

Abschätzungen der Vorteilswirkungen teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung

Assessment of Advantages of Locally Differentiated Nitrogen Fertilizing

Rolf Winter

Institut für Agrartechnik Bornim e. V., Potsdam

Kurzfassung: Über Modellrechnungen werden ökonomische und ökologische Vorteile abgeschätzt, die auf Ackerschlägen mit uneinheitlicher Ertragsfähigkeit durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung gegenüber schlageinheitlicher Düngung erreicht werden können. Ökonomische Vorteile entstehen durch Düngereinsparung oder Mehrerträge, ökologische durch Minderung von Schadgasemission infolge der Denitrifizierung und durch Nitratversickerung

Deskriptoren: Feldbewirtschaftung, Düngung, Technikbewertung

Abstract: By means of modelling and calculations the economic and ecological advantages on field plots with unequal fertility when nitrogen fertilizing on them is locally differentiated instead of equal are assessed. Economic advantages result from lower expenses for nitrogen or from higher yield. Ecological advantages result from a decline in nitrate seepage and from reduced emissions of nitrogen-oxides

Keywords: field management, fertilizing, technological assessment

1 Einleitung

Das Konzept der teilflächenspezifischen Feldbewirtschaftung steht an der Schwelle zu praktikablen Verfahrenslösungen. Gegenüber schlageinheitlicher Bewirtschaftung werden über die Berücksichtigung der lokalen Variabilität von Standortbedingungen innerhalb von Ackerschlägen insbesondere aus der lokal differenzierten Bemessung von Düngergaben und Pflanzenschutzmittel-Aufwandsmengen ökonomische und ökologische Vorteile erwartet [1, 2]. Für den Sonderfall, daß in einem Ackerschlag nur zwei verschiedene Standortbedingungen auftreten, haben Jahns und Kögl [3] erste quantitative Abschätzungen *ökonomischer* Effekte vorgenommen. Aber insbesondere über die von teilflächenspezifischer Feldbewirtschaftung erwartbaren *ökologischen* Vorteile nach Art und Größe liegen bislang kaum Erkenntnisse vor.

Deshalb wurde es unternommen, die *Art* der Vorteile zu definieren, die bei teilflächenspezifischer Ausführung von Stickstoffdüngung auftreten, und ihr *Ausmaß* zu kalkulieren.

2 Modellierung

2.1 Wirkungsformen der Stickstoffdüngung

Der Düngestickstoff wird einbezogen in die größtenteils durch Bodenlebewesen bewirkten Stoffumsetzungen im

Boden, die maßgeblich mit dem Auf- und Abbau organischer Bodensubstanz verbunden sind. Die Gesetzmäßigkeiten dieser Prozesse sind weitgehend erkannt und sie wurden in Deutschland durch Kersebaum [4], Franco [5] und Engel [6] in validierte Modelle umgesetzt. Die C- und N-Dynamik des Bodens wird durch Temperatur, Feuchte und Wasserbewegung maßgeblich mitbestimmt. Dem wird in den Modellen durch Fortrechnung in Tagesschritten mit den jeweils aktuellen Zustandsdaten Rechnung getragen. Mit der vorliegenden Arbeit wurde angestrebt, die sich nach Ablauf einer Veregationsperiode eingestellten Veränderungen im N-Status des Bodens und bezüglich seiner organischen Substanz pauschal in einem Schritt abzuschätzen - ohne Berücksichtigung der Zufälligkeiten des Wetterablaufs und unter Verzicht auf die Vielzahl von Bodenbeschaffenheitskenngrößen, die zu den vorgenannten Modellen erforderlich sind. Dafür geeignete "grobe" Modelle wurden in der Literatur nicht gefunden. Deshalb wurden eigene Ansätze versucht. In sie einbezogen wurden die in Bild 1 voll umrandeten Wirkungsrichtungen der Stickstoffdüngung.

Für die in Bild 1 gestrichelt umrandeten Sachverhalte kommt in der Fachliteratur zum Ausdruck, daß sie von der Stickstoffdüngung beeinflusst werden. Die vorgefundenen Detailinformationen reichten aber für eine quantitative

Modellierung nicht aus, so daß auf ihre Berücksichtigung verzichtet werden mußte. Bei den übrigen, in Bild 1 mit punktierten Linien umrandeten Sachverhalten, ist eine Beeinflussung durch die Stickstoffdüngung unsicher; sie blieben deshalb unberücksichtigt.

In dem für die Kalkulationen entwickelten Wirkungsmodell werden hinsichtlich der Stickstoffwirkung auf die Pflanzenbestände *Ertragsfunktionen* und in Bezug auf den Boden die *Jahressalden seiner Stickstoffbilanz* mit den verschiedenen Pools und den Umsetzungen zwischen ihnen verwendet. Aus dem letzteren und unter Berücksichtigung des Stickstoffbedarfs des Pflanzenbestandes wurde eine Stickstoffmenge als "Überdüngung" definiert, die weder für die pflanzliche Stoffbildung, noch für die Vermehrung der organischen Bodensubstanz verbraucht wird, und von der deshalb unterstellt werden muß, daß sie zunächst in der Bodenlösung vorliegt. Sie beinhaltet neben einem Anteil, der in der Bodenlösung verbleibt, das *Potential* sowohl für Nitratversickerung als auch für Denitrifikation. Die letztere führt zu Stickstoffoxid-Emissionen in die Atmosphäre.

Modelle auf der Grundlage von Jahressalden müssen zwangsläufig recht grob sein. Deshalb wurden zur Bestimmung der "Überdüngung" zwei verschiedene Modelle gebildet, damit aus den Abweichungen zwischen ihren Ergebnissen eine Vorstellung über die Größenordnung unvermeidlicher Modellfehler gewonnen werden kann (Bild 2). Die sich in den Modellgleichungen allgemein ausdrückenden Beziehungen dürfen wohl als sachlogisch

gelten. Die in Ihnen enthaltenen festen Zahlenwerte wurden iterativ verändert und letztlich so festgesetzt, daß mit ihnen das zur "Überdüngung 2" führende Modell bei Anwendung auf definierte Bedingungen zu "glaubhaften" Ergebnissen führt. Aus Platzgründen kann das Vorgehen hier nicht eingehender erläutert werden. Von der modellhaft als "Überdüngung" ausgewiesenen Stickstoffmenge wird unterstellt, daß sie zu festen Anteilen in der Bodenlösung verbleibt, als Nitrat versickert und zu verschiedenen gasförmigen Stickstoffverbindungen denitrifiziert wird (Bild 3).

