

## Kosteneffiziente Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Düngereduktion: standortspezifische Analyse mit simulierten Ertragsfunktionen

Yusuf Nadi Karatay<sup>1,2</sup>, Andreas Meyer-Aurich<sup>1</sup>, Uwe Hunstock<sup>1</sup>, Tommaso Stella<sup>3</sup> und Claas Nendel<sup>3</sup>

**Abstract:** Stickstoffdüngung (N) in der Landwirtschaft ist essenziell, um die wachsende Weltbevölkerung ernähren zu können. Der vermehrte N-Düngereinsatz beinhaltet allerdings hohe externe Kosten, u. a. aufgrund von Treibhausgasemissionen (THG). Eine Reduktion der N-Düngung kann die Vermeidung von THG-Emissionen ermöglichen, allerdings gleichzeitig Ertragseinbußen und damit Einkommensverluste verursachen. Die Höhe der Kosten hängt davon ab, wie Erträge auf reduzierte N-Düngung reagieren. Ertragseinbußen aufgrund reduzierter Düngung können von Standort zu Standort unterschiedlich sein. Unsere Studie geht den Forschungsfragen nach, ob eine N-Düngereduktion als eine kosteneffiziente THG-Vermeidungsmaßnahme berücksichtigt werden kann und ob Standorte unterschiedlicher Ertragspotenziale im Hinblick auf THG-Vermeidungskosten komparative Vorteile aufweisen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede der Ertragswirkungen zu unterschiedlichen Vermeidungskosten der THG-Emissionen durch N-Düngereduktion führen. Die Kosteneffizienz der THG-Vermeidung mit N-Düngereduktion kann gesteigert werden, wenn standortspezifische komparative Kostenvorteile berücksichtigt werden. Demzufolge kann z. B. eine optimale regionale N-Düngereduktion für ein gemeinsames THG-Vermeidungsziel erzielt werden.

**Keywords:** Stickstoff, N-Düngung, THG, Klimawandel, komparative Kostenvorteile

### 1 Einleitung

Stickstoff (N) ist essenziell für die landwirtschaftliche Produktion und wird insbesondere in Form von mineralischem N-Dünger in wachsendem Maße eingesetzt, um die Agrarproduktion im Hinblick auf die wachsende Weltbevölkerung zu steigern [RV09]. Der vermehrte N-Düngereinsatz bedingt allerdings hohe externe Kosten, u. a. verursacht durch die Folgen von Umweltbelastungen und Treibhausgasemissionen (THG) [Su11]. Eine Reduktion der N-Düngung kann die Vermeidung von THG-Emissionen ermöglichen, allerdings gleichzeitig Ertragseinbußen und damit Einkommensverluste verursachen [KM18]. Die Höhe der Kosten hängt davon ab, wie die Erträge auf

---

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

<sup>2</sup> Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Invalidenstraße 42, 10115 Berlin

<sup>3</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V. (ZALF), Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg, tommaso.stella@zalf.de (T. Stella), nendel@zalf.de (C. Nendel)

reduzierte N-Düngung reagieren, welche von Standort zu Standort unterschiedlich sein kann.

Um die standortspezifischen marginalen Vermeidungskosten der THG-Emissionen mit N-Düngereduktion berechnen zu können, muss die Ertragswirkung der N-Düngung geschätzt werden. Diese kann mit empirischen Daten langjähriger Feldversuche, mit statistischen Modellen oder mit den Modellen, die das Pflanzenwachstum prozessbasiert und dynamisch simulieren, geschätzt werden. In unserer Studie haben wir mithilfe des Pflanzenwachstumsmodells MONICA (*Model for Nitrogen and Carbon in Agroecosystems*) die Ertragswirkung der N-Düngung auf Standorten mit unterschiedlichen Standorteigenschaften (Ertragspotenzialen) im Bundesland Brandenburg simuliert.

Der Beitrag geht der Forschungsfrage nach, ob eine N-Düngereduktion als eine kosteneffiziente THG-Vermeidungsmaßnahme berücksichtigt werden kann. Dazu wird untersucht, ob Standorte unterschiedlicher Ertragspotenziale im Hinblick auf THG-Vermeidungskosten komparative Vorteile aufweisen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Pflanzenwachstumssimulation mit MONICA und Schätzung der Ertragsfunktionen

