

Precision Farming- ein innovativer Ansatz zur Verminderung des ökonomischen und ökologischen Risikos- eine Simulationsstudie.

MARKUS GANDORFER, FREISING-WEIHENSTEPHAN
MARTIN BACHMAIER, FREISING-WEIHENSTEPHAN
ANDREAS MEYER-AURICH, FREISING-WEIHENSTEPHAN
ALOIS HEIßENHUBER, FREISING-WEIHENSTEPHAN

1 Abstract

Für einen risikoaversen Landwirt ist die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung von Winterweizen in ökonomischer Sicht (falls die Kosten für Precision Farming < 23,90 €/ha) langfristig gegenüber einer einheitlichen Düngung von Vorteil. Diese Ergebnisse lassen sich aus einer Risikoanalyse mittels der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades für Standortbedingungen, wie sie auf dem FAM¹ Versuchsgut in Scheyern vorzufinden sind, ableiten. Aus ökologischer Sicht (N-Salden) kann mit Hilfe der Kriterien der Stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades nicht eindeutig zwischen den beiden Düngestrategien differenziert werden.

2 Einleitung

In Anlehnung an LOWENBERG-DEBOER & SWINTON (1997) ist es sinnvoll, die Rentabilität von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen mehrstufig durchzuführen. Demnach sollte zunächst geprüft werden, inwiefern durch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung ein höherer Deckungsbeitrag erzielt werden kann als durch flächeneinheitliche Bewirtschaftung. In einer zweiten Stufe der Rentabilitätsprüfung muss geprüft werden, ob mit dem Mehrerlös durch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung auch die für diese Technologien notwendigen Investitionen gedeckt werden können. Als dritte ökonomische Teilanalyse sollte eine Risikoanalyse folgen, bei der die Auswirkungen der Technologie auf Ertragsschwankungen untersucht werden. Da die Stickstoffdüngung von Winterweizen aufgrund der Stochastik von Wachstumsfaktoren wie Temperatur und Niederschlag mit vielen Unsicherheiten behaftet ist, die indirekt sowohl ökonomische als auch ökologische Konsequenzen (Risiken) nach sich ziehen, scheint eine Risikoanalyse zur Beurteilung von Düngestrategien angebracht. Risiko-neutrale Landwirte würden sich, wenn sie sich für eine der zu untersuchenden Düngemethoden entscheiden müssten, am Erwartungswert einer z.B. monetären Zielgröße (stickstoffkostenfreie Leistung) orientieren. Handelt es sich um einen risikoaversen Entscheidenden - dies ist bei Landwirten durchaus der Fall - dann sind neben der Höhe des Erwartungswertes der Zielgröße auch deren Schwankungsbreite und somit das Risiko von ausschlaggebender Bedeutung.

HANF (1991) schlägt drei Schritte zur Durchführung von Risikoanalysen vor:

1. Handlungsmöglichkeiten definieren
2. Ableiten des Ergebnisraums für jede der Handlungsalternativen
3. Wahl einer Handlungsalternative aufgrund der zuvor gewonnenen Informationen über den Ergebnisraum der Zielvariablen.

In diesem Beitrag werden zwei Handlungsalternativen, variable und einheitliche Düngung, einer Risikoanalyse anhand der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades (HANF, 1991) unterzogen. Der Ergebnisraum der Zielvariablen (stickstoffkostenfreie Leistung und N-Salden) wird mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen und normierten Produktionsfunktionen nach KRAYL (1993) abgeleitet.

¹ Forschungsverbund Agrarökosysteme München

3 Beschreibung des Modells und der Monte-Carlo-Simulationen

Zur Modellierung wird der Ertrag auf einem Schlag simuliert, der zwei Ertragszonen aufweist. Für jede der beiden Ertragszonen wird ein Ertragsmittelwert vorgegeben, um den die Erträge normalverteilt sind. Außerdem werden für jede Ertragszone unterschiedliche Standardabweichungen der Erträge verwendet. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen werden für 200 Jahre Ertragspaare simuliert, die diesen Modellannahmen genügen. Um noch zusätzlich eine Korrelation der Erträge der beiden Ertragszonen von $\rho = 0.6$ zu erreichen, wird in den Monte-Carlo-Simulationen wie folgt vorgegangen: Zuerst werden zwei unabhängige Vektoren X und Y bestehend aus jeweils 200 unabhängigen standardnormalverteilten Zufallszahlen erzeugt (z.B. mit Hilfe eines Statistik-Programms). Um dann die Niedrigerträge N_i und die Hoherträge H_i mit den gewünschten Erwartungswerten und Standardabweichungen sowie mit der gewünschten Korrelation ρ zu erreichen, braucht für $i = 1, \dots, 200$ nur noch folgende Transformation durchgeführt zu werden:

$$\begin{aligned} N_i &:= \mu_N + \sigma_N \cdot X_i \\ H_i &:= \mu_H + \sigma_H \cdot (\rho \cdot X_i + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot Y_i) \end{aligned}$$

Denn dann ist:

$$\begin{aligned} E(N_i) &= \mu_N + \sigma_N \cdot E(X_i) = \mu_N + \sigma_N \cdot 0 = \mu_N \\ E(H_i) &= \mu_H + \sigma_H \cdot [\rho \cdot 0 + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot 0] = \mu_H \\ \text{Var}(N_i) &= 0 + \sigma_N^2 \cdot \text{Var}(X_i) = \sigma_N^2 \cdot 1 = \sigma_N^2 \\ \text{Var}(H_i) &= 0 + \sigma_H^2 \cdot [\rho^2 \cdot \text{Var}(X_i) + (1 - \rho^2) \cdot \text{Var}(Y_i)] \\ &= \sigma_H^2 \cdot [\rho^2 \cdot 1 + (1 - \rho^2) \cdot 1] = \sigma_H^2 \\ \text{Cov}(N_i, H_i) &= \text{Cov}(\sigma_N \cdot X_i, \sigma_H \cdot [\rho \cdot X_i + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot Y_i]) \\ &= \sigma_N \cdot \sigma_H \cdot [\text{Cov}(X_i, \rho \cdot X_i) + \text{Cov}(X_i, \sqrt{1 - \rho^2} \cdot Y_i)] \\ &= \sigma_N \cdot \sigma_H \cdot [\rho \cdot \text{Cov}(X_i, X_i) + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \text{Cov}(X_i, Y_i)] \\ &= \sigma_N \cdot \sigma_H \cdot [\rho \cdot \text{Var}(X_i) + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot 0] = \sigma_N \cdot \sigma_H \cdot \rho \\ \text{Corr}(N_i, H_i) &= \frac{\text{Cov}(N_i, H_i)}{\sqrt{\text{Var}(N_i) \cdot \text{Var}(H_i)}} = \frac{\sigma_N \cdot \sigma_H \cdot \rho}{\sqrt{\sigma_N^2 \cdot \sigma_H^2}} = \rho \end{aligned}$$

Im Modell wird des Weiteren davon ausgegangen, dass die ermittelten Ertragspaare den Maximalerträgen in den Ertragszonen entsprechen. Die zum Erzielen des Maximalertrags nötige Stickstoffmenge wird nach WENKEL (2001) abgeschätzt. Mit den Maximalerträgen und Stickstoffmengen können mit Hilfe der normierten Produktionsfunktionen von KRAYL (1993) teilflächenspezifische Produktionsfunktionen bestimmt werden. Im Szenario „homogene Bewirtschaftung“ werden die Parameter der beiden Ertragsfunktionen gemittelt- es ergibt sich daraus die Produktionsfunktion für den Gesamtschlag. Mit Hilfe der Produktionsfunktionen und der Faktor- und Produktpreise ist es möglich für die simulierten 200 Jahre jeweils die optimierte stickstoffkostenfreie Leistung bei einheitlicher und variabler Düngung zu berechnen. Die optimale spezielle Intensität (N_{OPT}) ist dann erreicht, wenn die Grenzkosten der Stickstoffdüngung gleich dem Grenzerlös entsprechen. Bei variabler Düngung werden zusätzlich Kosten für die Informationsgewinnung und die teilflächenspezifische Applikation des Stickstoffs mit berücksichtigt. Die berechneten 200 stickstoffkostenfreien Leistungen bei einheitlicher und variabler Düngung dienen zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielvariable der beiden Handlungsalternativen, die einer Risikoanalyse mittels der Methode der stochastischen Dominanz unterzogen werden sollen. Analog zu den Stickstoffkostenfreien Leistungen werden vereinfachte Stickstoffsalden (Düngung - Entzug) für beide Düngestrategien berechnet und ebenfalls einer Risikoanalyse unterzogen.