Für die aus der "Überdüngung" entstehenden umweltunvorteillichen Stickstoffströme wurden aus Umweltschadenskosten und aus Kosten für Maßnahmen zur Minderung von Umweltschäden fiktive Preise abgeleitet und damit die Möglichkeit geschaffen, wirtschaftliche und ökologische Folgen der Stickstoffdüngung auf einen Nenner zu bringen. In Bild 3 sind diese Preise angegeben.

Mit der pflanzlichen Stoffbildung ist als eine positive Umweltleistung der Landwirtschaft die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre verbunden. Dieses Kohlendioxid wird zwar bei der Zersetzung der pflanzlichen Substanz relativ kurzfristig wieder frei, aber zumindest für den Marktanteil der pflanzlichen Produkte ist es gerechtfertigt, die in ihm realisierte CO₂-Bindung dem Landwirt als Umweltbonus anzurechnen und mit der CO₂-Freisetzung daraus den Verbraucher der Produkte zu belasten. Deshalb wurde bei der Modellierung auch die CO₂-Bindung berücksichtigt und monetär bewertet.

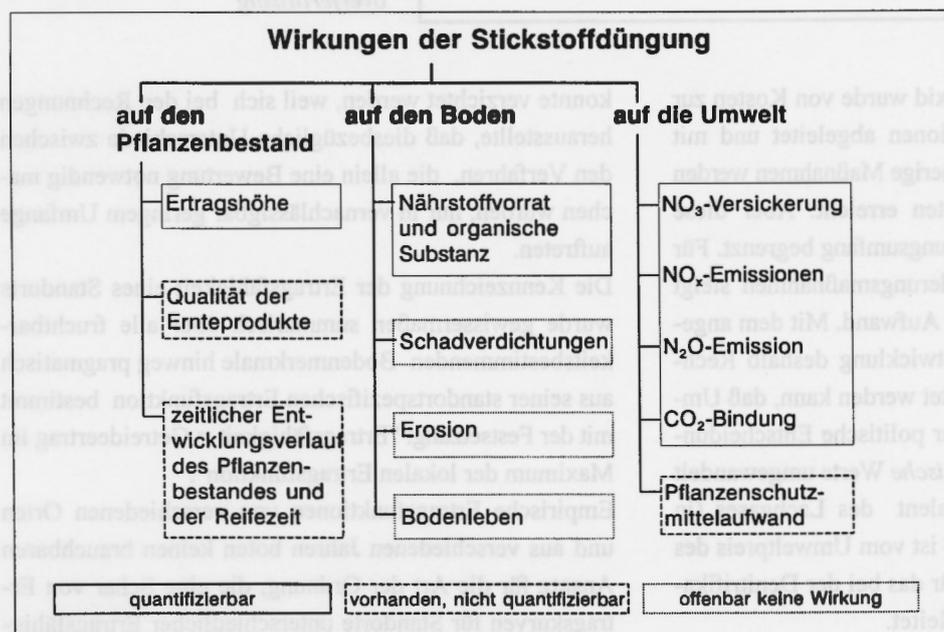


Bild 1: Stickstoff-Wirkungsrichtungen

Fig. 1: Kinds of nitrogen effects

$\ddot{U}D1 = 0$	für $N \leq ER \cdot Nb_{max}$
$\ddot{U}D1 = N - ER \cdot Nb_{max}$	für $N > ER \cdot Nb_{max}$
$N_{min} = 6 + ERF \cdot 0,375$	
$NV = N_{min} + NE + N$	
$Ninn = 2,775 + (N - ER \cdot Nb_{max}) / 250$	
$Ninn \cdot 0,84 < Ninr < Ninn \cdot 1,16$	
$NP = Ninr \cdot ER$	
$MN = NP - NV$	für $NP > NV$
$MN = 0$	für $NP < NV$
$ZNOS = 30 + (ERF - 20) / 3$	
$ZNO = 0$	für $NP > NV$
$ZNO = (NV - NP) / 4$	für $NP < NV$
$ZNO = ZNOS$	und $ZNO \leq ZNOS$
	und $ZNO > ZNOS$
$NIL = NV - NP - ZNO$	
$NILS = 6 + ERF \cdot 0,375$	
$\ddot{U}D2 = 0$	für $NIL \leq NILS$
$\ddot{U}D2 = NIL - NILS$	für $NIL > NILS$

Bild 2: Modellgleichungen zur Überdüngung
Fig 2: Equations for overfertilizing models

- $\ddot{U}D1$: Überdüngung nach Modell 1
- $\ddot{U}D2$: Überdüngung nach Modell 2
- Nb_{max} : Ertragsbezogener Düngestickstoff im Maximum der Ertragskurve
- N_{min} : N-Vorrat in der Bodenlösung
- NV : verfügbarer Stickstoff
- NE : Stickstoffeintrag aus der Luft
- N : Stickstoff aus der Düngung
- $Ninn$: nominale Stickstoffaufnahme der Pflanzen je Ertragseinheit
- $Ninr$: angebotsabhängige N-Aufnahme
- NP : Stickstoffaufnahme der Pflanzen
- MN : mineralisierte Stickstoffmenge
- $ZNOS$: Größtwer für die Zunahme der N-Menge in der organischen Bodensubstanz
- ZNO : Zunahme der N-Menge in der org. Bodens.
- NIL : Stickstoffmenge in der Bodenlösung
- $NILS$: Höchstwert für NIL