In unserer Studie wurde mit Hilfe des Pflanzenwachstumsmodells MONICA die Ertragswirkung des N-Düngers auf Standorten mit unterschiedlichen Standorteigenschaften (Ertragspotenzialen) im Bundesland Brandenburg für 30 Jahre (1981-2010) simuliert. MONICA ist ein dynamisches, prozessbasiertes Simulationsmodell, das in täglichen Zeitschritten die wichtigsten pflanzenwachstumsrelevanten Prozesse in Boden und Pflanze und deren Interaktion simulieren kann. Die detaillierte Modellbeschreibung ist in [MO18] zu finden. Für die Simulationen greift MONICA auf eine interne Datenbank mit Parametern für individuelle Ackerkulturen zurück. Diese Parameter wurden in mehreren Studien kalibriert und das Modell wurde umfangreich getestet (siehe z. B. [Ne11]; [Ne14]). Zusätzlich benötigt das Modell Information zum Boden, zum Wetter und zur Bewirtschaftung (Saat-, Dünge- und Erntetermine, Düngemenge etc.).

Für die Bodenparameter wurden Daten von der Karte „BÜK300“ (Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 300.000) abgeleitet. Die BÜK300 ist eine digitale bodengeologische Karte für Brandenburg. In der substratspezifisch gegliederten Legende der BÜK300 werden 99 Einheiten dargestellt, in denen die Leitbodenformengesellschaften abgebildet sind. Die Leitbodenformengesellschaften enthalten 289 Flächenbodenformen, die mit chemischen und physikalischen Eigenschaften belegt wurden [BÜK07]. Die notwendigen Parameter für die Ertragssimulation wurden aus diesen Eigenschaften der Flächenbodenformen abgeleitet und MONICA zugeführt. Bei

den Berechnungen wurde möglicher Einfluss durch Grundwasser nicht berücksichtigt. Die grundwasserbeeinflussten Bodenformen sowie für Forst, Siedlung und Bauwirtschaft genutzte Bodenformen wurden daher nicht berücksichtigt. Abgeleitete Bodenparameter von allen anderen Flächenbodenformen wurden für die Simulation des Pflanzenwachstums von Winterweizen in Abhängigkeit von sieben N-Düngergaben (30-250 kg N/ha) herangezogen. Ab 60 kg N/ha wurden die N-Gaben geteilt, um praxisähnliche Düngestrategien abzubilden. Auf eine Teilung hoher Gaben in drei oder vier Teilgaben wurde jedoch verzichtet, um keine Artefakte der Düngestrategie zu provozieren. Für die Vermeidungskostenanalyse wurden die Ertragswirkungen von zwanzig Standorten mit den zehn höchsten und zehn niedrigsten Ertragspotenzialen gewählt.

Wetterdaten für die Simulationen wurden von der Station Potsdam des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (1980-2010) entnommen. Als Saattermin wurde jeweils der 15. Oktober und als Erntetermin der 31. August festgelegt. Zwei Düngetermine wurden berücksichtigt und nach langjährigen Mittelwerten aus DWD-Phänologiedaten definiert. Für den ersten Düngetermin wurde der 25. März angenommen, für den zweiten Termin wurde der Beginn des Schossens für Winterweizen gesetzt (29. April).

Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden standortspezifische Ertragsfunktionen als quadratisches Modell mit Plateau (SAS, Version 9.4) geschätzt. Diese Ertragsfunktion nimmt an, dass der Ertrag auf die N-Düngung nach dem Bodenertragsgesetz reagiert, also bis zu einem Plateau (Maximalertrag) mit abnehmender Zuwachsrates steigt, und auf dem Plateau verbleibt. Eine weitere Steigerung der N-Düngung führt in dieser Annahme jedoch nicht zu einer Ertragsabnahme.

## 2.2 Treibhausgasemissionen durch N-Düngereduktion

Die THG-Emissionen wurden partiell für N-düngerrelevante Emissionen nach [KM18] bilanziert. Diese beinhalten direkte und indirekte Lachgasemissionen, und die Emissionen, die bei der Herstellung der N-Dünger entstehen. Als mineralischer N-Dünger wurde die Verwendung von Kalkammonsalpeter (KAS) mit 27 % N-Gehalt angenommen, der in Brandenburg häufig verwendet wird. Es wurde außerdem angenommen, dass kein organischer Dünger auf Weizenfelder ausgebracht wurde und oberirdische Ernterückstände nach der Ernte von den Feldern entfernt wurden. Die Lachgasemissionen wurden gemäß der Richtlinie von *Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC06] geschätzt. Die in dieser Studie berücksichtigten direkten Lachgasemissionen schlossen die Lachgasemissionen ein, die durch N-Mineralisation direkt aus dem Boden entstehen, wo der N-Dünger eingebracht wird. Die betrachteten indirekten Emissionen bestehen aus Lachgasemissionen durch Ausgasung, Auswaschung und Abfluss von N. Im Gesamten wurden 9,91 kg CO<sub>2</sub>ä/kg N angerechnet. Für weitere Details siehe [KM18].

