

Standortangepasstes N-Düngemanagement im Weizenanbau als Klimaanpassungsmaßnahme bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat

Yusuf Nadi Karatay^{1,2} und Andreas Meyer-Aurich¹

Abstract: Der Klimawandel kann auf die N-Versorgung aus dem Bodenvorrat wirken. Bei zunehmender Varianz der N-Mineralisation können optimale N-Düngergaben schlechter abgeschätzt und damit Erträge sowie Produktqualitäten und demzufolge die Wirtschaftlichkeit des Weizenanbaus negativ beeinflusst werden. Das Ziel dieser Arbeit ist zu prüfen, inwieweit teilflächenspezifische N-Düngung von Winterweizen bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat im Vergleich zur einheitlichen N-Düngung kosteneffizient ist. Zu diesem Zweck wurde die Produktion von Winterweizen auf einem virtuellen Schlag mit zwei Teilschlägen unterschiedlicher Ertragspotentiale modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass der ökonomische Vorteil von teilflächenspezifischem N-Management bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat leicht zugenommen hat, welcher überwiegend durch die Sicherung durchschnittlich höherer Produktqualität entsteht. Außerdem weist das teilflächenspezifische N-Management bei zunehmend variierender N-Mineralisation einen risikoreduzierenden Effekt auf.

Keywords: Precision Farming, Wirtschaftlichkeit, Mineralisation, Monte-Carlo-Simulation

1 Einleitung

Die Bereitstellung von Stickstoff (N) aus dem Boden durch Mineralisation organischer Substanz ist abhängig von der Temperatur und Bodenfeuchte. Räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von Wasser und N in der Pflanzenwachstumsvegetationszeit beeinflussen Ertragsschwankungen deutlich [Bo18]. Infolge des Klimawandels werden steigende Durchschnittstemperaturen, ein verändertes Niederschlagsregime und häufigere Extremwetterereignisse erwartet [SS02; Ho07], die auch Auswirkungen auf die Dynamik der Mineralisation von organischen Substanzen im Boden haben können [Bl10; Sc18]. Der Klimawandel kann direkt und indirekt auf die N-Nachlieferung wirken [Pa12; DLO14].

Da das Wetter auf die N-Verfügbarkeit im Boden und damit auf den Düngebedarf wirkt, macht der Klimawandel und insbesondere die erhöhte Klimavariabilität ein passendes N-Management noch notwendiger [Me08]. Bei zunehmender Varianz der N-Mineralisation können optimale N-Düngergaben schlechter abgeschätzt und damit Erträge sowie Produktqualitäten und demzufolge die Wirtschaftlichkeit des Weizenanbaus negativ beeinflusst werden. Daher machen die erwarteten Klimafolgen das N-Dünge-

¹ Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe, Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, ykaratay@atb-potsdam.de (Y.N. Karatay), ameyer-aurich@atb-potsdam.de (A. Meyer-Aurich)

² Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Invalidenstraße 42, D-10115 Berlin

management in Zukunft schwieriger. Ein unpassendes Management könnte nicht nur zu betrieblichen, sondern auch zu höheren gesellschaftlichen Kosten führen. Dadurch wird die Rolle eines standortangepassten N-Managements in Bezug auf die Klimafolgen immer wichtiger.

Precision Farming (PF) Technologien bieten ein standortangepasstes und gezieltes Management der N-Düngung an und können dadurch Produktionsrisiken verringern [GM17]. Bei variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat kann teilflächenspezifische N-Düngung (PF) möglicherweise zu angepassten N-Düngergaben und damit zu höheren Erlösen beitragen und das Verlustrisiko verringern. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit teilflächenspezifische N-Düngung von Winterweizen bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Boden im Vergleich zur einheitlichen N-Düngung kosteneffizient ist. Außer dem Effekt variierender N-Einträge auf Erträge wird die Auswirkung der N-Einträge auf die Produktqualitäten berücksichtigt, welche dann den Produktpreis von Weizen bzw. die Wirtschaftlichkeit des Weizenanbaus beeinflussen.

2 Material und Methoden

2.1 Ertrags- und Proteinfunktionen und Stickstoffmineralisation

Die Produktion von Winterweizen wurde auf einem virtuellen Schlag mit zwei Teilschlägen unterschiedlicher Ertragspotenziale modelliert. Die Produktionsfunktionen für eine hohe und eine niedrige Ertragszone wurden von [KM18] übernommen, die anhand eines Normierungsansatzes mit empirischen Daten von [Kö00] geschätzt wurden. Die Proteinfunktionen wurden durch die veröffentlichten Datensätze von [EEK01] und [Er05] modelliert. Die N-Nachlieferung durch Mineralisation von N aus dem Bodenvorrat wurde basierend auf den Ertragsdaten von [Kö00] geschätzt. Der prinzipielle Zusammenhang der N-Dynamik zwischen der Pflanze und dem Boden wird in der Abbildung 1 schematisch dargestellt. Der N-Düngebedarf wird hier als die Differenz zwischen N-Aufnahme/N-Bedarf der Pflanze und N-Versorgung aus dem Boden (N-Mineralisation) verstanden. Da das Wetter auf die N-Mineralisation wirkt, entsteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der temporalen N-Versorgung aus dem Bodenvorrat.