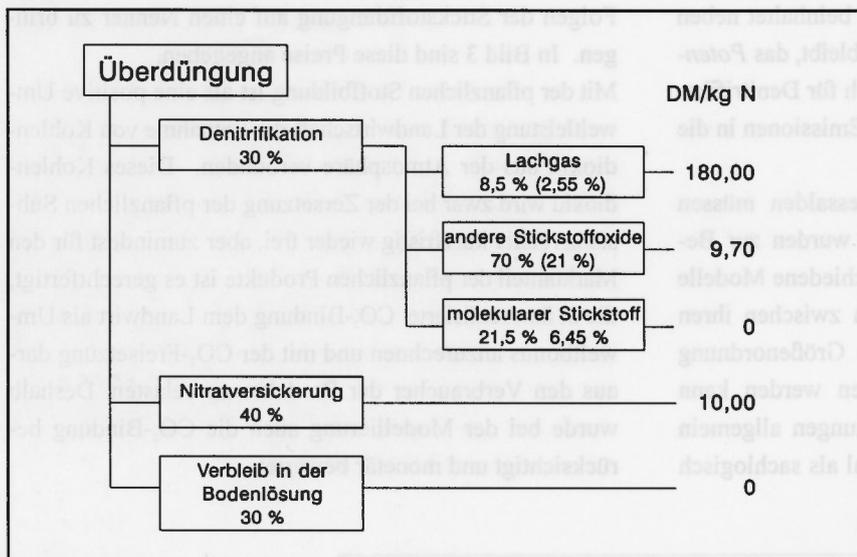


Bild 3: Verbleib und Kosten der Überdüngung
Fig. 3: Whereabouts and costs of overfertilizing

Der fiktive Preis für Kohlendioxid wurde von Kosten zur Verminderung von CO₂-Emissionen abgeleitet und mit 0,40 DM/kg angesetzt. (Für bisherige Maßnahmen werden niedrigere CO₂-Minderungskosten erreicht. Aber diese Maßnahmen sind in ihrem Wirkungsumfang begrenzt. Für weiterreichende Emissionsminderungsmaßnahmen steigt auch der je kg CO₂ zu treibende Aufwand. Mit dem angesetzten CO₂-Preis ist dieser Entwicklung deshalb Rechnung getragen, weil nicht erwartet werden kann, daß Umweltkosten in kürzerer Frist über politische Entscheidungen von *ökologischen* in *ökonomische* Werte umgewandelt werden.) Über das CO₂-Äquivalent des Lachgases (in Bezug auf den Treibhauseffekt) ist vom Umweltpreis des Kohlendioxids auch der Preis für das bei der Denitrifikation entstehende Lachgas abgeleitet. Auf eine Preisfestsetzung für den in organische Bodensubstanz eingelagerten (oder daraus freigesetzten) Stickstoff

konnte verzichtet werden, weil sich bei den Rechnungen herausstellte, daß diesbezügliche Unterschiede zwischen den Verfahren, die allein eine Bewertung notwendig machen würden, nur in vernachlässigbar geringem Umfang auftreten.

Die Kennzeichnung der Ertragsfähigkeit eines Standorts wurde gewissermaßen summarisch über alle fruchtbarkeitsbestimmenden Bodenmerkmale hinweg pragmatisch aus seiner standortspezifischen Ertragsfunktion bestimmt mit der Festsetzung: "Ertragsfähigkeit = Getreideertrag im Maximum der lokalen Ertragsfunktion".

Empirische Ertragsfunktionen von verschiedenen Orten und aus verschiedenen Jahren boten keinen brauchbaren Ansatz für die Art der Ordnung, die eine Schar von Ertragskurven für Standorte unterschiedlicher Ertragsfähigkeit aufweisen muß. Deshalb wurde die Art dieser Ordnung festgesetzt (Bild 4):

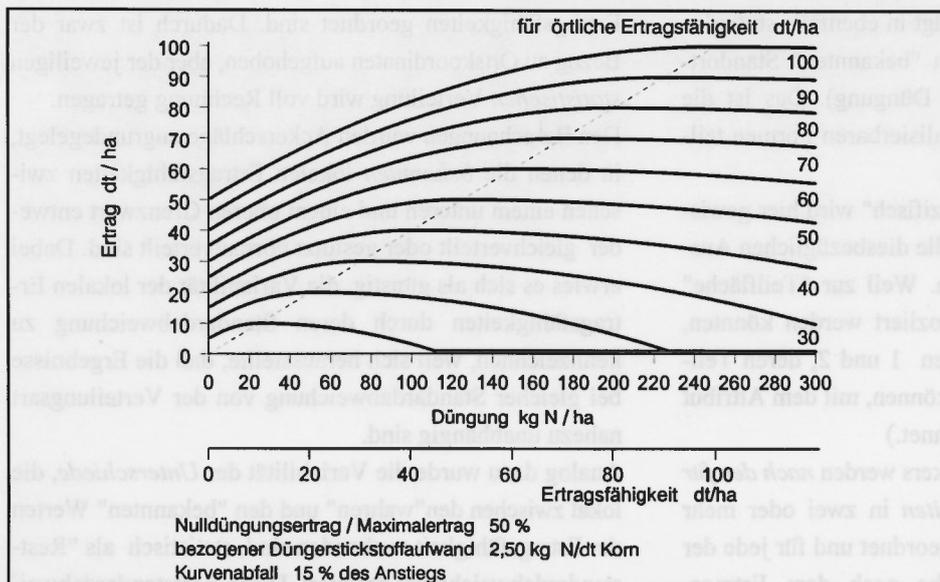


Bild 4: Ertragskurvenschar
 Fig. 4: Swarm of yield-curves

- alle Kurven haben in ihrem Maximum den gleichen ertragsbezogenen Düngestickstoff-Aufwand (für die Rechnungen wurde er im Bereich von 2,0 bis 3,0 kg N/dt Korn variiert),
- bei allen Kurven steht der Ertrag bei Nulldüngung im gleichen Verhältnis zum Maximalertrag (in den Rechnungen wurden dafür Werte von 40 bis 80 % angesetzt) und
- bei allen Ertragskurven einer Schar erfolgt der Ertragsabfall jenseits des Ertragsmaximums mit gleicher Charakteristik (Rechnungen erfolgten mit Ertragskurvenscharen, bei denen der Kurvenabfall gegenüber ihrem Anstieg 10 bis 25 % geringer ist).

Es wird erwartet, daß der Variationsbereich der tatsächlichen Verhältnisse mit den vorstehend angesetzten Wertebereichen abgedeckt wird.

Die Modellansätze sind nach ihrer allgemeinen Anlage nicht auf eine bestimmte landwirtschaftliche Kulturart zugeschnitten. Insofern ist Allgemeingültigkeit beabsichtigt. Den Berechnungen jedoch sind Zahlenwerte zugrundegelegt, die sich an Getreide orientieren. Insofern sind die Ergebnisse auf Getreide bezogen.

