissGranum. Im Gegensatz dazu konnten am weniger produktiven Standort in Tänikon 2020 das Qualitätsziel von SwissGranum von mindestens 12,8% mit der StaD nicht erreicht werden.

StaD steigert N-Nutzungseffizienz (NUE)

Für die NUE zeigt sich generell ein hoch signifikanter Effekt der Düngemethode (Tab. 3). Die NUE der Methoden der StaD war an beiden Standorten/Jahren generell höher als in der Plus- und Norm_{Ertrag}-Düngung (Tab. 3).

Tab. 3 | Agronomische Parameter: Proteingehalt und Stickstoffnutzungseffizienz (NUE), jeweils Mittelwert, Standardabweichung (sd) sowie die Resultate der ANOVA und Post-hoc-Analyse (Tukey-HSD).

Jahr (J)	Düngemethode (DM)	Proteingehalt [%]	±sd	HSD	NUE	±sd	HSD
Grangeneuve 2019	Minus	11,0	0,8	a	NA	NA	NA
	Plus	15,2	0,7	c	30,3	2,3	a
	korrNorm	12,8	0,3	b	59,8	4,0	c
	N _{min}	13,9	0,5	b	47,3	5	b
	N-Tester	12,7	0,3	b	65,3	3,6	c
	Nitracheck	13,8	0,5	b	50,5	5,5	b
Grangeneuve 2020	Minus	13,6	0,5	a	NA	NA	NA
	Plus	15,0	0,1	b	39,6	1,0	a
	korrNorm	14,5	0,3	b	67,5	2,7	c
	N _{min}	14,5	0,2	b	55,3	2,8	b
	N-Tester	14,6	0,3	b	52,0	3,8	b
	Nitracheck	14,4	0,4	b	56,8	3,2	b
	Combi	14,4	0,1	b	54,7	3,1	b
Tänikon 2019	Minus	11,7	0,6	a	NA	NA	NA
	Norm _{Ertrag}	13,1	0,9	a	44,7	1,6	a
	Plus	13,1	1,9	a	47,0	1,1	ab
	TSD	12,7	0,6	a	51,7	3,7	b
Tänikon 2020	Minus	9,7	0,9	a	NA	NA	NA
	Norm _{Ertrag}	11,4	1,1	bc	50,4	5,2	a
	Plus	11,5	0,9	c	49,9	4,4	a
	TSD	10,3	0,8	ab	73,6	14,1	b
ANOVA (Y ~ DM × J)		Proteingehalt			NUE		
Grangeneuve/Tänikon	DM	***/*			***/*		
	J	***/*			**/*		
	DM × J	**/_			**/*		

Signifikanz Codes: *** p ≤ 0,001, ** p ≤ 0,01, * p ≤ 0,05, . p ≤ 0,1

Nur in Tänikon 2019 war die NUE der TSD 2019 statistisch nicht signifikant höher als in der Plus-Düngung. Da der Unterschied der TSD zur Norm_{Ertrag}-Düngung (welche in der Höhe zwischen Plus und TSD liegt) signifikant ist, kann davon ausgegangen werden, dass dies auf eine höhere Feldvarianz und nicht die Empfehlung selbst zurückzuführen ist. Die unterschiedlich starke NUE-Steigerung der beiden untersuchten Jahre weist darauf hin, dass die Bemessung der TSD noch optimiert werden könnte.

Eine höhere NUE bedeutet, dass pro kg appliziertem N-Dünger mehr Ertrag generiert wird. Ein Beispiel: In Grangeneuve wurde durch die Methoden der StaD 2019 zwischen 47 und 65 kg Kornertrag pro kg ausgebrachtem N-Dünger produziert. In der Plus-Düngung hingegen nur 30,3. In Grangeneuve unterschieden sich auch die Düngemethoden der StaD signifikant. In beiden Jahren hatte die korrNorm eine auffallend hohe NUE, die sich signifikant von den anderen Düngemethoden abhebt. Nur der N-Tester hatte 2019 eine höhere NUE (Tab. 3). An beiden Standorten war die NUE 2020 signifikant höher als 2019 (ANOVA, Tab. 3).

