

## Teilflächenspezifische N-Bilanzen auf Ackerschlägen – Einfluss von Bodenheterogenität und Methoden der Ertragserfassung

Martin Mittermayer<sup>1</sup>, Johannes Schuster<sup>1</sup>, Ludwig Nätscher<sup>1</sup>, Franz-Xaver Maidl<sup>1</sup> und  
Kurt-Jürgen Hülsbergen<sup>1</sup>

**Abstract:** Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf Ackerflächen bedingt ein unterschiedliches Pflanzenwachstum auf Teilflächen. Auf der Grundlage von Mähdrescher-, Sensor- und Satellitendaten wurden in dieser Arbeit teilflächenspezifische Erträge, N-Entzüge und N-Bilanzen analysiert. Durch die Bestimmung von georeferenzierten Bodenparametern ( $C_{org}$ ,  $N_t$ ) wurden Einflussfaktoren auf die variierenden Pflanzenparameter geprüft. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass a) die Erträge und N-Bilanzen auf den Untersuchungsflächen große Schwankungsbreiten aufweisen und Teilflächen mit sehr hohen N-Salden auftreten, die bei einer schlageinheitlichen Bilanzierung nicht sichtbar werden, und b) die angewandten digitalen Technologien für die Bestimmung von Ertrag, N-Entzug und N-Saldo geeignet sind, aber noch Verbesserungspotenzial in der Genauigkeit zeigen. Die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte der Teilflächen sind positiv mit dem Ertrag und N-Entzug sowie negativ mit den N-Salden korreliert.

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

### 1 Einleitung

Ackerbaulich genutzte Böden zeigen eine mehr oder weniger große Variabilität von ertragsrelevanten Eigenschaften wie Textur, Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität aufgrund ihrer Entstehung, durch Bodenverlagerung in Erosionsprozessen oder differenzierte Nutzung (Br02). Mit den kleinräumig wechselnden Bodeneigenschaften variieren Ertragspotenziale, Biomasse- und Ertragsbildung sowie die N-Aufnahme von Pflanzenbeständen in Ackerflächen (Hül17). Wenn die N-Düngung auf heterogenen Schlägen einheitlich erfolgt, kann das dazu führen, dass (a) im Hohertragsbereich das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft wird und (b) im Niedrigertragsbereich hohe N-Salden und Nitratverluste auftreten, ggf. auch Stickstoff im Boden akkumuliert wird [Hül17]. 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 traktormontierter Reflexionssensoren [MSH04], Satellitendaten [MB09] und Mähdrescher mit einer integrierten Ertragserfassung [St02]

---

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme,  
Liesel-Beckmann-Straße 2, 85354 Freising, martin.mittermayer@tum.de, johannes.schuster@tum.de,  
ludwig.naetscher@tum.de, maidl@wzw.tum.de, kurt.juergen.huelsbergen@tum.de

zur Berechnung der Biomasse und N-Aufnahme von Pflanzenbeständen genutzt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der räumlichen Variabilität von Erträgen, N-Entzügen und N-Salden auf heterogenen Ackerschlägen auf der Grundlage georeferenzierter Pflanzen- und Bodenparameter auf der Grundlage von Mährescher-, Sensor- und Satellitendaten.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Datenerfassung

Die für die Untersuchungen notwendigen Boden- und Pflanzenparameter wurden in den Jahren 2018 und 2019 auf den Ackerflächen „Itzling“ (4,7 ha; 2018) in Dürnast (Landkreis Freising) und „Hofacker“ (4,2 ha; 2019) in Hohenthann (Landkreis Landshut) bestimmt. Die untersuchten Böden sind Cambisole. Im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981 bis 2010) wurden in den Untersuchungsjahren geringere Jahresniederschläge und höhere Durchschnittstemperaturen gemessen.

Die Untersuchungen wurden in Winterweizen durchgeführt. Zur Erfassung der Variabilität der Pflanzenparameter (Ertrag) wurden Mährescher mit Volumenstrommessung, traktormontierte Sensordaten (Reflexionsmessung, REIP) und Satellitendaten (Reflexionsmessung, NDVI) verwendet. Zur Erfassung der Variabilität von Bodeneigenschaften wurden georeferenzierte Bodenproben gezogen (Itzling 48 Punkte, Hofacker 40 Punkte) für die Laboranalyse des Gehalts an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Gesamt-Stickstoff ( $N_t$ ).