Für die Verfahrensvarianten (siehe Abschnitt 2.2) mit stufenloser Düngerdosierung erfolgten die Berechnungen für Stickstoffgaben, die in 100 Schritten von 60 bis 140 % derjenigen Düngermenge erhöht wurden, die (bei den zugrundegelegten Ertragsfunktionen) lokal zum Ertragsmaximum führen. In gleicher Weise wurde für schlageinheitliche Behandlung die Dosierung von 60 bis 140 % derjenigen Düngermenge variiert, die im Durchschnitt des Schlages zum Maximalertrag führt.

Für die Verfahrensvariante mit in Stufen angepaßter Dosierung erfolgten die Berechnungen für Stickstoffgaben,

die innerhalb jeder Stufe in nur fünf Schritten von 70 bis 110 % derjenigen Menge ansteigen, die im Mittel einer jeden Ertragsfähigkeitsklasse zum Maximalertrag führt.

2.2 Verfahrensvarianten

Dem Folgenden liegt die Vorstellung zugrunde, daß Ackerschläge mit uneinheitlicher Ertragsfähigkeit zwar *gedanklich* in beliebig kleine in sich einheitliche "Elementarflächen" aufgelöst werden können, daß aber *praktisch* Erfahrungsinformationen über lokale Standortbeschaffenheiten (z. B. aus Bodenproben oder aus Integralen über Erntegutströme) nur für ein Punkte-Netz mit endlichen Rasterabständen erreichbar sind. Jedoch ist es möglich, die entsprechenden Standort-Informationen für jede beliebige Stelle eines Ackers durch Interpolation zwischen den Ist-Werten, die für Rasterpunkte vorliegen, zu erstellen. Ausgehend davon wird unterschieden zwischen "wahren" Standortdaten, die für eine bestimmte Stelle des Ackers tatsächlich zutreffend sind, und "bekannten" Standortdaten, die der gleichen Ackerstelle auf Grund der begrenzten Möglichkeiten zur Erfassung von Ist-Informationen über Interpolationsrechnungen zugeschrieben werden können. Unter Berücksichtigung des Vorgesagten werden folgende Verfahrensvarianten für die Stickstoffdüngung vorgesehen und in ihren Konsequenzen miteinander verglichen:

1. Die Bemessung der Düngergabe erfolgt in stufenlos angepaßter Zuordnung zu den "wahren" Standortmerkmalen (*ideal* ortsdifferenzierte Düngung). Das kennzeichnet den praktisch nicht erreichbaren Idealfall des Vorhandenseins von lokalen Zustandsdaten in beliebig enger räumlicher Dichte.

2. Die Düngungsbemessung erfolgt in ebenfalls stufenlos angepaßter Zuordnung zu den "bekannten" Standortdaten (*real* ortsdifferenzierte Düngung). Das ist die bestmögliche der praktisch realisierbaren Formen teilflächenspezifischer Düngung.
(Der Terminus "teilflächenspezifisch" wird hier gewissermaßen als Oberbegriff für alle diesbezüglichen Ausführungsvarianten verstanden. Weil zur "Teilfläche" bestimmte Flächengrößen assoziiert werden könnten, werden die Verfahrensvarianten 1 und 2, deren Teilflächen differentiell klein sein können, mit dem Attribut "ortsdifferenziert" gekennzeichnet.)
3. Die Elementarflächen eines Ackers werden *nach den für sie bekannten Ertragsfähigkeiten* in zwei oder mehr Ertragsfähigkeits-Klassen eingeordnet und für jede der Klassen wird die Düngergabe nach dem Ertragsfähigkeits-Mittelwert der Klasse bestimmt und auf allen Stellen des Ackers, die nach ihrer Ertragsfähigkeit dieser Klasse zugeordnet sind, in einheitlicher Weise verabreicht. Durch dieses Vorgehen erfolgt die Düngergabe mit *in diskreten Stufen* angepaßter Zuordnung zu den bekannten Standortdaten (mit nur einer Stufe geht diese Verfahrensvariante in die schlageinheitliche Düngung und mit unbegrenzt vielen Stufen in die (stufenlos) real ortsdifferenzierte Düngung über.
4. Die Bemessung der Düngergabe stützt sich auf den Mittelwert der für den Schlag bekannten Standortbedingungen und sie wird auf dem ganzen Schlag in einheitlicher Höhe verabreicht (schlageinheitliche Düngung). Diese Verfahrensvariante dient als Bezugsbasis.

Bei allen Verfahrensvarianten ist zugrundegelegt, daß sich die *Wirkung* der Düngung nicht nach dem einstellt, was über den lokalen Standort *bekannt ist*, sondern nach den *wahren* Bedingungen, die dort vorliegen.

2.3 Lokale Variabilität

Uneinheitliche Ertragsfähigkeit innerhalb eines Ackerschlagel drückt sich einesteils aus in der Spannweite und der Häufigkeitsverteilung der auf dem Schlag vorkommenden lokalen Ertragsfähigkeiten. Darüber hinaus ist für jeden konkreten Fall das *Flächenmuster* bedeutsam, in dem die lokalen Ertragsfähigkeiten über der Fläche des Schlagel verteilt sind. Es muß also prinzipiell zwischen *statistischer* und *lokaler* Verteilung unterschieden werden. Für das in dieser Arbeit verfolgte Ziel ist die lokale Verteilung bedeutungslos, sie wird deshalb in keiner Weise berücksichtigt; im Gegenteil wird - um die Berechnungen zu vereinfachen - unterstellt, daß die "Elementarflächen" jedes Schlagel nach der Größe der für sie bekannten

Ertragsfähigkeiten geordnet sind. Dadurch ist zwar der Bezug zu Ortskoordinaten aufgehoben, aber der jeweiligen *statistischen* Verteilung wird voll Rechnung getragen.

Den Berechnungen wurden Ackerschläge zugrundegelegt, in denen die *bekannt* lokalen Ertragsfähigkeiten zwischen einem unteren und einem oberen Grenzwert entweder gleichverteilt oder gestutzt normalverteilt sind. Dabei erwies es sich als günstig, die Variabilität der lokalen Ertragsfähigkeiten durch deren Standardabweichung zu kennzeichnen, weil sich herausstellte, daß die Ergebnisse bei gleicher Standardabweichung von der Verteilungsnart nahezu unabhängig sind.