2.2 N-Düngermanagementoptionen und Wirtschaftlichkeit

Zwei N-Düngermanagementoptionen wurden berücksichtigt: teilflächenspezifische N-Düngung mit N-Sensor (PF) und flächeneinheitliche N-Düngung (UNI). In Abhängigkeit der teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen und Qualitätsresponsefunktionen wurden ökonomisch optimale N-Düngermengen jeweils teilflächenspezifisch und flächeneinheitlich berechnet. Der Rohproteingehalt (RPG) wurde als Proxy für Weizen-

qualität angenommen und zwei Qualitäten wurden berücksichtigt: Backqualität ($\geq 13\%$ RPG) und Futterqualität ($< 13\%$ RPG). Die Preise für Back- und Futterweizen und N-Dünger (Kalkammonsalpeter) wurden aus [HL16] entnommen. Die N-kostenfreie Leistung wurde als Erlös, durch den erzielten Ertrag multipliziert mit dem Weizenpreis abhängig von der Weizenqualität, abzüglich der N-Düngekosten, berechnet. Bei der teilflächenspezifischen N-Düngung wurden noch zusätzlich die Kosten für Kapital und Information für den N-Sensor mit 11 €/ha/a [OECD16] berücksichtigt.

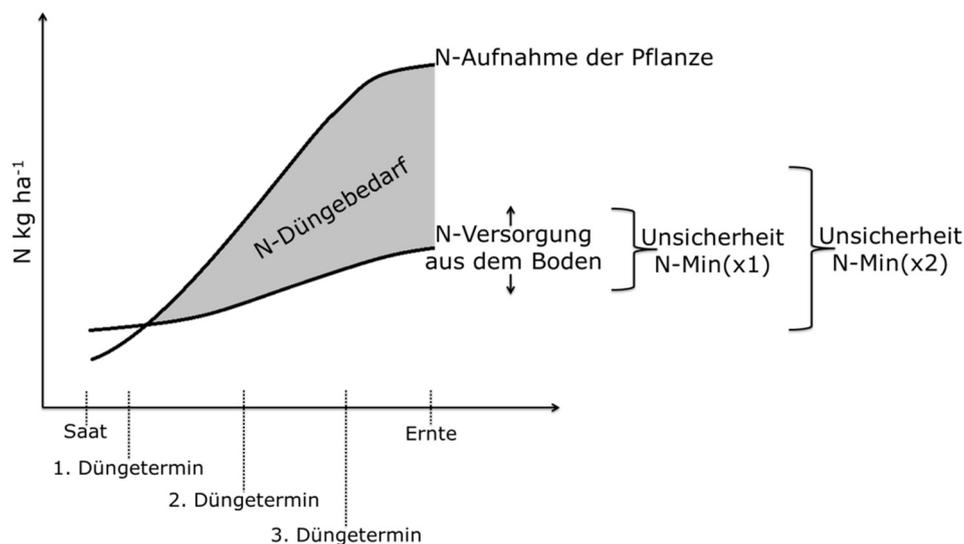


Abb. 1: Die N-Dynamik zwischen der Pflanze und dem Boden und die Unsicherheit bezüglich in einfacher „N-Min(x1)“ und doppelter Höhe „N-Min(x2)“ variierender N-Mineralisation

2.3 Szenarioanalyse

Das Basisszenario „N-Min(x1)“ berücksichtigt die Unsicherheit bezüglich der N-Mineralisation im Boden in einfacher Höhe basierend auf empirischen Daten abgeleitet von [Kö00]. Um den durch den Klimawandel bedingten Einfluss zunehmend variierender temporaler N-Mineralisation auf die Wirtschaftlichkeit des Weizenanbaus zu untersuchen, wurde in einem alternativen Szenario „N-Min(x2)“ die Varianz der N-Mineralisation in doppelter Höhe simuliert (Abb. 1). Bei der PF-Managementoption mit N-Sensor wurde angenommen, dass der N-Sensor die Veränderung der N-Mineralisation indirekt über das Pflanzen-Monitoring (N-Sensor) zwischen der zweiten und dritten N-Gabe bis zu 50 % abschätzen und dementsprechend die ökonomisch optimalen N-Düngermengen teilflächenspezifisch anpassen kann (Abb. 1). Die Abbildung von Unsicherheiten bzgl. der Versorgung der Pflanzen mit N aus dem Bodenvorrat erfolgt mit Monte-Carlo-Simulationen (10000 Iterationen). Der Unsicherheitsparameter wurde in *@Risk* (Palisade Corporation Software, Ithaca NY USA) mit einer Dreiecksverteilung