Diskussion

StaD: Effizienterer N-Einsatz bei konstanten Erträgen und guter Qualität

Die vorliegende Studie zeigt das Potenzial der StaD, einen Beitrag für eine ressourceneffiziente Landwirtschaft zu leisten. Die getesteten Methoden der StaD hatten im Vergleich zur Plus- und Norm_{Ertrag}-Düngung eine höhere NUE, d.h. es wurde mehr Kornertrag pro kg ausgebrachtem Mineraldünger produziert. Im Extremfall (Grangeneuve, 2019) resultierte durch die Standortanpassung mehr als der doppelte Kornertrag pro kg ausgebrachtem Mineraldünger.

Der effizientere N-Einsatz ging generell mit N-Einsparungen (bis –31 %, 46,5 kg N/ha) gegenüber der Norm_{Ertrag} einher und hatte keine signifikante Ertragsreduktion gegenüber der Plus- und Norm_{Ertrag}-Düngung zur Folge. Beim N-Tester führte die starke N-Reduktion (von –39 %, 59 kg N/ha) 2019 jedoch zu einer leichten Ertragseinbusse. Dies könnte daran liegen, dass das Gerät nicht für Schweizer Getreidesorten kalibriert wurde, und die Messung nicht allein vom N-Status der Pflanze beeinflusst wird, sondern auch von der Blattstruktur und Umweltbedingungen, z.B. Wasserversorgung und Krankheitsdruck (Wood *et al.*, 1993).

Bei einigen Methoden (N-Tester, N_{min}, Combi) resultierte die StaD 2020 aber auch in einer leichten Mehrdüngung

(max. 10 %) gegenüber der Norm_{Ertrag} – 2020 war auch ein Jahr mit hohen Erträgen (bis 89 dt/ha). Eine StaD könnte somit auch zur Ertragssicherung bzw. Ausschöpfung des lokalen Ertragspotenzials beitragen, was internationale Studien bestätigen (Khosla *et al.*, 2002; Maidl *et al.*, 2004).

Auch die Proteingehalte wurden in der Regel von der StaD nicht beeinträchtigt. Ausschlaggebend für den Proteingehalt war hingegen der Standort – bzw. möglicherweise die Sortenwahl. Mit den Sorten in Grangeneuve wurden generell sehr hohe Proteingehalte realisiert, die in und über den von Swiss Granum definierten Qualitätszielen (12,8–13,8 %, Sonderegger & Scheuner, 2014) lagen. In Tänikon waren sie vergleichsweise tief und z.T. unter den Qualitätszielen. Hohe Proteingehalte werden in der Praxis seit 2015 über einen Bonus entlohnt, mit der Absicht, die Qualität zu fördern (Brabant & Häner, 2016). In der stark gedüngten Plus-Kontrolle wurde in der vorliegenden Studie z.T. leicht höhere Proteingehalte realisiert (Grangeneuve 2019, Tänikon 2020). Ein höherer Proteingehalt aufgrund einer intensiven N-Düngung kann jedoch mit einer geringeren Backqualität einhergehen, da durch die Düngung auch die Proteinzusammensetzung beeinflusst wird (Brabant & Häner, 2016). Da die Proteinzusammensetzung in der vorliegenden Studie nicht erfasst wurde, ist eine abschliessende Beurteilung des Effekts der StaD auf die Qualität nicht möglich.

Der Sortenprüfung und Sortenwahl kommt grosse Bedeutung zu, denn sowohl Ertragspotenzial als auch Proteingehalt sind sortenspezifische Eigenschaften, die durch den Standort mitgeprägt werden. Die Sortenwahl gilt gemäss Levy und Brabant (2016) als einfachstes Mittel, um hohe Proteingehalte zu realisieren. Die in dieser Studie verwendeten Weizensorten waren ausschliesslich Top-Sorten, die für hohe Qualität und gute Resistenz bekannt sind, aber nicht das höchste Ertragspotenzial haben. Mit den Experimenten der Sortenprüfung liessen sich evtl. auch der N-Tester oder ähnliche Methoden der StaD für Schweizer Sorten kalibrieren und abstützen.