Analog dazu wurde die Variabilität der *Unterschiede*, die lokal zwischen den "wahren" und den "bekannten" Werten der Ertragsfähigkeit vorhanden sind, statistisch als "Reststandardabweichung" definiert. Diese Reststandardabweichung wird dem Betrag nach um so kleiner, je engmaschiger über den Ackerschlag Ist-Informationen vorliegen, und sie wird um so größer, je kleinräumiger die Variabilität der Standortbedingungen ausgeprägt ist. Aus Literaturinformationen werden Reststandardabweichungen für die hier definierte Ertragsfähigkeit im Bereich von 2 bis 12 dt/ha erwartet. Bei Rechnungen wurden die Werte für sie von 0 bis 8 dt/ha berücksichtigt.

3 Ergebnisse

Ein Ackerschlag mit ganzflächig einheitlichen Standortbedingungen hat an allen seinen Stellen die gleiche Ertragsfunktion. Für einen inhomogenen Schlag bildet sich über alle seine Standortbedingungen hinweg eine resultierende Ertragsfunktion *für den Schlagdurchschnitt* aus, deren konkrete Ausprägung vom Düngungsverfahren beeinflußt wird (Bild 5). Generell liegt das schlagdurchschnittliche Ertragsmaximum bei schlageinheitlicher Düngung auf einem niedrigeren Niveau aber bei höheren Düngergaben, als dasjenige bei real ortsdifferenzierter Düngung. Eine entsprechende Verschiebung (mit meist geringeren Differenzen) stellt sich zwischen real und ideal ortsdifferenzierter Düngung ein. So werden in dem Beispiel von Bild 5 in den jeweiligen Ertragsmaxima bei real ortsdifferenzierter Düngung mit 12 kg N/ha weniger Dünger 50 kg Korn/ha mehr geerntet, als bei schlageinheitlicher Düngerverabreichung. Und auf einen weiteren Vorteil von 9 kg N/ha Düngereinsparung mit 8 kg/ha Mehrertrag muß aufgrund der nicht unbegrenzt fein aufgelöst vorliegenden Information über die wahren lokalen Standortbedingungen verzichtet werden.

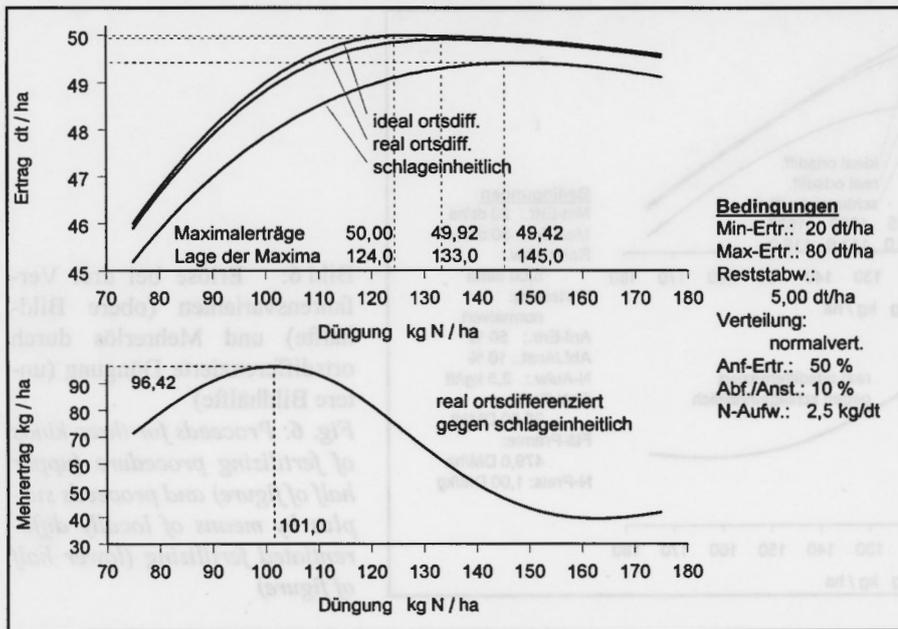


Bild 5: Resultierende Ertragskurven für drei Verfahrensvarianten (obere Bildhälfte) und Mehrertrag durch ortsdifferenzierte Düngung (untere Bildhälfte)

Fig. 5: Resulting yield-curves for three kinds of fertilizing procedure (upper half of figure) and yield surplus by means of locally differentiated fertilizing (lower half of figure)

Die größte Ertragsdifferenz zwischen real ortsdifferenzierter und schlageinheitlicher Düngung stellt sich aber nicht in den Maxima der schlagdurchschnittlichen Ertragskurven, sondern bei noch niedrigerem Düngestickstoffeinsatz ein (untere Hälfte von Bild 5).

Die Zusammenhänge zwischen Düngung und CO_2 -Bindung sowie zwischen Düngung und (den um die Kosten des Stickstoffdüngers bereinigten) Erlösen haben ganz ähnliche Charakteristik wie der mit Bild 5 vorgestellte Zusammenhang zwischen Düngung und Ertrag, jedoch verschieben sich die Kurvenmaxima noch weiter zu niedrigeren Düngergaben, und jenseits des Maximums ist der Kurvenabfall stärker ausgeprägt (Bild 6).

Die Modellrechnungen weisen für alle Verfahrensvarianten eine Stickstoffeinbindung in die organische Bodensubstanz aus, die im betrachteten Düngergabebereich fast linear mit der Düngergabe ansteigt. Sie ist im Schlagdurchschnitt für alle Verfahrensvarianten nahezu gleich. Deshalb konnte sie bei der Zusammenfassung der Verfahrensunterschiede unberücksichtigt bleiben und es konnte auf ihre monetäre Bewertung verzichtet werden (Bild 7). Die oben definierte "Überdüngung" setzt bei schlageinheitlicher Düngerverteilung auf den ertragsschwachen Elementarflächen schon bei niedrigem Düngenniveau ein. Mit größer werdenden Düngergaben vergrößert sich der Anteil überdüngter Elementarflächen und auch der Grad der Überdüngung auf ihnen nimmt zu. Andererseits gibt es auch bei höherem Düngenniveau weiterhin Elementarflächen mit hohem Ertragsniveau, auf denen stärkere Düngung genutzt wird. Deshalb steigt die Überdüngungskurve bei schlageinheitlicher Düngung im oberen Bereich flacher an, als sie es bei ortsdifferenzierter Düngung tut (Bild 8).

