

Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern: Grundlage für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung

Martin Mittermayer¹, August Gilg², Franz-Xaver Maidl¹ und Kurt-Jürgen Hülsbergen¹

Abstract: Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf Ackerflächen bedingt ein unterschiedliches Pflanzenwachstum mit variierenden Erträgen und Nährstoffentzügen. Diese Heterogenität sollte bei der N-Düngung, aber auch bei der N-Bilanzierung berücksichtigt werden, denn bei ausgeglichener Stickstoffbilanz des Gesamtschlages können auf Teilflächen stark differenzierte N-Salden auftreten. Mit modernen Technologien wie der Ertragskartierung und Reflexionsmessungen mit Sensor wurden in dieser Arbeit auf einem Untersuchungsschlag teilflächenspezifische N-Bilanzen im 10 m x 10 m Raster berechnet. Durch die Bestimmung von Bodenparametern (C_{org} , N_i) an georeferenziert gewonnenen Bodenproben wurden Einflussfaktoren auf die variierenden N-Salden beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der N-Saldo eine große Schwankungsbreite (-116 bis +72 kg ha⁻¹) aufweist und Teilflächen mit hohen bzw. negativen N-Salden auftreten, obwohl die schlageinheitliche N-Bilanz nahezu ausgeglichen (+10 kg ha⁻¹) ist.

Keywords: precision agriculture, spatial variability, nitrogen surplus, geostatistics

1 Einleitung

Der N-Saldo der Stickstoffbilanz ist einer der wichtigsten Agrarumweltindikatoren [ST13]. Er beschreibt das Verlustpotenzial an reaktiven N-Verbindungen (NH₃, N₂O, NO₃⁻) auf unterschiedlichen Systemebenen wie z. B. Schlag, Fruchtfolge, Pflanzenbau, Tierhaltung oder Betrieb [Hü03]. In der Bundesrepublik Deutschland sind die flächenbezogenen N-Salden seit Jahren mit etwa 90 kg ha⁻¹ a⁻¹ auf zu hohem Niveau; dies führt zu umweltgefährdenden und klimarelevanten N-Emissionen sowie zu Konflikten mit dem Trinkwasserschutz [KCH10]. Um weitere schädliche N-Emissionen in die Umwelt zu vermeiden und dabei die Ertragsstabilität zu gewährleisten, muss die N-Effizienz deutlich gesteigert werden. Ein erfolgversprechender Ansatz zur Steigerung der N-Effizienz ist die sensorgestützte teilflächenspezifische N-Düngung unter Berücksichtigung differenzierter Ertragspotenziale [Sp16]. Aufgrund von

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Liesel-Beckmann-Straße 2, 85354 Freising, martin.mittermayer@tum.de; maidl@wzw.tum.de; huelsbergen@wzw.tum.de

² Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Mustererkennung und Software-Engineering, Vöttinger Straße 27, 85354 Freising, august.gilg@hswt.de

Bodenunterschieden und der Topografie weisen viele Ackerflächen eine hohe räumliche Variabilität der Erträge und N-Entzüge der Pflanzenbestände auf [Go03]. Allerdings ist trotz zunehmender Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit sensorgestützter N-Düngesysteme [Ma17] die schlageinheitliche Düngung immer noch die gängige landwirtschaftliche Praxis.

Wenn zur Ermittlung des N-Düngebedarfs der mittlere Ertrag des Schlages angenommen wird, kann dies auf heterogenen Schlägen dazu führen, dass (a) im Hohertragsbereich das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft wird und/oder die N-Entzüge der Pflanzen die N-Zufuhren übersteigen und die Boden-N-Vorräte abnehmen, (b) im Niedrigertragsbereich hohe N-Salden und Nitratverluste auftreten, ggf. auch Stickstoff im Boden akkumuliert wird [Hü17]. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist anzunehmen, dass auf heterogenen Schlägen die N-Salden kleinräumig variieren. Unter diesen Bedingungen können selbst bei einer im Mittel des Schlages ausgeglichenen N-Bilanz auf Teilschlägen hohe N-Salden und N-Verlustpotenziale auftreten. Mit einer teilflächenspezifischen N-Bilanzierung können die tatsächlichen umweltrelevanten N-Verluste genauer quantifiziert werden. Voraussetzung für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung ist die Verfügbarkeit georeferenzierter Daten zur N-Düngung, zu Erträgen und N-Entzügen. So können z. B. Daten multispektraler Reflexionssensoren [MSH04], Satellitendaten [ES19] und Mähdrescher mit einer integrierten Ertrags erfassung [St02] zur Berechnung der Biomasse und N-Aufnahme von Pflanzenbeständen genutzt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Datenerfassung

