

## Vorstellung eines Modells und Forschungskonzeptes zur Quantifizierung und Optimierung der N-Düngung unter Berücksichtigung von ökologischen und produktionstechnischen Einflußfaktoren

PETER SCHOOP

Institut für Pflanzenbau  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

### Einleitung

Einen komplexen Einfluß auf das Pflanzenwachstum, die Wirkung der Stickstoffdüngung auf den Getreideertrag und die Stickstoffdynamik hat der Witterungsverlauf des Vegetationsjahres noch vor der Aussaat im Herbst bis zur Abreife im Sommer. Der Witterungsverlauf bestimmt einerseits mit über die N-Mineralisation, die N-Verfügbarkeit, die N-Verlagerbarkeit und die Auswaschungsrates aus der Durchwurzelungszone, andererseits hat er starken Einfluß auf die Ausbildung der einzelnen Ertragskomponenten und somit auch auf die Ertragsbildung (Hanus und Schoop 1987) und den großen Komplex der Wechselwirkungen innerhalb des Systems: Boden, Nährstoffe, Düngung, Pflanzenwachstum, Ertragsbildung, Ertragshöhe (Finck 1994, Günther-Borstel 1994).

So kann z. B. eine optimale Temperatur für die Mineralisation und Nitrifikation und die resultierende verlagerbare Nitratmenge zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Vegetationsperiode in einem Jahr von einem gut entwickelten Pflanzenbestand in Ertrag umgesetzt werden, in einem anderen jedoch nicht, da die bereits abgelaufene Witterung keine ausreichende Pflanzenentwicklung zuließ. Damit sind der Aufnahme von Stickstoff durch den Pflanzenbestand mengenmäßig bestimmte Grenzen gesetzt. In diesem Fall ist bei entsprechenden Niederschlägen mit einer Nitrat-Verlagerung bzw. Auswaschung zu rechnen. Dies gilt insbesondere für sandige Böden mit geringer Nutzwasserkapazität. Eine zu diesem Zeitpunkt überzogene N-Düngung, insbesondere in Nitratform, wird weniger effektiv in Ertrag umgesetzt werden können und die Gefahr der Grundwasserbelastung erhöhen. So kommt es vor, daß in einem Jahr die gleiche Menge gedüngten Stickstoffs weniger in Ertrag umgesetzt wird als in einem anderen. Mit einer besseren Verteilung der Teilgaben in dem einen Jahr hätte jedoch, bei gleicher Gesamtmenge, ein ähnlich hoher Ertrag

erzielt werden können wie in dem anderen Jahr. Es treten ebenfalls Jahre auf, in denen die gedüngte N-Menge und N-Verteilung von nicht so großer Bedeutung für den Ertrag sind (Schoop 1987). Diese Ergebnisse wurden auch durch Feldversuche zum

<b>1. Witterungsverlauf - N-Düngungssystem - Weizen- u. Gersteertrag</b>
Schätzung der Erträge und der N-Düngungseffizienz (N-Gehalte, N-Bilanzreste) von 48 unterschiedlichen N-Düngungssystemen aufgrund des Witterungsverlaufes von August (vor der Aussaat) bis August (zur Ernte) des jeweiligen Standortes
<b>2. Witterungsspezifische Funktion</b>
zur Beschreibung der witterungsabhängigen Beziehung zwischen dem Ertrag, der N-Menge und Aufteilung zu drei Zeitpunkten während des jeweiligen Jahres (Veg.-beg. n. Winter, EC 29/30 u. EC 49/51). Optimierung der N-Düngung in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf ist möglich (s. Punkt .5).
<b>3. Berücksichtigung weiterer Einflußfaktoren und Wechselwirkungen</b>
Modifikation der geschätzten Erträge aufgrund der
3.1 Bodentextur und Bodenzahl (n. Reichsbodenschätzung)
3.2 produktionstechnischen Faktoren (z. B. Saattermin, Fungizideinsatz etc.)
3.3 Sorteneigenschaften (n. 'Beschreibende Sortenliste' des Bundessortenamtes)
3.4 geographischen Lage des Standortes (Breitengrad, Längengrad, Höhe ü. NN)
3.5 Wechselwirkungen zwischen den Punkten 3.1 bis 3.4 und den witterungsbedingten Ertragspotentialen
<b>4. Witterungs- und schlagspezifische Funktion</b>
zur Beschreibung der witterungsabhängigen und schlagspezifischen Beziehung zwischen Ertrag, N-Menge und Aufteilung zu drei Zeitpunkten während des jeweiligen Jahres (Veg.-beg. n. Winter, EC 29/30 u. EC 49/51).
<b>5. Optimierung der N-Menge zu 3 Zeitpunkten</b>
z. B. hinsichtlich folgender Produktionsziele
5.1 Ertragsmaximierung
5.2 Maximierung der N-kostenfreien Leistung (optim. Aufwandmenge)
5.3 Maximierung der N-Düngungseffizienz [kg Ertrag/kg N-Düngung]
5.4 Minimierung von N-Bilanzresten (N-Dg. - N-Abfuhr vom Feld) [kg N/ha]
5.5 Ertragsmaximierung bei Vorgabe von Mindestrohproteingehalten [dt/ha]
5.6 Zielgrößen wie 5.1 bis 5.5. jedoch bei vorgegebener N-Dünger Menge