### 2.2 Datenanalyse

Die Daten wurden in Raster gleicher Auflösung (10 m x 10 m) durch Interpolation mit dem Kriging-Verfahren [Ma63] überführt. 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 Winterweizen, die auf den Untersuchungsflächen schlageinheitlich appliziert wurde (Itzling  $182 \text{ kg ha}^{-1}$ , Hofacker  $209 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Der N-Output entspricht dem Korn-N-Entzug. Der N-Entzug wurde bestimmt durch (a) Kornertrag nach Volumenstrommessung am Mährescher, multipliziert mit dem N-Gehalt im Korn aus Biomassehandschnitten, (b) Kornertrag nach Satellitendaten (NDVI) und PROMET-Modell (MB09) multipliziert mit dem N-Gehalt im

Korn aus Biomassehandschnitten und (c) über Reflexionsmessungen mit einem traktormontierten Sensor, Berechnung des Vegetationsindex REIP und Verwendung eines Algorithmus zur Schätzung der N-Aufnahme [Ma19].

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Räumliche Variabilität der Pflanzen- und Bodenparameter

Die Ergebnisse zeigen, dass die verwendeten Analysemethoden zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Tab. 1, 2). Während auf dem Schlag „Hofacker“ die mittleren Kornerträge gut übereinstimmen, wurden auf dem Schlag „Itzling“ bedeutende Abweichungen zwischen Mähdrescher-, Satelliten- und Sensordaten festgestellt.

Parameter	Datenquelle	Einheit	Mittel	Min	Max	Sd
C <sub>org</sub> -Gehalt	Bodenproben	%	1,48	1,21	2,22	0,15
N <sub>r</sub> -Gehalt	Bodenproben	%	0,16	0,11	0,23	0,10
Kornertrag*	Mähdrescher	t ha <sup>-1</sup>	9,2	6,5	12,4	1,4
Kornertrag*	Satellit	t ha <sup>-1</sup>	6,5	3,2	9,1	1,2
Kornertrag*	Sensor	t ha <sup>-1</sup>	7,6	3,9	12,2	1,2
N-Saldo	Mähdrescher	kg ha <sup>-1</sup>	15,8	-36,3	76,7	22,8
N-Saldo	Satellit	kg ha <sup>-1</sup>	75,6	35,3	130,1	19,2
N-Saldo	Sensor	kg ha <sup>-1</sup>	10,0	-93,7	92,5	28,6

Tab. 1: Pflanzen- und Bodenparameter auf Schlag Itzling (4,7 ha), \*Winterweizen (2018)

Parameter	Datenquelle	Einheit	Mittel	Min	Max	Sd
C <sub>org</sub> -Gehalt	Bodenproben	%	1,28	0,96	1,75	0,20
N <sub>r</sub> -Gehalt	Bodenproben	%	0,12	0,09	0,17	0,02
Kornertrag*	Mähdrescher	t ha <sup>-1</sup>	9,0	4,7	12,9	1,7
Kornertrag*	Satellit	t ha <sup>-1</sup>	8,8	6,6	10,3	0,8
Kornertrag*	Sensor	t ha <sup>-1</sup>	8,9	3,2	14,0	1,2
N-Saldo	Mähdrescher	kg ha <sup>-1</sup>	59,6	-4,3	130,4	28,0
N-Saldo	Satellit	kg ha <sup>-1</sup>	66,0	39,7	100,7	13,2
N-Saldo	Sensor	kg ha <sup>-1</sup>	61,0	-22,2	155,3	20,7

Tab. 2: Pflanzen- und Bodenparameter auf Schlag Hofacker (4,2 ha), \*Winterweizen (2019)

Die untersuchten Bodenparameter ( $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{t}}$ -Gehalt) weisen ebenfalls eine hohe räumliche Variabilität auf und zeigen zudem ähnliche Verteilungsmuster (Abb.1, 2). In den Zonen mit hohen  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{t}}$ -Gehalten wurden die höchsten N-Entzüge und niedrigsten N-Salden gemessen.