Höhere N-Effizienz legt positiven Umwelteffekt nahe

Eine direkte Quantifizierung der N-Überschüsse war mit den verfügbaren Daten nicht möglich, da in Grangeneuve keine Stroherträge erfasst wurden. Für die TSD in Tänikon konnte Argento (2021) jedoch zeigen, dass die N-Überschüsse gegenüber der Norm_{Ertrag} im Schnitt um 32 % reduziert wurden. Bei den in Grangeneuve getesteten Methoden der StaD sind geringere N-Überschüsse aufgrund der höheren NUE und N-Einsparungen ebenfalls wahrscheinlich.

Praxistauglichkeit: Vergleich der StaD-Methoden

Die getesteten Methoden können einen Beitrag zu einer ressourceneffizienten Landwirtschaft leisten, unterscheiden sich aber bezüglich Kosten, Arbeitsaufwand, benötigtem Wissen und der jahreszeitlichen Anwendung (Düngesplit).

Für die korrNorm gibt es heute in den GRUD eine Beschreibung und in der kantonalen Beratung erste digitale Tools (z.B. Excel-Tool in Grangeneuve). Die benötigten Daten sind auf den Betrieben verfügbar (Bodeneigenschaften und Feldkalender), da sie für die Erfüllung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) erhoben werden müssen. Von den getesteten Methoden der StaD hat die korrNorm den geringsten Zeitaufwand (0,5h) und die geringsten Kosten (Tab. 4). Die Herausforderung der Methode liegt in der Aufteilung der Gesamtdüngemenge auf die einzelnen Splits. Da der Zeitpunkt und die applizierte N-Menge einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag, den Proteingehalt und somit auch auf die NUE haben (Haile *et al.*, 2012; Levy & Brabant, 2016), sind für die Anwendung der Methode fundierte agronomische Kenntnisse, Erfahrung bzw. eine Düngeberatung wichtig. Für eine optimale und breite Nutzung wäre eine Integration in Feldkalender- und Farmmanagementsoftware hilfreich und machbar.

Bei der N_{min} -Methode sind sowohl der Zeitaufwand (2 h) als auch die Kosten für die Entnahme und Verarbeitung der Bodenproben höher (ca. CHF 150.– je Probe in drei Tiefen, bzw. CHF 210.– inkl. Aufwand). Auch die Logistik kann sich schwierig gestalten, da die Probe sofort ins Labor gebracht werden muss und möglichst kurz vor der Düngung durchgeführt werden sollte. Der Expressversand in gekühlten Boxen wird aber meist von den Labors organisiert und ist im Preis inbegriffen. Um diese Methode zukünftig einer breiten landwirtschaftlichen Nutzung kostengünstig und mit reduziertem Aufwand zur Verfügung zu stellen, wäre es denkbar, regionale oder

kantonale Modelle auf Referenzparzellen abzustützen und durch diese jährlich, saisonale Düngeempfehlungen für Praxisparzellen abzuleiten. Bei der N_{min} -Methode wird in der Schweiz im Winterweizen lediglich die Korrektur der N-Menge für den ersten Split empfohlen. Die Düngebemessung weiterer Splits ist fachlich meist sinnvoll und wird in Deutschland und Frankreich auch praktiziert, ist aber auf kleinen Felder nicht wirtschaftlich. Bei grossen Flächen kann sich auch eine teurere teilflächenspezifische Beprobung lohnen.