Der Unterschied drückt sich am ausgeprägtesten für das Modell 1 und bei ideal ortsdifferenzierter Düngung aus: Bis zur Düngemenge für das Ertragsmaximum ist dabei die Überdüngung null und jedes darüber hinaus verabreichte Kilogramm Stickstoff wird in seiner vollen Menge als Überdüngung wirksam (obere Bildhälfte). Bei sehr hohen Stickstoffgaben unterscheiden sich die Überdüngungsmengen zwischen ortsdifferenzierter und schlageinheitlicher Düngung im Schlagdurchschnitt nicht mehr, aber sie sind bei schlageinheitlicher Düngung auf die wenig ertragsfähigen Teilflächen konzentriert, bei ortsdifferenzierter Düngung dagegen gleichmäßig über den Schlag verteilt. Der Vorteil, der bezüglich der Überdüngung (und damit hinsichtlich der Umweltwirkungen) infolge ortsdifferenzierter gegenüber schlageinheitlicher Düngung eintritt, durchläuft ein Maximum, das generell bei etwas niedrigeren Düngergaben liegt, als sie für Maximalerträge notwendig sind (untere Bildhälfte von Bild 8). Die Minderung der Überdüngung durch ortsdifferenzierte Düngerverabreichung wird über das Modell 2 den Beträgen nach etwas niedriger ausgewiesen als über Modell 1, unterscheidet sich aber in ihrer Abhängigkeit vom Düngenniveau nicht wesentlich von dem Verlauf, der im Bild 8 für das Modell 1 zum Ausdruck kommt.

Für die Verfahrensvariante mit diskret gestuften Düngergaben führen die Modellrechnungen sowohl im Hinblick auf Erträge, Erlöse und CO_2 -Bindung als auch bezüglich der Überdüngung zu der Feststellung, daß schon mit wenigen Stufen ein großer Teil derjenigen Vorteilsbeträge erreicht wird, die sich mit unendlich vielen Stufen (d. h. durch real ortsdifferenzierte Düngung) einstellen würden (Bild 9).

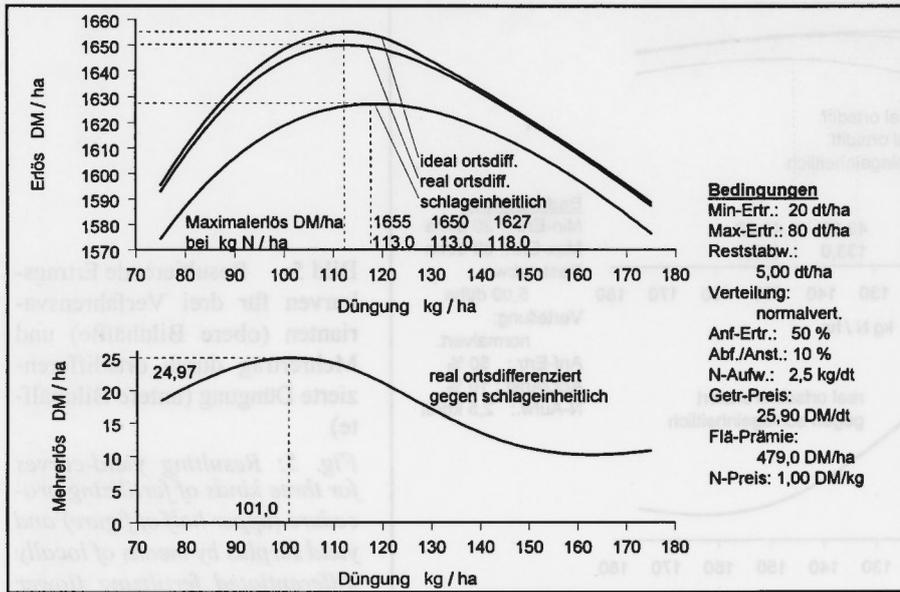


Bild 6: Erlöse bei drei Verfahrensvarianten (obere Bildhälfte) und Mehrerlös durch ortsdifferenzierte Düngung (untere Bildhälfte)

Fig. 6: Proceeds for three kinds of fertilizing procedure (upper half of figure) and proceeds surplus by means of locally differentiated fertilizing (lower half of figure)

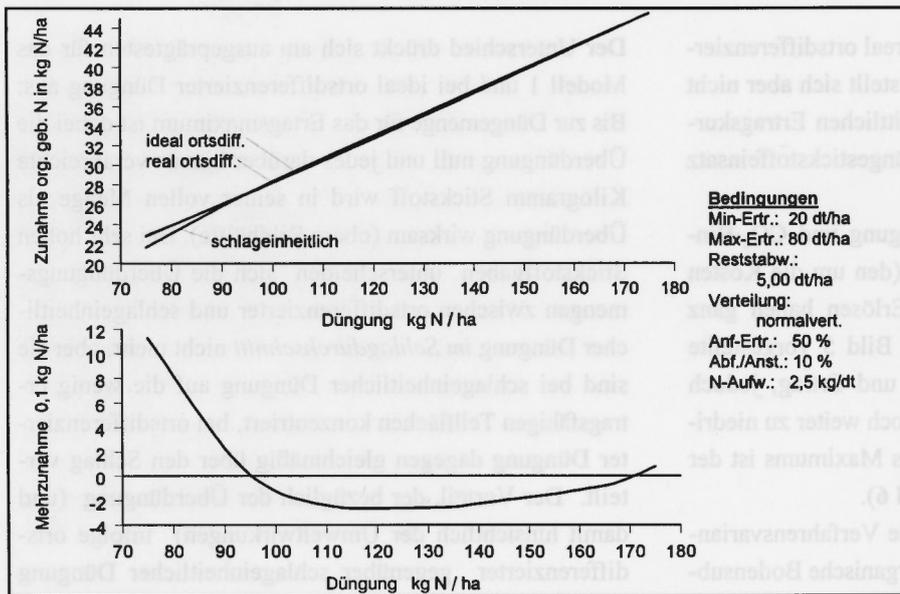


Bild 7: Stickstoffbindung in der Bodensubstanz bei drei Verfahrensvarianten (obere Bildhälfte) und Mehrbindung durch real ortsdifferenzierte gegenüber schlageinheitlicher Düngung (untere Bildhälfte)

Fig. 7: Nitrogen accumulation in organic soil matter for three kinds of fertilizing procedure (upper half of figure) and surplus of accumulations by means of locally differentiated fertilizing compared with unique distribution (lower half of figure)