4 Ergebnisse

Mit Hilfe von Versuchsdaten des Forschungsprojekts FAM (Forschungsverbund Agrarökosysteme München) konnten für Hoch- und Niedrigertragsstandorte des Versuchsgutes Scheyern Ertragsmittelwerte und Standardabweichungen für Winterweizen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 1). Die niedrigere Standardabweichung des Hohertragstandortes kann durch höhere Puffereigenschaften erklärt werden, da Hohertragsstandorte z.B. widrige Klimaeinflüsse wie Wassermangel besser ausgleichen können.

Mit Hilfe der Mittelwerte und Standardabweichungen der Ertragszonen werden 200 Ertragspaare durch Monte-Carlo-Simulationen ermittelt. Es wird zugrundegelegt, dass die Erträge normalverteilt sind und die Zonen mit einem Korrelationskoeffizienten von $\rho = 0,6$ miteinander korrelieren. Die Korrelation der Ertragszonen hat zur Folge, dass mit relativ großer Wahrscheinlichkeit bei überdurchschnittlich hohen Erträgen im Hohertrag auch überdurchschnitt-

| Standort | Ertragsmittelwert (dt/ha) | | Standardabweichung (dt/ha) | | Korrelationskoeffizient | |
|---------------|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | vorgegeben | simuliert | vorgegeben | simuliert | vorgegeben | simuliert |
| Hohertrag | 74 | 74,06 | 8 | 8,48 | 0,6 | 0,609 |
| Niedrigertrag | 63 | 63,39 | 11 | 11,23 | | |

Tabelle 1: Vorgegebene und simulierte Ertragsmittelwerte (dt/ha) und Standardabweichung (dt/ha) für Winterweizen

lich hohe Erträge im Niedrigertrag eintreten. Mit geringeren Eintrittswahrscheinlichkeiten sind aber auch gegensätzliche Erträge zu erwarten, was aus pflanzenbaulicher Sicht durchaus erwünscht ist. Der Stichprobenumfang von $n=200$ ist groß genug, um durch die Stichprobe ein hinreichend genaues Abbild der Grundgesamtheiten mit deren Korrelation sowie den vorgegebenen Mittelwerten und Standardabweichungen zu erhalten (vgl. Tabelle 1, linke Spalte).

Das ökonomische Risiko

In der Abbildung 1 sind die kumulierten Verteilungsfunktionen der stickstoffkostenfreien Leistungen² bei einheitlicher und variabler Düngung dargestellt. Würden bei variabler Bewirtschaftung keine zusätzlichen Kosten anfallen, dann wäre Precision Farming stochastisch dominant ersten Grades, da die Verteilungsfunktion der Variante „variabel“ (PF1) immer rechts von der Verteilungsfunktion der Variante „einheitlich“ liegt. Bei der Verteilungsfunktion PF2 werden dagegen 23,90 €/ha³ zusätzlich für die teilflächenspezifische Düngung mit berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass sich die beiden Verteilungsfunktionen sehr stark annähern und zum Teil überschneiden. Somit ist keine stochastische Dominanz ersten Grades einer Variante festzustellen. Aus diesem Grund wird jetzt die stochastische Dominanz zweiten Grades mit der Software GSD 2.1 (GOH et al. 1989) überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die Verteilungsfunktion der Variante „Precision Farming“ die Verteilungsfunktion der einheitlichen Variante dominiert. Falls der Entscheidungsträger risikoavers ist, folgt daraus die Präferenz des Precision Farming. Werden für die Teilflächenbewirtschaftung zusätzlich 30 €/ha kalkuliert, so ist festzustellen, dass dann die Verteilungsfunktion zur „einheitlichen“ Variante stochastisch dominant zweiten Grades ist, weswegen diese präferiert werden muss, sofern man wieder Risikoaversion voraussetzt.

²Bei einem Winterweizenpreis von 11 €/dt und einem Stickstoffpreis von 0,7 €/dt.

³Es werden in diesem Szenario 23,90 €/ha gewählt, da dies die Grenze darstellt, ab der keine stochastische Dominanz zweiten Grades von Precision Farming nachgewiesen werden kann.