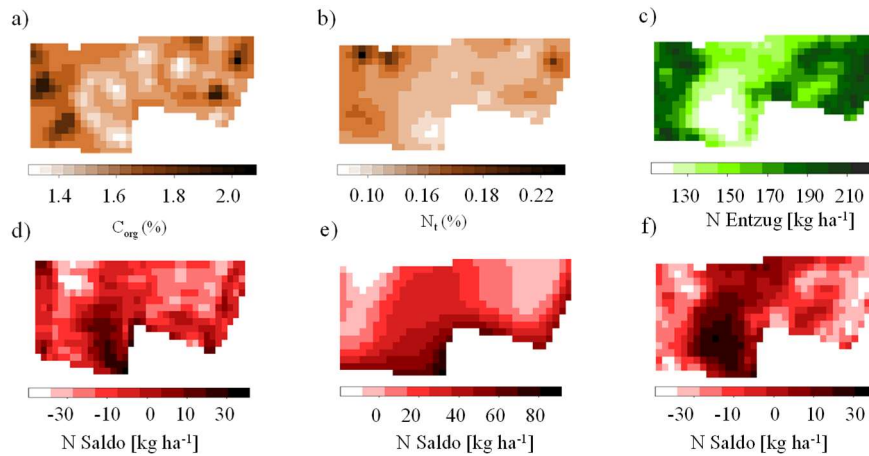


Abb. 1: Schlag Itzling (4,7 ha), räumliche Verteilung (10 x 10 m Raster): a)  $C_{\text{org}}$ -Gehalt, b)  $N_{\text{t}}$ -Gehalt, c) N-Entzug (Sensor), d) N-Saldo (Mährescher), e) N-Saldo (Satellit) f) N-Saldo (Sensor)

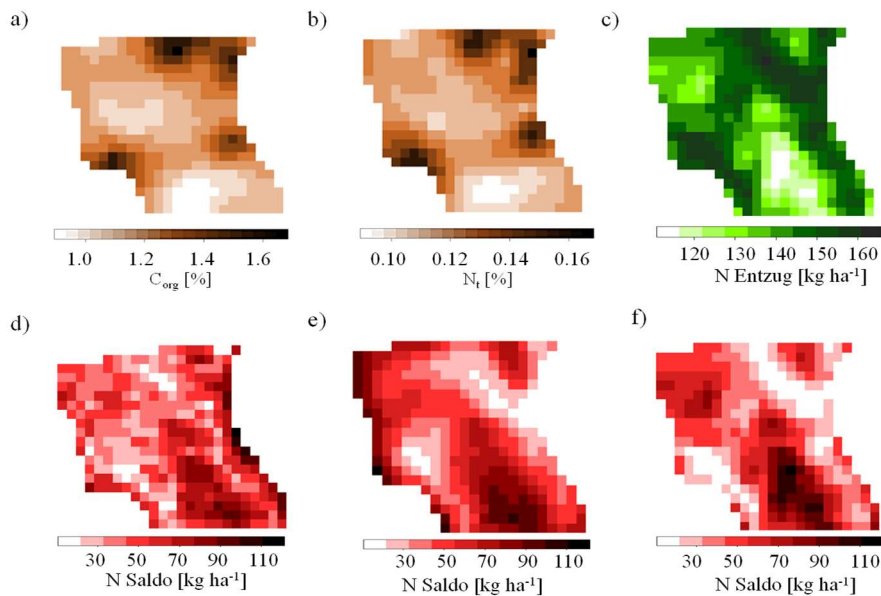


Abb. 2: Schlag Hofacker (4,2 ha), räumliche Verteilung (10 x 10 m Raster): a)  $C_{\text{org}}$ -Gehalt, b)  $N_{\text{t}}$ -Gehalt, c) N-Entzug (Sensor), d) N-Saldo (Mährescher), e) N-Saldo (Satellit) f) N-Saldo (Sensor)

### 3.2 Korrelationen zwischen Pflanzen- und Bodenparametern

Auf den untersuchten Ackerschlägen wurden zwischen den  $C_{org}$ - bzw.  $N_t$ -Gehalten negative Beziehungen mit den N-Salden nach Mähdrescher, Satelliten- und Sensordaten ermittelt (Tab. 3, 4). Je höher der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalt, desto niedriger die N-Salden.