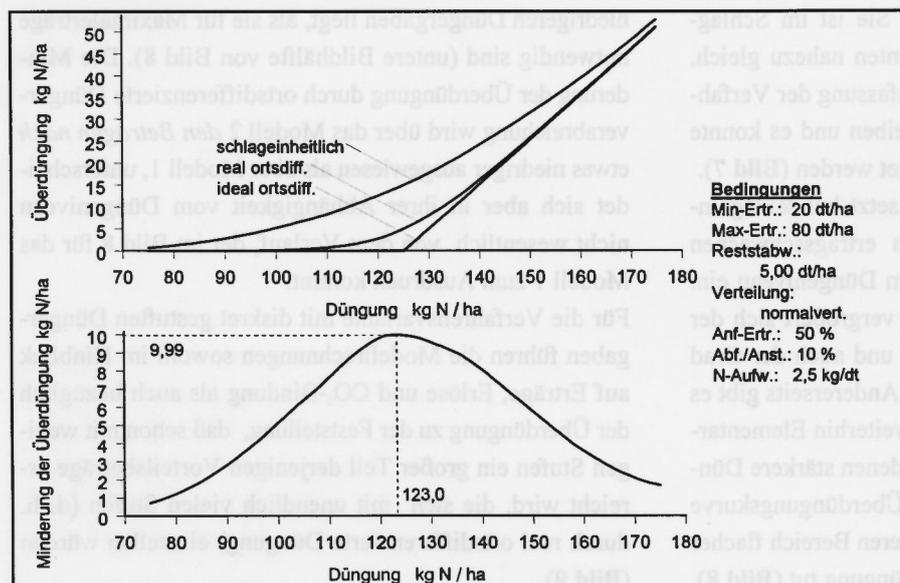


Bild 8: Überdüngung nach Modell 1 für drei Verfahrensvarianten (obere Bildhälfte) und Minderung der Überdüngung durch real ortsdifferenzierte gegenüber schlageinheitlicher Düngung (untere Bildhälfte)

Fig. 8: Overfertilizing by model 1 for three kinds of fertilizing procedure (upper half of figure) and reduced amount of overfertilizing by means of locally differentiated fertilizing compared with unique distribution (lower half of figure)

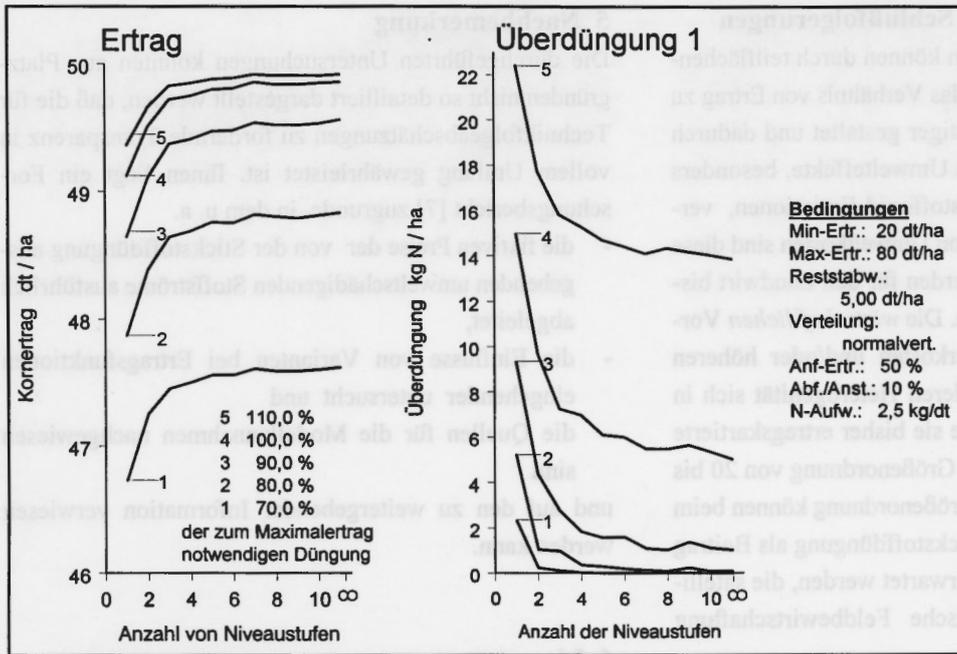


Bild 9: Wirkungen diskret gestufter Düngung für fünf Düngungsstufen abhängig von der Anzahl unterschiedener Niveaustufen der Ertragsfähigkeit
 Fig. 9: Effects of fertilizing in steps for five quantities of fertilizing and versus the number of discriminated steps of fertility

So liegen bei allen durchgeführten Rechnungen die Vorteile gestufter gegenüber schlageinheitlicher Düngung bei Differenzierung in nur zwei Stufen im Bereich zwischen 51 und 78 % und bei Differenzierung in drei Stufen zwischen 80 und 95 % derjenigen Beträge, die sich bei stufenlos ortsdifferenzierter Düngung eingestellt hätten. Alle einzelnen Vorteilswirkungen ortsdifferenzierter Stickstoffdüngung und ihre monetäre Summe nehmen (angenähert durch Potenzfunktionen) progressiv zu mit der durch die Standardabweichung der Ertragsfähigkeiten ausgedrückten Heterogenität der Standortbedingungen innerhalb eines Ackerschlag. Die Progressionsexponenten der Zunahme liegen alle im Bereich zwischen 1,6 und 2,1 (Bild 10). In

Bild 10 ist derjenige Bereich gekennzeichnet, in dem die Standardabweichungen der lokalen Erträge von solchen Ackerschlägen liegen, auf denen Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung durchgeführt wurden. (Streng genommen können die Zahlenwerte der Standardabweichungen von lokalen gemessenen Erträgen und von bekannten lokalen Ertragsfähigkeiten, wie sie in dieser Arbeit definiert sind, nicht völlig identisch sein. Aber zur Orientierung darüber, in welchen Größenordnungen die ertragliche Heterogenität von Ackerschlägen erwartet werden kann, ist diese Gleichsetzung sicher hilfreich.)