Die für die Untersuchungen notwendigen Boden- und Pflanzenparameter wurden in den Jahren 2018 und 2019 auf der 13 ha großen Ackerfläche „Bergfeld“ (Versuchsstation Roggenstein, bei Fürstenfeldbruck, TU München) erhoben. Die untersuchten Böden dieses Versuchsstandortes sind Cambisole mittlerer Güte. Im Mittel von dreißig Jahren (1981 bis 2010) betrug der Jahresniederschlag 954 mm und die Temperatur im Durchschnitt 8,5 °C. Das untersuchte Jahr 2018 zeichnete sich durch einen niedrigeren Jahresniederschlag (867 mm) und eine deutlich höhere Durchschnittstemperatur aus (10,1 °C). Der Winterweizen wurde als Fruchtart gewählt, da Weizen auf unterschiedliche Bodenqualitäten deutlich reagiert, die wichtigste Fruchtart mit der größten Anbaufläche in der BRD ist und viele experimentelle Daten zur Ertragsbildung und N-Effizienz von Weizen am Versuchsstandort vorliegen.

Zur Erfassung der Variabilität von Bodeneigenschaften wurden georeferenzierte Bodenproben gezogen für die Laboranalyse von organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Gesamt-Stickstoff (N_T) am 01.04.2019 sowie für die Bestimmung des Nitrat-N-Vorrats und des Wassergehalts am 09.04.2019. Um die Variabilität von Ertrag und N-Entzug als

Eingangsparameter der N-Bilanz räumlich differenziert zu erfassen, wurden Daten des Jahres 2018 der Mähdrescherertragsaufnahme, Biomassehandschnitten sowie von Reflexionsmessungen mit multispektralem Sensor verwendet.

2.2 Datenverarbeitung

Die Daten wurden in Raster gleicher Auflösung (10 m x 10 m, 1163 Rasterelemente) durch Interpolation mit dem Kriging-Verfahren [Ma63] überführt. Hierbei wurde zuerst ein Variogramm (Varianz der Daten nach Distanzklassen) der Daten erstellt, das den räumlichen Zusammenhang der Variable (Spatial auto-correlation effect) zeigt. Für die Datenanalyse wurden 10 m am Schlagrand weggeschnitten, um auszuschließen, dass Daten für Teilflächen ausgewertet werden, die nicht zum Ackerschlag gehören. Im Anschluss wurde eine Korrelationsanalyse basierend auf den Rasterelementen durchgeführt, um Beziehungen zwischen den untersuchten Boden- und Pflanzenparametern zu prüfen. Für räumliche Operationen und das Laden von Vektor- oder Rasterdateien wurden die R-Bibliotheken `rgdal`, `rgeos` und `raster` genutzt.

Mit N-Bilanzen wurde der N-Saldo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) bestimmt:

$$\text{N-Saldo} = \text{N-Input} - \text{N-Output} \quad (1)$$

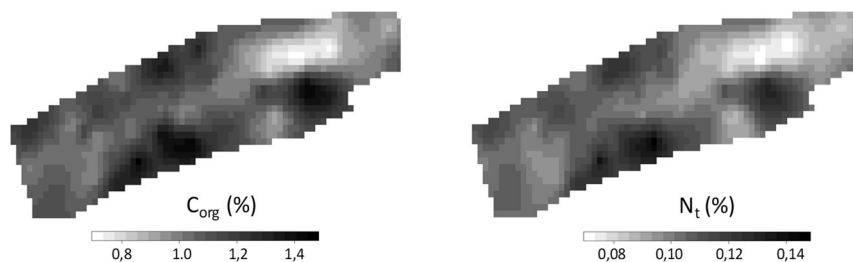
Der N-Input ist die Mineral-N-Menge für den Winterweizen, die auf der Untersuchungsfläche schlageinheitlich appliziert wurde (193 kg N ha^{-1}). Der N-Output entspricht dem Korn-N-Entzug. Der N-Entzug wurde bestimmt durch (a) Kornertrag nach Volumenstrommessung am Mähdrescher, multipliziert mit dem N-Gehalt im Korn aus Biomassehandschnitten und (b) über Reflexionsmessungen mit einem traktormontierten Sensor, Berechnung des Vegetationsindex REIP und Verwendung eines Algorithmus zur Schätzung der N-Aufnahme [Ma19]. Nebenprodukte (Stroh) wurden nicht geerntet und daher nicht als N-Output berücksichtigt.

Der N-Saldo wurde für jedes Rasterelement berechnet.