### 2.3 Wirtschaftlichkeit und Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen durch N-Düngerreduktion

Die N-Düngung wurde in Abhängigkeit vom standortspezifischen Maximalertrag (Plateau) in Abhängigkeit vom Entzug berechnet und diese als standortspezifische Höhe der N-Düngung im Basisszenario angenommen. Der Entzug wurde mit dem Faktor 0,022 kg N/kg Weizenenertrag, abgeleitet von [HL16], kalkuliert. Damit wurde die N-kostenfreie Leistung als Marktleistung durch den erzielten Ertrag abzüglich der N-Düngerkosten berechnet. Die Preise für Winterweizen und N-Dünger (KAS) wurden aus [HL16] entnommen. Um den Effekt der N-Düngerreduktion auf Wirtschaftlichkeit bzw. Vermeidungskosten untersuchen zu können, wurde in einem Szenario eine N-Düngerreduktion in Höhe von 10 kg N/ha von der jeweiligen Ausgangssituation simuliert. Die geschätzten Ertragsfunktionen anhand der MONICA-Simulationsergebnisse wurden für die Ertragswirkung auf die N-Düngerreduktion angewendet.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Anhand des Pflanzenwachstumsmodells MONICA wurde die Ertragswirkung der N-Düngung simuliert (Abb. 1). Diese zeigte an produktiveren Standorten bereits bei niedrigen N-Düngemengen starken Ertragszuwachs. Nach etwa 160 kg N/ha Düngung wurde an diesen Standorten der Maximalertrag (das Plateau) erreicht. An Niedrigerertragsstandorten wurde das Plateau jedoch erwartungsgemäß erst mit höherer N-Düngung erreicht. Dieser Unterschied kann mit dem höheren N-Nachlieferungspotenzial der Böden an Hohertragsstandorten erklärt werden.

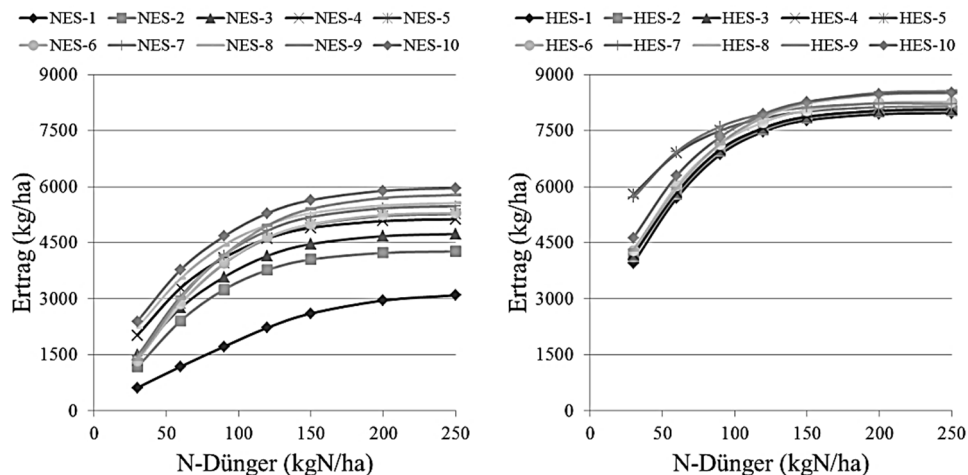


Abb. 1: Simulation der Ertragswirkungen durch N-Düngung mit dem Pflanzenwachstumsmodell MONICA an Niedrigerertragsstandorten (NES) und Hoherertragsstandorten (HES)

Die Untersuchungen zeigen, dass die Unterschiede der Ertragswirkungen zu unterschiedlichen Vermeidungskosten der THG-Emissionen aufgrund einer N-Düngerreduktion führen (Tab. 1). An Niedrigertragsstandorten wurden starke Ertragseinbußen (von 170 bis 250 kg/ha) gefunden. Dementsprechend hat die Düngereduktion zu geringeren N-kostenfreien Leistungen (18-31 €/ha Einkommensverlust) geführt. Daher sind die Kosten für THG-Vermeidung mit N-Düngerreduktion an Niedrigertragsstandorten entsprechend hoch (180-310 €/Mg CO<sub>2</sub>ä). An Hohertragsstandorten war keine Ertragsänderung zu betrachten (Tab. 1). N-kostenfreie Leistungen haben zugenommen (10 €/ha), weil mit weniger N-Düngung dieselben Ertragshöhen erreicht wurden. Dadurch ergab die N-Düngerreduktion an diesen Standorten negative Vermeidungskosten.