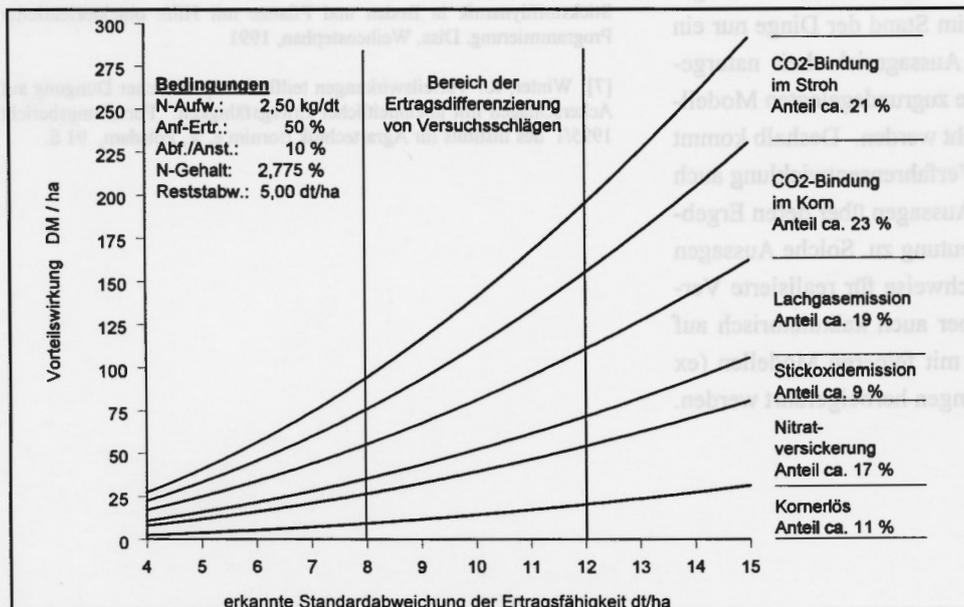


Bild 10: Summe der monetären Vorteile abhängig vom Grad der lokalen Heterogenität der Ertragsfähigkeit
 Fig. 10: Total monetary advantages versus the degree of heterogeneity of fertility

4 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Auf heterogenen Ackerschlägen können durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung das Verhältnis von Ertrag zu Stickstoffdüngeraufwand günstiger gestaltet und dadurch die bewirtschaftungsbedingten Umwelteffekte, besonders Nitratversickerung und Stickstoffoxid-Emissionen, vermindert werden. Bei Ansatz von Umweltkosten sind diese Effekte bedeutend, aber sie werden für den Landwirt bislang nicht einkommenswirksam. Die *wirtschaftlichen* Vorteile aus eingesparten Düngerkosten und/oder höheren Erträgen liegen für Schläge, deren Heterogenität sich in solchen Bereichen bewegt, wie sie bisher ertragskartierte Ackerschläge aufweisen, in der Größenordnung von 20 bis 30 DM/ha. Beträge in dieser Größenordnung können beim Getreideanbau nur über die Stickstoffdüngung als Beitrag zur Deckung der Mehrkosten erwartet werden, die satellitengestützte teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung erfordert.

Sehr kleinräumige Variabilität der Ertragsfähigkeit wird wegen des nicht beliebig engen Flächenrasters von Bodenbeschaffenheits- oder Ertragsmeßwerten nicht erfaßt werden können. Das beeinträchtigt den Ergebnissen zufolge die Vorteilswirkungen teilflächenspezifischer Bewirtschaftung wenig. Auch eine auf nur zwei bis drei Düngungsstufen beschränkte Anpassung an die lokalen Gegebenheiten führt schon zu ähnlich großen Vorteilen, wie sie sich bei stufenloser Anpassung an die lokalen Bedingungen einstellen. Daraus ist abzuleiten, daß für die teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung keine übertriebenen Forderungen an die Genauigkeit und Sicherheit der Ortung und an die Auflösung der lokalen Meß- und Stelldaten gestellt werden müssen.

Die hier auf dem Wege einer Vorkalkulation vorgenommene Bewertung kann beim Stand der Dinge nur ein Zwischenergebnis sein, dessen Aussagesicherheit naturgemäß davon abhängt, wie gut die zugrundegelegten Modellbedingungen der Realität gerecht werden. Deshalb kommt neben Arbeiten zur direkten Verfahrensentwicklung auch der weiteren Gewinnung von Aussagen über deren Ergebnisse und Konsequenzen Bedeutung zu. Solche Aussagen sollten als experimentelle Nachweise für realisierte Verfahrensvarianten (ex post), aber auch kalkulatorisch auf besserer Datengrundlage und mit feineren Modellen (ex ante) für erweiterte Fragestellungen herbeigeführt werden.

5 Nachbemerkung

Die durchgeführten Untersuchungen konnten aus Platzgründen nicht so detailliert dargestellt werden, daß die für Technikfolgeabschätzungen zu fordernde Transparenz in vollem Umfang gewährleistet ist. Ihnen liegt ein Forschungsbericht [7] zugrunde, in dem u. a.

- die fiktiven Preise der von der Stickstoffdüngung ausgehenden umweltschädigenden Stoffströme ausführlich abgeleitet,
- die Einflüsse von Varianten bei Ertragsfunktionen eingehender untersucht und
- die Quellen für die Modellannahmen nachgewiesen sind

und auf den zu weitergehender Information verwiesen werden kann.

6 Literatur

- [1] Auernhammer, H.: Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung. Landtechnik - Darmstadt 45 (1990) 7/8, S. 272 - 278
- [2] Schnug, E.; Haneklaus, S. u. Lamp, J.: Economic and ecological optimization of farmchemical application by "Computer Aided Farming" (CAF). Proc. Int. Conf. on Agric. Engineering Berlin 1990, pp 163 - 164
- [3] Jahns, G u. Kögel, H.: Nutzung der Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge zur Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes - Wirtschaftliche Grundsätze und praktische Anwendung. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik 1992, Heft 14 "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge", S. 17 - 33
- [4] Kersebaum, K. C.: Die Simulation der Stickstoffdynamik von Ackerböden. Diss. Hannover, 1989
- [5] Franco, U.: C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanzen im Boden. Diss. B, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Berlin, 1990
- [6] Engel, Th.: Entwicklung und Validierung eines Simulationsmodells zur Stickstoffdynamik in Boden und Pflanze mit Hilfe objektorientierter Programmierung. Diss. Weihenstephan, 1991
- [7] Winter, R.: Vorteilswirkungen teilflächenspezifischer Düngung auf Ackerschlägen mit uneinheitlicher Ertragsfähigkeit. Forschungsbericht 1995/1 des Instituts für Agrartechnik Bornim e. V, Potsdam, 91 S.