Tabelle 1: Struktur des Prognosemodells 'N-PROG' zur N-Bedarfsermittlung und Schätzung der Erträge im Getreidebau

Vergleich verschiedener N-Düngungsstrategien von den Landwirtschaftskammern, den Beratungsstellen, der DLG und anderen Institutionen bestätigt (z. B. Versuchsergebnisse 1987 der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein). Die untersuchten N-Düngungsstrategien wiesen dabei eine Differenz von z. T. über 100 kg N/ha in der Gesamtaufwandmenge auf, während sich die später geernteten Erträge um nicht einmal 2 dt/ha unterschieden. Bei einigen Strategien treten daher erhebliche N-Bilanzreste auf, die der Gefahr der Auswaschung unterliegen können. Aus diesen Gründen ist es notwendig, den Witterungsverlauf zusammen mit den Bodeneigenschaften und produktionstechnischen Parametern stärker in die Düngeplanung miteinzubeziehen als bisher gewohnt.

### Struktur des Prognosemodells 'N-PROG' zur Bemessung der Stickstoffdüngung und Schätzung der Erträge im Getreidebau

Tabelle 1 zeigt die Gesamtstruktur des Modells 'N-PROG'. Es gliedert sich in ein Basismodul (Pkt. 1 u. 2), ein Erweiterungsmodul (Pkt. 3 u. 4) und ein Programmteil zur Optimierung der N-Düngung (Pkt. 5). Das Basismodul berücksichtigt zunächst den jahresspezifischen Witterungsverlauf eines Standortes bei der Ertragsschätzung und Optimierung der N-Düngung hinsichtlich Menge und Aufteilung. Das Erweiterungsmodul trägt weiteren Einflußfaktoren (z. B. Bodentextur, Bodenzahl und produktionstechnische Faktoren) und Wechselwirkungen Rechnung.

Als Datenbasis für die Entwicklung des Prognosemodells dienen die Ergebnisse eines seit 1974 laufenden Langzeitversuches auf dem Versuchsgut Hohenschulen der Universität Kiel mit den Aufzeichnungen der zeitlich entsprechenden Witterungsverläufe (Tabelle 2).

Zur Kalibrierung und Erweiterung des Modells stehen derzeit ca. 5000 Versuchsergebnisse, Schlagkartei- und Witterungsaufzeichnungen (1982-1995) von 271 anderen Standorten in den alten und neuen Ländern der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung sowie die Versuchsergebnisse des seit 1991 in Kiel/Hohenschulen laufenden Sonderforschungsbereiches 192 'Optimierung pflanzenbaulicher Produktionssysteme im Hinblick auf Leistung und ökologische Effekte'.

### Das Basismodul von 'N-PROG'

Unterschiedliche pflanzenbauliche Produktionssysteme reagieren unterschiedlich auf den jahresspezifischen Witterungsverlauf. Aus diesem Grunde wurde die Abhängigkeit der Getreideerträge unterschiedlicher N-Düngungssysteme vom Witterungsverlauf aus den Ergebnissen des o. g. Langzeitversuches beschrieben und quantifiziert. Dabei wurden die erzielten Erträge jeder der 48 geprüften