3 Ergebnisse

3.1 Räumliche Variabilität von Bodenparametern

Bei allen untersuchten Bodenparametern zeigte sich eine große Schwankungsbreite. Der C_{org} -Gehalt betrug 1,09 (0,67 – 1,49) %, der N_{t} -Gehalt 0,11 (0,07 – 0,17) % und der Nitrat-N-Vorrat 40,1 (25,3 – 63,6) kg ha^{-1} . C_{org} - und N_{t} -Gehalt wiesen ein ähnliches Verteilungsmuster auf (Abbildung 1). Der in den Bodenproben ermittelte Wassergehalt betrug 32 (25 – 38) g (100 g)⁻¹. Besonders eng korrelieren die C_{org} und N_{t} - Gehalte ($R^2 = 0,94$). Der Wassergehalt der Bodenproben weist eine mittlere Beziehung mit dem C_{org} und N_{t} -Gehalt auf ($R^2 = 0,42$ bzw. 0,51).

Abb. 1: „Bergfeld“ (13 ha): C_{org}-Gehalt und N_t-Gehalt

3.2 Teilflächenspezifische N-Bilanz

Die mit verschiedenen Methoden bestimmten N-Entzüge zeigen unterschiedliche Schwankungsbreiten – Sensor: 169 (101 – 269) kg ha⁻¹ bzw. Mähdrescher: 198 (121 – 309) kg ha⁻¹ (Abbildung 2). Der mithilfe der Fuhrwerkswaage ermittelte mittlere Korntrag betrug 7,9 t ha⁻¹, der mittlere Korn N-Entzug 157 kg ha⁻¹. Der teilflächenspezifische berechnete N-Saldo zeigte eine große Schwankungsbreite auf der Ackerfläche. Der N-Saldo auf Grundlage der Mähdrescher-Ertragsdaten betrug 10 (-116 bis + 72) kg ha⁻¹, der N-Saldo auf Grundlage des Sensors betrug 24 (-76 bis + 91) kg ha⁻¹.

Zwischen den beiden Methoden der Stickstoffbilanzierung nach Sensor- und Mähdrescherdaten wurde eine Beziehung von $R^2 = 0,58$ ermittelt. Die beiden Methoden zur Bestimmung der N-Entzüge zeigten Zusammenhänge mit den Bodenparametern. So weist die N-Aufnahme des Sensors eine Beziehung mit dem C_{org}-Gehalt von $R^2 = 0,31$; mit dem N_t-Gehalt von $R^2 = 0,36$ und dem Wassergehalt der Bodenproben mit $R^2 = 0,37$ auf. Der Mähdrescher mit dem C_{org}-Gehalt $R^2 = 0,36$; mit dem N_t-Gehalt $R^2 = 0,40$ und mit dem Wassergehalt der Bodenproben $R^2 = 0,30$.

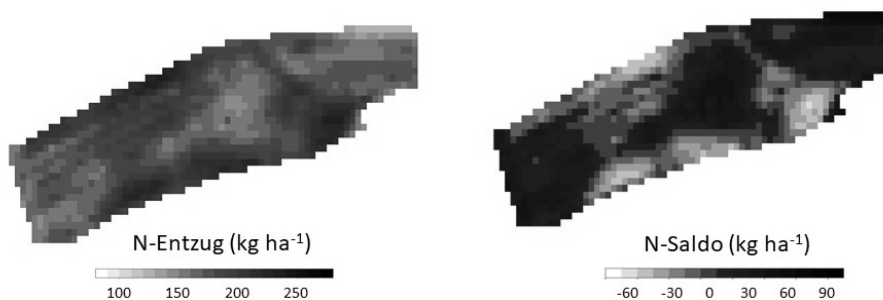


Abb. 2: „Bergfeld“ (13 ha): Mähdrescherertragserfassung: N-Entzug Korn und N-Saldo

4 Diskussion und Ausblick

Die Witterungsbedingungen des Jahres 2018 führten zu einer großen Variabilität der Erträge und N-Aufnahme (Abbildung 2), was durch die stark wechselnden Bodenbedingungen (Abbildung 1) und der daraus folgenden differenzierten Wasserverfügbarkeit zu erklären ist.