Beim N-Tester sind der Aufwand (1,5h) und die Kosten (CHF 47.–) im mittleren Bereich (Tab. 4). Durch eine Mehrfachnutzung reduzieren sich die relativ hohen Anschaffungskosten. Der N-Tester wird oft überbetrieblich oder von Beratern genutzt. Aufgrund der fehlenden Kalibration für Schweizer Sorten gestaltet sich die Anwendung in der Schweiz aktuell jedoch weniger verlässlich und ist nur zielführend, wenn der Anwender für die entsprechende Sorte Erfahrungswerte hat. In der Beratung werden heute oft Vergleichssorten aus dem Ausland benutzt. Die Grundlagen dafür sind aber nicht transparent bzw. bekannt. Eine Kalibration auf Schweizer Sorten wäre deshalb wünschenswert, wird aber durch den Anbieter heute nicht bereitgestellt. Der N-Tester wird für den zweiten und dritten Dünge-Split angewendet.

Der Nitracheck ist in der Anschaffung günstiger (CHF 320.–), die Abschreibungskosten bei Mehrfachnutzung dementsprechend geringer (Tab. 4). Jedoch nimmt die Messung mehr Zeit (ca. 2h) in Anspruch. Die manuelle Extraktion des Pflanzensaftes kann sich ausserdem schwierig gestalten. In der Praxis wird er ebenfalls für die Bestimmung der Düngemenge im zweiten und dritten Split angewendet und hat im Versuch, wie die Resultate zeigen, zuverlässige Ergebnisse geliefert. Bei der Methode Combi (N_{min} + Nitracheck) wurden alle drei Düngesplits datenbasiert optimiert. Dennoch schneidet die Methode bezüglich Ertrag, Proteingehalt

Tab. 4 | Grobe Schätzung von Kosten und Zeitaufwand der getesteten Methoden.

Düngemethode	Zeitaufwand ¹ [h/Schlag]	Kosten Anschaffung/ Analyse [CHF]	Kosten pro Schlag [CHF]
korrNorm	0,5	kostenlos	15.–
N_{min}	2	150.– ²	210.–
N-Tester	1,5	2200.– ³	47.20
Nitracheck	2	320.– ³	60.30
Combi	4	150.– ² + 320.– ³	270.30
TSD	8,5	>7000.– ⁴ + N_{min} ⁵	290.– + N_{min} ⁵

¹Stundenlohn CHF 30.–; ²Analysekosten N_{min} CHF 50.– pro Bodenhorizont und Schlag; ³Annahme von 1000 Nutzungen; ⁴grobe Schätzung, Annahme von 200 Nutzungen für Drohne und optisches System, ⁵Aufwand für N_{min} pro Anzahl Teilflächen sofern angewendet.

und NUE nicht besser ab als die separat angewendeten Methoden N_{\min} und Nitratecheck. Ob die Jahresvariabilität zu Vorteilen dieser Methode führt, kann aus diesem Grund nicht abschliessend festgestellt werden. Zeitaufwand und Kosten sind jedoch im Vergleich relativ hoch (Tab. 4).

Die Versuche in Tänikon zeigen, dass die TSD einen effizienteren N-Einsatz ermöglicht und unter Praxisbedingungen anwendbar ist. Aufgrund der deutlich höheren Anschaffungskosten und des Zeitaufwands sowie der benötigten Kenntnisse im Umgang mit Drohnen und in der Verarbeitung der Multispektraldaten ist eine überbetriebliche Anschaffung und die Zusammenarbeit mit Beratern und Experten sinnvoll bzw. eine individuelle Nutzung durch den Landwirt selten lukrativ. Die hier vorgestellte Anwendung kann aber stellvertretend für ähnliche sensorbasierte Düngungssupportsysteme stehen, wie traktor-basierte Messsysteme (z.B. Yara N Sensor, GreenSeeker), die eine Düngoptimierung bei Überfahrt zulassen und weniger Knowhow benötigen oder web-basierte Satellitensupportsysteme (z.B. farmstar conseil, Vista, one soil), deren Kosten pro Schlag bei rund 20 Euro liegen. Die TSD berücksichtigt als einzige der getesteten Methoden die Variabilität der Bodenbedingungen innerhalb der Parzelle. Je ausgeprägter diese ist, umso grösser soll auch der Mehrwert der TSD sein (Pannell *et al.*, 2019; Späti *et al.*, 2021). Nichtsdestotrotz gibt es für die TSD noch Optimierungspotenzial, insbesondere in der sortenspezifischen Anwendungsempfehlung und der Berücksichtigung von Bodeninformationen, weswegen diese Methoden weiter unter Praxisbedingungen optimiert werden sollten. Auch eine Kombination mit der korrNorm erscheint unter Praxisbedingungen zielführend.