Der Versuchsstandort liegt 15 km südlich Kiels in einem Endmoränengebiet jungdiluvialen Ursprungs. Die Bodenart ist als sandiger Lehm anzuspochen und ist vom Bodentyp her eine mesotrophe Parabraunerde mit schwacher Tonverlagerung. Bodenzahl 40-50				
Versuchsbeginn:	1974			
Prüffrüchte:	Winterweizen und Wintergerste			
Fruchtfolge:	Winterraps, Winterweizen, Hafer, Wintergerste Weizen und Gerste werden versuchsmäßig gedüngt Raps und Hafer einheitlich verhalten gedüngt			
Aussaattermin:	Winterweizen: 1. Oktoberhälfte Wintergerste: 2. Septemberhälfte			
Pflanzenschutz:	Behandlung gegen Halm-, Blatt- und Ährenkrankheiten			
Wiederholungen:	2			
Prüffaktoren: N <sub>ges</sub> -Menge (0-320 kg N/ha) und N-Verteilung (1.-3. Termin)				
Zeitpunkt der N-Ausbringung	EC	Bez.	N-Mengen (kg N/ha)	
Wachstumsbeginn nach Winter	13-20	N1	0	40 80 120
Bestockungsende	29/30	N2	0	40 80 120
Schoßende	49/51	N3	0	40 80
Anzahl der N-Düngungssysteme: 48 (4*4*3)				
Zum Beispiel:				
(kg N/ha)	N1	N2	N3	N-ges.
System 1	0	0	0	0
System 26	80	0	40	120
System 48	120	120	80	320
Die N1-Gabe dient der Förderung der Beährung von Nebetrieb. Die N2-Gabe zu Schoßbeginn vermindert die Trieb- und Ährchenreduktion, und die N3-Gabe soll die Kornanlage und -füllung sichern sowie die Qualität erhöhen.				

Tabelle 2: Kenndaten zum Dauerversuch: Witterung - N-Düngung - Ertrag

N-Systeme zum Witterungsverlauf des jeweiligen Versuchsjahres in Beziehung gesetzt, und zwar beginnend mit der Witterung des Monats August, noch vor der Aussaat des Wintergetreides, und endend mit der Witterung des Monats August zur Zeit der Reife bzw. Ernte. In der Tabelle 3 ist die Struktur der Schätzgleichungen für die Monate aufgeführt. Es ergeben sich mit 48 N-Düngungsvarianten und 13 Monaten (August bis August) 624 getrennte multiple Regressionen zur Schätzung der Getreideerträge in Abhängigkeit von N-Düngungssystem und Monatswitterung.

Die Schätzfehler der Einzelmonate sind für Weizen in Abbildung 1 als Balkendiagramm dargestellt. Im Durchschnitt der 48 N-Systeme weisen im Herbst der Monat Oktober, im Winter der Januar, im Frühjahr der April und im Sommer zur Ernte der August die geringsten Standardfehler auf.

Für eine Ertrags- und N-Düngungsprognose kann jedoch nicht die Witterung eines Monats allein bestimmend sein, sondern der Witterungsverlauf der gesamten Anbauperiode sowie die Witterung vor und während der Aussaat des Getreides.