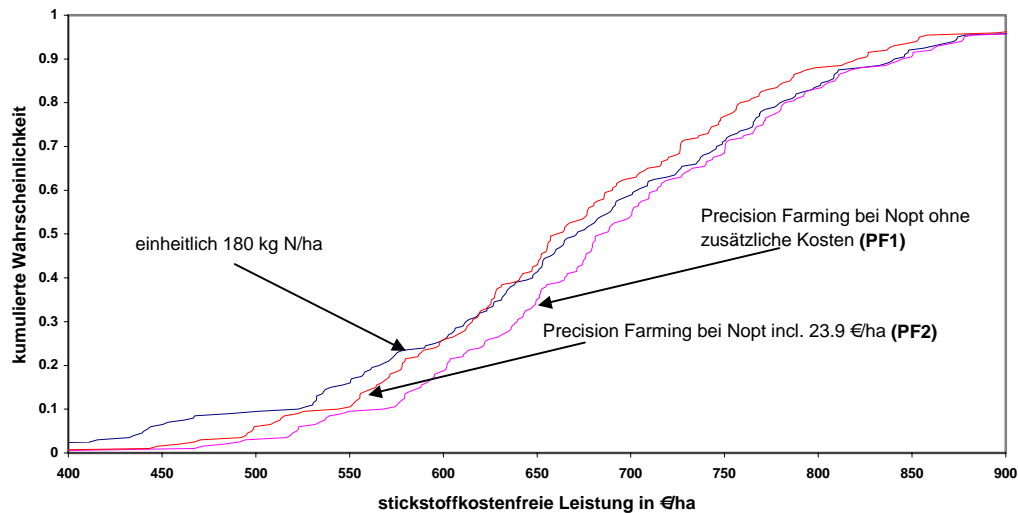


Abbildung 1: Kumulierte Verteilungsfunktion der stickstoffkostenfreien Leistung bei einheitlicher und variabler Düngung.

Das ökologische Risiko

Mit Hilfe des vorgestellten Modells lassen sich außerdem die N-Salden bei einheitlicher und variabler Düngung vergleichen. Um die Kriterien der stochastischen Dominanz anwenden zu können, wurden die N-Salden mit -1 multipliziert, da sinnvollerweise davon ausgegangen werden kann, dass mit höheren N-Salden der Nutzen sinkt. In Abbildung 2 sind die Verteilungsfunktionen der N-Salden bei einheitlicher (180 kg N/ha) und variabler (Nopt) Düngung

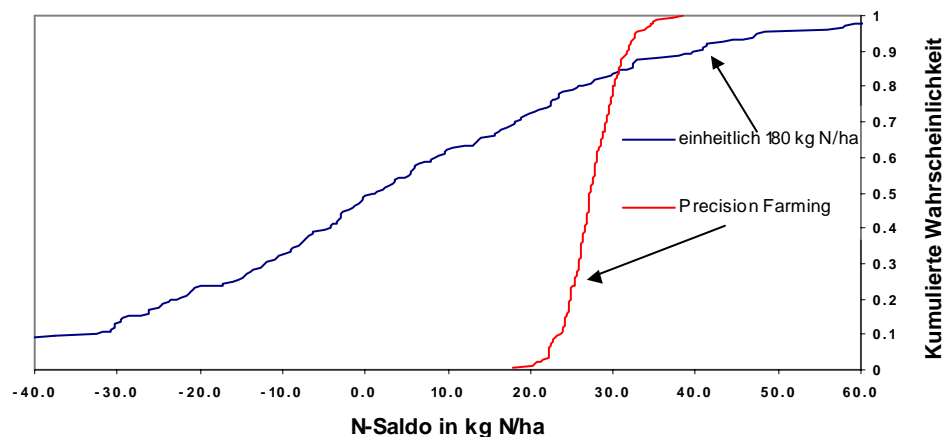


Abbildung 2: Kumulierte Verteilungsfunktion der mit -1 multiplizierten N-Salden bei einheitlicher und variabler Düngung.