Mit dem Sensor wurden die höchsten Korrelationen mit den Bodenparametern ermittelt, mit dem Mähdrescher die niedrigsten. Die angewandten digitalen Technologien zeigen mittlere Korrelationen zueinander. Auf der Ackerfläche „Itzling“ wurden Beziehungen von  $r = 0,51$  bis  $0,62$  berechnet und auf der Ackerfläche „Hofacker“ von  $r = 0,39$  bis  $0,69$ .

$r$	$N_t$	Ertrag (Mähdrescher)	N-Saldo (Mähdrescher)	N-Saldo (Satellit)	N-Saldo (Sensor)
$C_{org}$	0,91	0,37	-0,37	-0,54	-0,58
$N_t$		0,39	-0,39	-0,54	-0,52
N-Saldo (Mähdrescher)				0,62	0,51
N-Saldo (Satellit)					0,53

Tab. 3: Korrelationsmatrix Schlag Itzling

$r$	$N_t$	Ertrag (Mähdrescher)	N-Saldo (Mähdrescher)	N-Saldo (Satellit)	N-Saldo (Sensor)
$C_{org}$	0,96	0,10	-0,10	-0,48	-0,62
$N_t$		0,11	-0,11	-0,45	-0,52
N-Saldo (Mähdrescher)				0,39	0,54
N-Saldo (Satellit)					0,69

Tab. 4: Korrelationsmatrix Schlag Hofacker

## 4 Diskussion

Unter den Witterungsbedingungen der Jahre 2018 und 2019 wurde eine große Variabilität der Erträge und N-Entzüge aufgrund kleinräumig wechselnder Bodeneigenschaften festgestellt. Die Untersuchungen zeigen eine hohe Variabilität der N-Salden auf

einheitlich gedüngten Schlägen. Das bedeutet, dass auch bei einer ausgeglichenen N-Bilanz umweltrelevante N-Verluste auf Teilflächen auftreten können. Dies wird an den räumlich variablen N-Salden (nach Sensordaten) von -93 bis 92 kg ha<sup>-1</sup> auf den Schlag Itzling und -22 bis 155 kg ha<sup>-1</sup> auf dem Schlag Hofacker deutlich. Die Teilflächen mit hohen N-Salden und einer hohen N-Verlustgefährdung werden bei schlageinheitlichen Bilanzrechnungen nicht sichtbar. Übereinstimmend auf den Schlägen haben der C<sub>org</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalt einen positiven Einfluss auf den Ertrag und N-Entzug, sie korrelieren negativ mit den N-Salden.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass bei hohen N-Salden in Niedrigertragszonen ein erhebliches Dünger-Einsparpotenzial besteht und heterogene Ackerflächen teilflächenspezifisch gedüngt werden sollten. Der Vergleich der mit unterschiedlichen Methoden ermittelten Ergebnisse belegt, dass die digitalen Technologien für die teilflächenspezifische Bestimmung von Ertrag, N-Aufnahme und N-Saldo grundsätzlich geeignet sind. Die Genauigkeit der Methoden kann aber weiter verbessert werden, z. B. durch die Verwendung von NIRS-Sensoren an Mähdreschern zur Proteingehaltsbestimmung sowie durch verbesserte Algorithmen und Modelle bei der Verwendung von Sensor- und Satellitendaten.

#### Literaturverzeichnis

- [Br02] Brinkmann, Johannes (2002): Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften auf dem Landwirtschaftlichen Versuchsgut Frankenforst im Pleiser Hügelland; verfügbar unter: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2002/0118/0118.pdf>
- [Hü17] Hülsbergen, Kurt-Jürgen; Maidl, Franz-Xaver; Forster, Felix; Prücklmaier, Josef (2017): Minderung von Nitrat austrägen in Trinkwassereinzugsgebieten durch optimiertes Stickstoffmanagement. am Beispiel der Gemeinde Hohenthann (Niederbayern) mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung. Forschungsbericht, Technische Universität München.
- [Ma63] Matheron, Georges (1963): Principles of geostatistics. In: *Economic Geology* 58 (8), S. 1246–1266.
- [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 131-134.
- [MB09] Mauser, Wolfram; Bach, Heike (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds, *Journal of Hydrology* 376 (3-4), S. 362-377.
- [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.
- [St02] Steinmayr, Thomas (2002): Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdrescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung, Dissertation Weihenstephan.