Aktuelle Hürden für die Praxis

Für die Anwendung der StaD in der Schweizer Agrarpraxis gibt es im Moment noch Hürden, was die tiefe Anwendungsrate erklären kann. Die geringen wirtschaftlichen Vorteile einer effizienten Düngung aufgrund meist tiefer Mineraldüngerkosten und die hohen Technikkosten werden als zentrale Adaptionshürden für die Praxis genannt (Schläpfer, 2016; Späti *et al.*, 2021). Ein höherer Zeitaufwand für Planung und Beprobung und das nötige Wissen für die Anwendung der Methoden kommen als erschwerende Faktoren hinzu. Zudem ist eine StaD bzw. die Düngungseffizienz heute nicht Bestandteil der Suisse-Bilanz im Rahmen des ÖLN.

Eine Anwendung der StaD in der Suisse-Bilanz wäre über Feldkalender oder einen Düngeplan aber grundsätzlich möglich. Auch Studien im Ausland (Basso *et al.*, 2016;

Cohan *et al.*, 2018; Stamatiadis *et al.*, 2018) belegen, dass eine StaD die NUE erhöhen kann. Eine Berücksichtigung der StaD im Vollzug könnte demzufolge ein probates Mittel sein, um N-Überschüsse und damit potenziell auch Verluste aus der Landwirtschaft zu reduzieren.

Schlussfolgerung

Die Studie zeigt das grosse Potenzial der StaD für einen effizienteren N-Einsatz am Beispiel des Winterweizenanbaus. Die Bandbreite reicht dabei von sehr günstigen und einfachen Möglichkeiten wie die korrNorm bis hin zur sensorbasierten Düngoptimierung, welche höhere Kosten verursacht, starke Anforderungen an das verfügbare Knowhow bedingt und insbesondere bei grösserer Flächenanwendung von Vorteil ist.

Die Versuche zeigen, dass es möglich ist, die N-Effizienz zu erhöhen und die Überschüsse zu senken, ohne Ertragseinbussen zu erleiden. Neben Standort und Sorte hat auch die Düngung einen Einfluss auf den Proteingehalt, was entsprechend zu berücksichtigen ist. ■