dargestellt. Eine Prüfung der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades führt zu keiner Differenzierung. Bei einem Vergleich der Erwartungswerte der N-Salden und deren Standardabweichungen wird deutlich, dass bei einheitlicher Düngung mit $1,7$ kg N/ha ein wesentlich geringerer durchschnittlicher N-Saldo erreicht wird als bei variabler Düngung mit $27,5$ kg N/ha. Orientierte man sich nur am Erwartungswert, so wäre der einheitlichen Düngung der Vorzug zu geben. Die Standardabweichungen bei variabler Düngung beträgt $3,3$ kg N/ha, bei einheitlicher Düngung $30,4$ kg N/ha. Der Vorteil des Precision Farming liegt in der geringen Varianz der N-Salden. Der geringere Mittelwert bei einheitlicher Düngung resultiert

aus einer Unterversorgung in manchen Jahren, die dann zu negativen N-Salden führt. Wäre bei der einheitlichen Strategie mit z.B. 200 kg N/ha gedüngt worden, so wäre im Vergleich dazu Precision Farming dominant. Wie die stickstoffkostenfreien Leistungen sind auch die N-Salden bei der Precision Farming Strategie für den Fall der optimalen speziellen Intensität berechnet worden.

5 Diskussion

Die Ausführungen machen deutlich, dass eine ökonomische Risikoanalyse von verschiedenen Düngestrategien anhand der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades zu schlüssigen Ergebnissen führt. Verhalten sich Standorte langfristig so, wie die betrachteten Flächen in Scheyern in Bezug auf den mittleren Ertrag und dessen Standardabweichung, dann ist der Teilflächenbewirtschaftung einer einheitlichen Bewirtschaftung unter Annahme von Risikoaversität aus ökonomischen Gesichtspunkten der Vorzug zu geben, falls die zusätzlichen Kosten einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung 23,90 €/ha nicht übersteigen. Die Ergebnisse sind unter der Vorraussetzung zu interpretieren, dass das teilflächenspezifische Szenario, genau im ex post bestimmten Optimum gedüngt wird. In der Praxis stellt sich die richtige Bemessung der N-Düngergaben jedoch ex ante. Da in der Praxis nicht davon auszugehen ist, dass die optimale spezielle Intensität mit Hilfe von Precision-Farming-Technologien genau erreicht werden kann, werden sich in der Realität geringere Potenziale einstellen. Aufgrund der Anwendung der Kriterien der stochastischen Dominanz ersten und zweiten Grades auf die N-Salden der beiden betrachteten Düngestrategien kann keine Selektion stattfinden. Es bleibt festzustellen, dass bei einheitlicher Düngung der N-Saldo im Mittel der Jahre geringer ist, aber eine sehr große Varianz aufweist. Bei variabler Düngung ist der mittlere N-Saldo zwar höher, aber unterliegt nur sehr geringen Schwankungen. Aus ökologischer Sicht ist jetzt zu diskutieren, unter welchen Vorraussetzungen einer der beiden Strategien der Vorzug zu geben ist. Es wird in dieser Arbeit auf ein Simulationsmodell zurückgegriffen, um die langfristigen Auswirkungen von Precision Farming abzuschätzen, da für diese Zwecke noch keine geeigneten langjährige Versuchsergebnisse vorliegen. Die aus dem Modell abgeleiteten Ergebnisse stellen somit einen Anhaltspunkt dar, der zukünftig empirisch überprüft werden kann.

6 Literatur

- LOWENBERG-DEBOER, J. AND S.M. SWINTON (1997): Economics of Site-Specific Management in Agronomic Crops. In P.C. ROBERT et al. (ed): Site Specific management for agricultural systems, Madison, WI.
- HANF, C. (1991): Entscheidungslehre: Einführung in die Informationsbeschaffung, Planung und Entscheidung unter Unsicherheit. München-Wien, Oldenburg.
- KILIAN B. UND S. DABBERT (2002): Ökonomie (TP IV-1). In: Precision Agriculture- Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15. März in Bonn. KTBL- Sonderveröffentlichung 038. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- KRAYL, E. (1993): Strategien zur Vermeidung der Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft. Landwirtschaft und Umwelt, Schriften der Umweltökonomik, Band 8 Kiel.
- S.GOH, S. CHAO-CHYUAN, M.J.COCHRAN AND ROB RASKIN (1989): A Generalized Sochastic Dominance Program For The IBM PC, Southern Journal of Agricultural Economics.
- WENKEL, K.O. (2001): Düngung (TP III-4). Zwischenbericht 2001 des Verbundprojekts *pre agro*, Müncheberg.