	Basisszenario			Szenario: Düngereduktion 10 kg N/ha		
	N-Düngung (kg N/ha)	Ertrag (Mg/ha)	Nkfl (€/ha)	ΔErtrag (Mg/ha)	ΔNkfl (€/ha)	THG-VK (€/Mg CO <sub>2</sub> ä)
NES	68 – 130	1,37 – 5,48	156 – 818	-0.17 – -0.25	-18 – -31	180 – 310
HES	174 – 187	7,82 – 8,46	1194 – 1297	0	10	-97

Tab. 1: Auswirkung der N-Düngerreduktion auf Erträge und N-kostenfreie Leistung (Nkfl), und dadurch entstehende Vermeidungskosten (VK) von Treibhausgasemissionen (THG)  
NES: Niedrigertragsstandorte; HES: Hohertragsstandorte; Δ: Änderung

Moderate N-Düngerreduktion wurde in [KM18] als relativ günstige THG-Vermeidungsmaßnahme gefunden, wobei sie den Referenzpunkt für die N-Düngerreduktion als das *ex-post* berechnete ökonomische Optimum gelegt haben. Zum Düngezeitpunkt wird der genaue Verlauf der Ertragswirkung zu den Landwirten unbekannt, weil sich die Witterung auf diesen Verlauf jedes Jahr anders auswirken kann. In der Praxis wird die Ertragserwartung als Referenzpunkt gesetzt und dieser mit Ab- und Zufuhr des Stickstoffs im System für die Bestimmung der N-Düngung bilanziert. Allerdings zeigen unsere Ergebnisse, dass Überdüngung an Hohertragsstandorten und Unterdüngung an Niedrigertragsstandorten vorkommen können. Diese beeinflussen die Vermeidungskosten stark, da an Hohertragsstandorten am Plateau zu düngen ineffizient sein kann, bzw. an Niedrigertragsstandorten eventuell das ökonomische Optimum wegen umweltrechtlicher Begrenzungen nicht ausgeschöpft werden kann.

#### 4 Fazit und Ausblick

N-Düngerreduktion kann eine kosteneffiziente THG-Vermeidungsoption sein, wenn sie nicht zu hohen Ertragseinbußen führt. Die Kosteneffizienz der THG-Vermeidung mit N-Düngerreduktion kann weiter verbessert werden, wenn standortspezifische komparative Kostenvorteile berücksichtigt werden, da eine gezielte standortspezifische N-Düngerreduktion die marginalen Kosten minimieren kann. Demzufolge kann z. B. eine optimale regionale N-Düngerreduktion für ein gemeinsames THG-Vermeidungsziel erzielt werden.

Außerdem kann N-Düngerreduktion positive Umweltwirkungen aufgrund verringerter Nitratauswaschung haben, was bislang überwiegend als die Hauptmotivation diesbezüglicher Politiken der N-Düngerreduktion verwendet wurde. Wenn das THG-Vermeidungspotenzial von der N-Düngerreduktion mit dem Potenzial der Nitratauswaschungsvermeidung mitberechnet werden kann, kann der Beitrag der N-Düngerreduktion zur Verringerung der externen Kosten der N-Düngung noch weiter steigen.

#### Literaturverzeichnis

- [BÜK07] Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:300 000 (BÜK 300), Hergestellt unter Verwendung von digitalen Daten der BÜK 300 des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), Kleinmachnow, 2007.
- [HL16] Hanff, H., Lau, H.: Datensammlung für die Betriebsplanung und die Betriebswirtschaftliche Bewertung Landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg, 7', Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Potsdam, 2016.
- [IPCC06] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2006.
- [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.
- [MO18] MONICA, The Model for Nitrogen and Carbon in Agro-ecosystems, <https://github.com/zalf-rpm/monica/wiki>, Stand: 01.12.2018.
- [Ne11] Nendel, C., Berg, M., Kersebaum, K. C., Mirschel, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R.: The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, 222(9), 1614-1625, 2011.
- [Ne14] Nendel, C., Kersebaum, K. C., Mirschel, W., Wenkel, K. O.: Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model. *European Journal of Agronomy*, 52, 47-56, 2014.
- [RV09] Robertson, G.P.; Vitousek, P.M.: Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 97-125, 2009.
- [Su11] Sutton, M.A.; Oenema, O.; Erisman, J.W.; Leip, A.; van Grinsven, H.; Winiwarter, W.: Too much of a good thing. *Nature*, 472, 159-161, 2011.