Literatur

- Alva, L. (2004). Potato nitrogen management. *Journal of vegetable crop production*, **10**(1), 97–132.
- Argento, F. (2021). Combined digital and standard methods to optimize nitrogen (N) management and reduce N surplus in winter wheat (T. aestivum) production. *ETH Zürich*.
- Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., & Liebisch, F. (2020). Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. *Precision Agriculture*, 1–23.
- Argento, F., Liebisch, F., Simmler, M., Ringger, C., Hatt, M., Walter, A., & Anken, T. (2022). Linking soil N dynamics and plant N uptake by means of sensor support. *European Journal of Agronomy*, **134**, 126462.
- Barnes, E., Clarke, T., Richards, S., Colaizzi, P., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., & Thompson, T. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA*.
- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., & Schulthess, U. (2016). Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. *Precision Agriculture*, **17**(2), 168–182.
- BLW. (2021). *Agrarbericht 2021 - Flächennutzung* Retrieved 24.01. from <https://www.agrarbericht.ch/de/produktion/pflanzliche-produktion/flaechennutzung>
- Brabant, C., & Häner, L. L. (2016). Einfluss der Stickstoffdüngung und ihrer Aufteilung auf die Backqualität von Weizen. *Agrarforschung Schweiz*, **7**(2), 88–97.
- Chatterjee, A., Subedi, K., Franzen, D., Mickelson, H., & Cattanaach, N. (2018). Nitrogen fertilizer optimization for sugarbeet in the Red River Valley of North Dakota and Minnesota. *Agronomy journal*, **110**(4), 1554–1560.
- Cohan, J., Soenen, B., Vericel, G., & Laurent, F. (2018). Improving nitrogen use efficiency in wheat: recent progress and prospects in France. *Proceedings of Phloème, first biennials of cereal innovation, Paris, 24th–25th January*.
- Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., & Arcand, M. M. (2021). Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, **12**.
- Delgado, J., Khosla, R., Bausch, W., Westfall, D., & Inman, D. (2005). Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*, **60**(6), 402–410.
- Ernst, H., Förster, F., & Albert, E. (2003). *Merkblatt zur Anwendung des Nitrat-Schnelltests bei Wintergetreide und zum Einsatz von stabilisierten N-Düngern im Rahmen des Agrarumweltprogramms «Umweltgerechte Landwirtschaft im Freistaat Sachsen» (UL)*.
- Gnyp, M., Panitzki, M., Reusch, S., Jasper, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2016). Comparison between tractor-based and UAV-based spectrometer measurements in winter wheat. *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*.
- Haile, D., Nigussie, D., & Ayana, A. (2012). Nitrogen use efficiency of bread wheat: Effects of nitrogen rate and time of application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **12**(3), 389–409. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000002>
- Jemison, J., & Fox, R. (1988). A quick-test procedure for soil and plant tissue nitrates using test strips and a hand-held reflectometer. *Communications in soil science and plant analysis*, **19**(14), 1569–1582.
- Khosla, R., Fleming, K., Delgado, J., Shaver, T., & Westfall, D. (2002). Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, **57**(6), 513–518.
- Levy, L., & Brabant, C. (2016). Die Kunst, den Stickstoffdünger für einen optimalen Ertrag und Proteingehalt von Weizen aufzuteilen. *Agrarforschung Schweiz*, **7**(2), 80–87.
- Maidl, F., Schächtl, J., & Huber, G. (2004). Strategies for site-specific nitrogen fertilization on winter wheat. *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Hyatt Regency, Minneapolis, MN, USA, 25–28 July, 2004*.
- Monostori, I., Árendás, T., Hoffman, B., Galiba, G., Gierczik, K., Szira, F., & Vágújfalvi, A. (2016). Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat. *Euphytica*, **211**(1), 103–112.
- Omara, P., Aula, L., Oyebiyi, F., & Raun, W. R. (2019). World cereal nitrogen use efficiency trends: review and current knowledge. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, **2**(1), 1–8.
- Pannell, D., Gandorfer, M., & Weersink, A. (2019). How flat is flat? Measuring payoff functions and the implications for site-specific crop management. *Computers and electronics in agriculture*, **162**, 459–465.
- Schläpfer, F. (2016). Eine Stickstoff-Lenkungsabgabe für die Schweizer Landwirtschaft? *Agrarforschung Schweiz*, **7**(11–12), 496–503.
- Sinaj, S., & Richner, W. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz, Spezialpublikation (Kapitel 8)*. www.grud.ch
- Sinclair, T. (1990). Nitrogen influence on the physiology of crop yield. *Theoretical production ecology: Reflections and prospects*, **181**.
- Sonderegger, O., & Scheuner, S. (2014). *Bekanntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung*. Retrieved 01.12. from <https://admin.ipsuisse.ch/CMS/ModanFileHandler.axd?DateiGUID=162274c1-64b9-4570-92e2-3233773a539e>
- Späti, K., Huber, R., & Finger, R. (2021). Benefits of Increasing Information Accuracy in Variable Rate Technologies. *Ecological Economics*, **185**, 107047.
- Stamatiadis, S., Schepers, J., Evangelou, E., Tsadilas, C., Glampedakis, A., Glampedakis, M., Dercas, N., Spyropoulos, N., Dalezios, N., & Eskridge, K. (2018). Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. *Precision Agriculture*, **19**(3), 570–587.
- Wood, C., Reeves, D., & Himelrick, D. (1993). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. *Proceedings of the agronomy society of New Zealand*.
- Zörb, C., Ludewig, U., & Hawkesford, M. J. (2018). Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends in plant science*, **23**(11), 1029–1037.