modelliert. Die Erwartungswerte der Verteilung von Erträgen, Rohproteingehalten und N-kostenfreien Leistungen lieferten die Grundlagen für die Berechnungen. Als Verlustrisikomaß wurde *Conditional Value at Risk* (CVaR) angewandt. CVaR (95) gibt den Erwartungswert der N-kostenfreien Leistung in den untersten 5 % der Fälle an.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen dieser Studie zeigen, dass beim Basisszenario „N-Min(x1)“, sowie beim Alternativszenario „N-Min(x2)“ mit zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat ein höherer Erwartungswert der N-kostenfreien Leistung mit teilflächenspezifischer N-Düngung erzielt wurde (Tab. 1). Der ökonomische Vorteil des teilflächenspezifischen N-Management im Basisszenario war überdurchschnittlich im Vergleich zu anderen ähnlichen Studien, die aber die Wahrscheinlichkeit des Erreichens von Backqualität nicht berücksichtigt haben [GM17]. Der ökonomische Vorteil von teilflächenspezifischem N-Management hat im Alternativszenario „N-Min(x2)“ leicht zugenommen. Die Höhe der Erträge blieb relativ unverändert in beiden Szenarien. Der ökonomische Vorteil der PF-Technologie in beiden Simulationen entsteht überwiegend durch die Sicherung durchschnittlich höherer Produktqualitäten im Vergleich zum flächeneinheitlichen N-Management. In der Szenarioanalyse „N-Min(x2)“ war die Wahrscheinlichkeit eines Rohproteingehalts <13 % beim teilflächenspezifischen N-Management nur 12 %, während diese bei flächeneinheitlichen bei knapp 50 % lag.

| Szenario | Mgmt | \bar{x} Ertrag (Mg/ha) | \bar{x} RPG (%) | P (RPG <13 %) | Nkfl (€/ha) | CVaR (95) (€/ha) | |
|---------------|------|-----------------------------|----------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| | | | | | | N-Sensor 50 % | N-Sensor 75 % |
| N- Min(x1) | UNI | 6,21 | 13,06 | 40 % | 941 | 873 | 873 |
| | PF | 6,35 | 13,41 | 0 % | 974 | 950 | 952 |
| N- Min(x2) | UNI | 6,15 | 12,99 | 49 % | 925 | 810 | 810 |
| | PF | 6,33 | 13,38 | 12 % | 961 | 851 | 924 |

Tab. 1: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen hinsichtlich der Unsicherheit in einfacher „N-Min(x1)“ und doppelter Höhe „N-Min(x2)“ variierender N-Mineralisation und des Risikoverminderungspotenzials von teilflächenspezifischem N-Management (PF) im Vergleich zum flächeneinheitlichen N-Management (UNI)

Mgmt: Management; \bar{x} : Mittelwert; P: Wahrscheinlichkeit; RPG: Rohproteingehalt; Nkfl: N-kostenfreie Leistung; CVaR(95): Conditional value at risk; N-Sensor 50 % / 75 %: Erfassung der N-Mineralisation mit dem N-Sensor bis zu 50 % / 75 %

Trotz der Kosten für Kapital bzw. Information der PF Technologie konnte das Verlustrisiko mit teilflächenspezifischer N-Düngung deutlich verringert werden. Das relative Risikoverminderungspotenzial der PF-Technologie in den untersten 5 % der Fälle (CVaR(95)) gegenüber dem flächeneinheitlichen N-Management hat im Vergleich

zum Basisszenario abgenommen (Tab. 1), wenn die N-Mineralisation mit dem N-Sensor bis zu 50 % erfasst werden konnte. Weitergehend wurde geprüft, inwieweit sich das relative Risikominderungspotenzial der PF-Technologie gegenüber dem flächeneinheitlichen N-Management ändern würde, wenn der N-Sensor durch Technikverbesserung die Veränderung der N-Mineralisation besser erfassen könnte. Dafür wurde der Verlauf mit der Annahme der oben genannten Abschätzung des N-Sensors bis zu 75 % simuliert (Tab. 1). Das Verlustrisiko hat sich in diesem Fall, gegenüber dem Alternativszenario mit N-Sensor 50 %, verringert, welches darauf hinweist, dass der risikoreduzierende Effekt vom teilflächenspezifischen N-Management bei zunehmend variierender N-Mineralisation weiter stark bleibt, wenn die Variabilität der N-Mineralisation durch den N-Sensor besser, i.e. mit N-Sensor 75 %, erfasst werden kann.