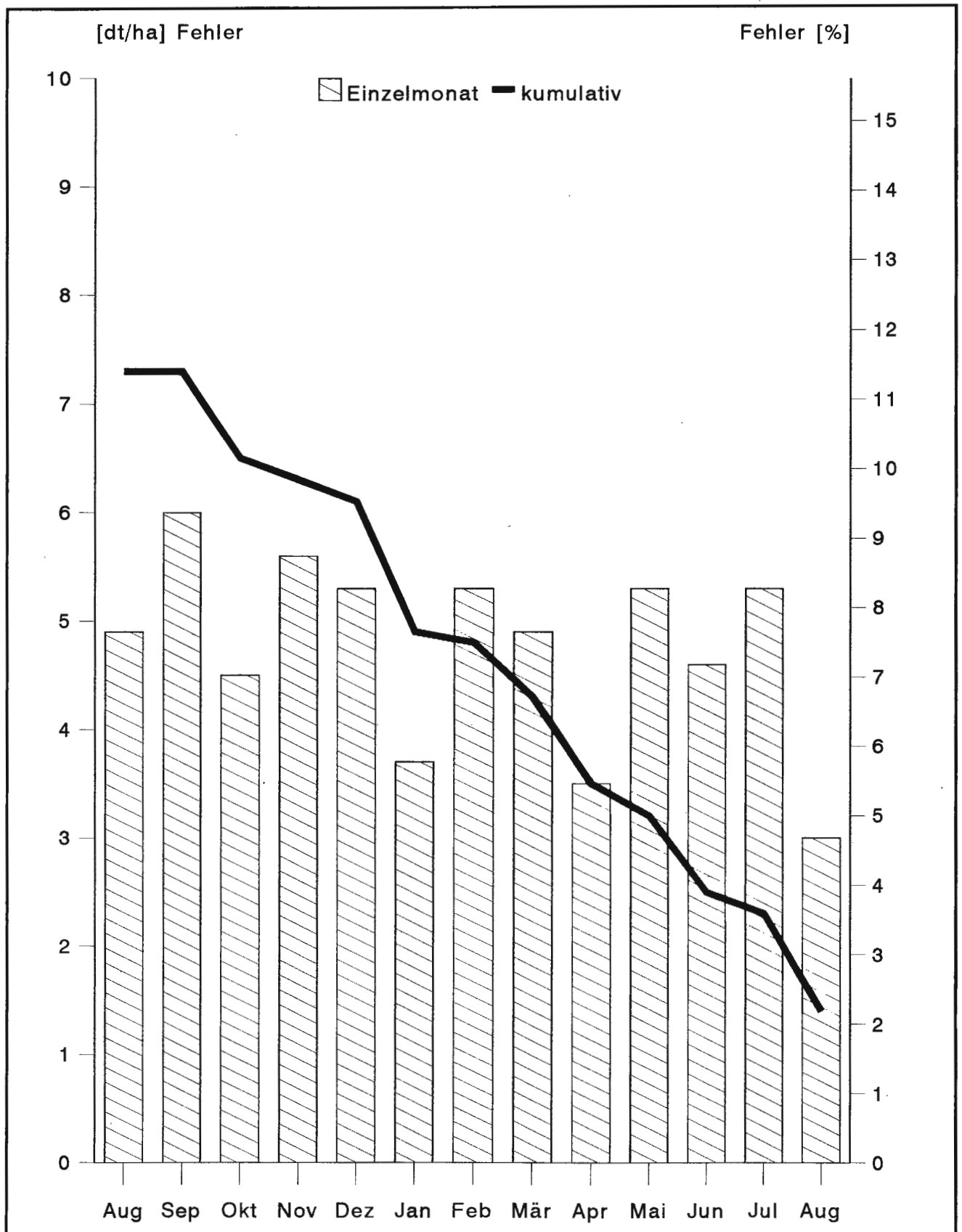


Abbildung 1: Standardfehler der Ertragsschätzung von Winterweizen durch den Witterungsverlauf von August bis zur Ernte, Balken - durch den Monat allein, Linie - durch die Monate gemeinsam, Durchschnitt von 48 N-Düngungssystemen, Hohenschulen 1975 - 1993

Für aktuelle N-Bedarfsprognosen und Ertrags-schätzungen wird daher die bereits abgelaufene Witterung insgesamt berücksichtigt und für den künftigen Verlauf das langjährige Mittel angenommen. Hierbei werden die monatlichen Ertragsschätzungen der N-Systeme ihrer Bedeutung nach quantifiziert und gewichtet und auch Wechselwirkungen zwischen den Monaten berücksichtigt (Tabelle 4). Beispielsweise ist die Bedeutung der Märzwitterung für das Ertragspotential abhängig von der Witterung im Januar.

Ebenso werden signifikante Wechselwirkungen zwischen der Höhe der N-Teilgaben und den monatlich geschätzten Ertragspotentialen der N-Düngungssysteme in die Prognosen einbezogen. Und letztlich werden noch die vom witterungsabhängigen Ertragspotential isolierten Wirkungen der Teilgaben und deren Wechselwirkungen auf den Ertrag berücksichtigt.

Damit ergeben sich Standardfehler, die zunächst relativ hoch sind (ca. 7,3 dt/ha), jedoch im Verlauf der Vegetationsperiode geringer werden und bei 1,5 dt/ha unter Berücksichtigung der Witterung im August enden (Abbildung 1, durchgezogene Linie).