Die Untersuchungen zeigen eine hohe Variabilität der N-Salden auf einem einheitlich gedüngten Schlag. Das bedeutet, dass auch bei einer ausgeglichenen N-Bilanz umweltrelevante N-Verluste, z. B. Nitratausträge, auf Teilflächen auftreten können. Dies wird an den räumlich variablen N-Salden (- 116 bis + 72 kg ha⁻¹)³ bzw. (-76 bis + 91 kg ha⁻¹)⁴ deutlich. Der durchschnittliche N-Saldo der Ackerfläche lag bei 10 kg ha⁻¹ bzw. 24 kg ha⁻¹ und weist eine nahezu ausgeglichene Bilanz auf. Die Teilflächen mit hohen bzw. negativen N-Salden werden bei einer schlageinheitlichen Bilanzrechnung somit nicht sichtbar.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Methodik *Mähdrescher-Ertrag multipliziert mit dem N-Gehalt der Biomassehandschnitte* die N-Aufnahme überschätzt (198 kg ha⁻¹) im Vergleich zur mittleren Korn N-Aufnahme, der mit dem durchschnittlichen Ertrag der Fuhrwerkswaage ermittelt worden ist (157 kg ha⁻¹). Dies kann an einer fehlerhaften Kalibrierung des Mähdreschers liegen [St02] oder an der Multiplikation eines Durchschnittswerts des N-Gehalts mit den Ertragsdaten des Mähdreschers. Der mittlere Korn N-Entzug berechnet aus Reflexionsdaten [Ma19] liegt mit 169 kg ha⁻¹ näher an der Realität.

Zudem zeigen die Ergebnisse eindrucksvoll, dass in den positiven N-Salden ein Einsparpotenzial der N-Düngungsmenge liegt und heterogene Ackerflächen teilflächenspezifisch gedüngt werden sollten. Mit einer sensorgestützten N-Düngung ist es möglich, während der Vegetation auf bereits überdüngte Teilflächen zu reagieren.

In diesem Beitrag wurde das Prinzip der teilflächenspezifischen N-Bilanzierung vorgestellt. In weiteren Untersuchungen werden wir analysieren ob, a) die in dieser Arbeit verwendeten Datenquellen und Methoden auch bei mehrjährigen Vergleichen und mit unterschiedlichen Bedingungen in Bezug auf Kulturart, Klima und Bewirtschaftung (z. B. langfristige organische Düngung) ähnliche Ergebnisse erzielen, b) bei einer sensorgestützten teilflächenspezifischen N-Düngung im Vergleich zur schlageinheitlichen N-Düngung eine geringere Variabilität der N-Salden (und insgesamt geringere N-Verluste) auftreten, c) die berechneten N-Salden der Teilflächen tatsächlich unterschiedliche Nitratausträge kennzeichnen (Messung der Nitratverluste).

³ Auf Grundlage der Mähdrescher-Ertragsdaten

⁴ Auf Grundlage des Sensors

Literaturverzeichnis

- [ES19] ESA (2019): European Space Agency. Sentinel-2. Online verfügbar unter <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>, zuletzt geprüft am 26.10.2019.
- [Go03] Godwin, R. J.; Wood, G. A.; Taylor, J. C.; Knight, S. M.; Welsh, J. P. (2003): Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. In: *Biosystems Engineering* 84 (4), S. 375-391.
- [Hü03] Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Zugl.: Halle (Saale), Univ., Habil.-Schr., 2002. Aachen: Shaker
- [Hü17] Hülsbergen, Kurt-Jürgen; Maidl, Franz-Xaver; Forster, Felix; Prücklmaier, Josef (2017): Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement. am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung.
- [KCH10] Küstermann, Björn; Christen, Olaf; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2010): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135 (1-2), S. 70-80.
- [Ma63] Matheron, Georges (1963): Principles of geostatistics. In: *Economic Geology* 58 (8), S. 1246-1266.
- [Ma17] Maidl, F.-X; Spicker, A.; Prücklmaier, J.; Hülsbergen, K.-J. (2017): Minderung von Nitratausträgen in Trinkwassereinzugsgebieten durch sensorgestützte N-Düngung. VDLUFA-Schriftenreihe 74.
- [Ma19] Maidl, Franz-Xaver; Spicker, Andreas; Weng, Jonas; Hülsbergen, Kurt-Jürgen (2019): Ableitung des teilflächenspezifischen Kornertrags von Getreide aus Reflexionsdaten. In A. Meyer-Aurich et al.: Digitalisierung in kleinstrukturierten Regionen, Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2019 131
- [MSH04] Maidl, F.-X; Schächtl, J.; Huber, G. (2004): Strategies for Site-Specific Nitrogen Fertilization on Winter Wheat. In: *MULLA, D.J. (ED), Precision Agriculture 2004, Proc. 7. Int. Conf. On Prec. Agriculture, Minnesota/USA*, S. 1938-1948.
- [Sp16] Spicker, Andreas (2016): Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen. 1. Auflage. Berlin: Verlag Dr. Köster (Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme, Band 5).
- [St02] Steinmayr, Thomas (2002): Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdrescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung.
- [ST13] Salo, Tapio; Turtola, Eila (2006): Nitrogen balance as an indicator of nitrogen leaching in Finland. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113 (1-4), S. 98-107