4 Fazit und Ausblick

Die Berücksichtigung variierender N-Mineralisation bei der N-Düngung kann zu höherem wirtschaftlichem Erfolg teilflächenspezifischer Düngung führen. Mit zunehmender Variabilität der N-Mineralisation nimmt die Unsicherheit einer optimalen Düngung zu. Dies hat nach unseren Berechnungen nur einen kleinen Einfluss auf den ökonomischen Vorteil von teilflächenspezifischem N-Management. Dieses Ergebnis hängt stark davon ab, inwiefern mit PF-Technologien die kurz- und mittelfristige N-Mineralisation etwa mit einem N-Sensor erfasst werden kann. Bei genauerer Erfassung der N-Mineralisation kann das ökonomische Verlustrisiko mit teilflächenspezifischer Düngung stärker gemindert werden. Mit solch einer Weiterentwicklung der Technik könnte das teilflächenspezifische N-Management eine kosteneffiziente Klimaanpassungsmaßnahme bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat berücksichtigt werden.

Neue Methoden/Technologien werden entwickelt, um die N-Verfügbarkeit im Boden schnell zu ermitteln, um den Düngebedarf der Pflanzen zu schätzen, i.e. *Pre-sidedress Nitrate Test*. In Zukunft können diese Technologien für eine Echtzeit-Messung mit Sensoren weiterentwickelt und mit anderen PF-Technologien, i.e. variable N-Düngung, kombiniert werden. So kann das Verlustrisiko mit den PF-Technologien, auch bei hoch variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat, weiter verringert werden.

Literaturverzeichnis

- [Bl10] Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke B.-M.: Lehrbuch der Bodenkunde – Scheffer / Schachtschabel, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2010.
- [Bo18] Boenecke, E., Lueck, E., Ruehlmann, J., Gruending, R., Franko, U.: Determining the within-field yield variability from seasonally changing soil conditions. *Precision Agriculture*, 19(4), 750-769, 2018.
- [DLO14] Doltra, J., Lægdsmand, M., Olesen, J. E.: Impacts of projected climate change on productivity and nitrogen leaching of crop rotations in arable and pig farming systems in Denmark. *The Journal of Agricultural Science*, 152(1), 75-92, 2014.

- [EEK01] Ellmer, F., Erekul, O., Köhn, W.: Einfluss langjährig differenzierter organisch-mineralischer Düngung auf den Ertrag, die Ertragsstruktur und die Backqualität von Winterweizen. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 47(5-6), 423-444, 2001.
- [Er05] Erekul, O., Ellmer, F., Köhn, W., Öncan, F.: Einfluss differenzierter Stickstoffdüngung auf Kornenertrag und Backqualität von Winterweizen. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51:5, 523-540, 2005.
- [GM17] Gandorfer, M., Meyer-Aurich, A.: Economic Potential of Site-Specific Fertiliser Application and Harvest Management. In *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*, Springer, Cham., 79-92, 2017.
- [HL16] Hanff, H., Lau, H.: Datensammlung für die Betriebsplanung und die Betriebswirtschaftliche Bewertung Landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg, 7', MIL, Potsdam, 2016.
- [Ho07] Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., Meinke, H.: Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), 19691-19696, 2007.
- [KM18] Karatay, Y. N., Meyer-Aurich, A.: A Model Approach for Yield-Zone-Specific Cost Estimation of Greenhouse Gas Mitigation by Nitrogen Fertilizer Reduction. *Sustainability*, 10(3), 710, 2018.
- [Kö00] Köhn, W., Ellmer, F., Peschke, H., Chmielewski, F., Erekul, O.: Dauerdüngungsversuch Berlin-Dahlem Deutschland. In Körschens M.: *UFZ-Bericht 15/2000, Internationale Organische Stickstoffdauerdüngungsversuche, Bericht der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Bodenfruchtbarkeit in der Internationalen Bodenkundlichen Union*, Verlag: Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, S. 25-35, 2000.
- [Me08] Melkonian, J. J., Van Es, H. M., DeGaetano, A. T., Joseph, L., Kosla, R.: ADAPT-N: Adaptive nitrogen management for maize using high-resolution climate data and model simulations. In *Proceedings of the 9th international conference on precision agriculture*, 2008.
- [OECD16] OECD: *Farm Management Practices to Foster Green Growth*. OECD Publishing, Paris, 2016.
- [Pa12] Patil, R. H., Laegdsmand, M., Olesen, J. E., Porter, J. R.: Sensitivity of crop yield and N losses in winter wheat to changes in mean and variability of temperature and precipitation in Denmark using the FASSET model. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 62(4), 335-351, 2012.
- [Sc18] Schimmelpfennig, S., Heidecke, C., Beer, H., Bittner, F., Klages, S., Krengel, S., Lange, S.: *Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft: Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut (No. 86)*. Thünen Working Paper, 2018.
- [SS02] Smit, B., Skinner, M. W.: Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114, 2002.