Bis zum jeweiligen Düngungstermin (Vegetationsbeginn nach Winter, Schoßbeginn EC 29/30 und Beginn des Ährenschiebens EC 49/51) können so unter Berücksichtigung aktueller und langjähriger Witterungsdaten eines Standortes die Erträge der 48 untersuchten N-Düngungssysteme geschätzt werden. Anhand dieser Schätzwerte lassen sich funktionale Beziehungen zwischen der in Menge und zeitlichen Verteilung differenzierten N-Düngung und den Erträgen für das betreffende Jahr berechnen (Tabelle 1, Pkt. 2 und Tabelle 5); so daß eine Optimierung der N-Düngung, eine Abschätzung der Düngungseffizienz der einzelnen Teilgaben und deren gegenseitige Kompensationsfähigkeit in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf möglich sind.

#### Das Erweiterungsmodul von 'N-PROG'

Die Schätzungen des Basismoduls gelten strenggenommen nur unter den Rahmenbedingungen, wie sie für den Versuchsstandort typisch sind.

Mit Hilfe retrospektiver Analysen von o. g. N-Düngungsversuchen, Schlagkarteiaufzeichnungen und Düngungsempfehlungen für andere Standorte wurde und wird das Modell laufend an andere Standortverhältnisse und produktionstechnische Bedingungen angepaßt (Tabelle 1, Pkt. 3).

Hierbei wird versucht, vorhandene Residuen (Schätzungen durch das Basismodell), die durch den Witterungsverlauf des jeweiligen Standortes und die Stickstoffdüngung nicht erklärt werden können, durch Berücksichtigung der Einflüsse schlagspezifischer Faktoren und deren Wechselwirkungen mit dem stickstoffdüngungs- und witterungsbedingten Ertragspotential zu minimieren.

Der derzeitige Analysenstand bringt zum Ausdruck, daß nicht immer die Haupteffekte, sondern oft die Wechselwirkungen, ins-

$s_{i,m} = \text{const}_{i,m} + \sum_{j=1}^4 b_{i,m,j} \cdot \text{wit}_{m,j} + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=j}^4 b b_{i,m,j,k} \cdot \text{wit}_{m,j} \cdot \text{wit}_{m,k}$	
$s_{i,m}$	geschätzter Ertrag je N-Düngungssystem ( $i=1-48$ ) und Einzelmonat (August bis August, $m=1-13$ ) aufgrund der Witterungsparameter. Es ergeben sich insgesamt $48 \cdot 13 = 624$ unabhängige Funktionen.
$b_{i,m,j}$	Regressionskoeffizienten der linearen Glieder
$b b_{i,m,j,k}$	Regressionskoeffizienten der Wechselwirkungs- und quadratischen Glieder
$\text{wit}_{m,1}$	monatliche Niederschlagssumme [mm]
$\text{wit}_{m,2}$	monatliche Tagesdurchschnittstemperatur [°C]
$\text{wit}_{m,3}$	monatliche Tagessonnenscheindauer [h]
$\text{wit}_{m,4}$	monatliches Tagessättigungsdefizit der Luft [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
Wechselwirkungs- und quadratische Glieder werden nur im Fall einer signifikanten Varianzerklärung in die Regression aufgenommen	

Tabelle 3: Struktur der Regressionsfunktionen zur Schätzung der Erträge unterschiedlicher N-Düngungssysteme aufgrund der Witterung in den Einzelmonaten August (vor Aussaat) bis August (zur Ernte)

besondere im Zusammenhang mit dem Witterungsverlauf, der Bodentextur und der Bodenzahl, von hervorragender Bedeutung für die Effizienz der N-Düngung und die Ertragsschätzung sind. Auch die Vorfruchtwirkungen und die verschiedenen Resistenzeigenschaften der Sorten gegenüber Pilzerkrankungen zeigen in Verbindung mit dem Witterungsverlauf und fungiziden Maßnahmen eindeutige Ergebnisse (Schoop 1988, Schoop und Hanus 1989a und 1990).

Durch die Quantifizierung der witterungsabhängigen, schlag- und sortenspezifischen Beziehung zwischen N-Aufwandmenge und Ertrag (Tabelle 5 und Tabelle 1, Pkt. 4 und 5) läßt sich eine N-Bedarfsprognose hinsichtlich der Maximierung des Ertrages, der N-kostenfreien Leistung und der Düngungseffizienz vornehmen. Die Prognosesicherheit des Modells soll unter Einbeziehung weiterer Ergebnisse geprüft und validiert werden.

#### Räumlich variable N-Düngung unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Boden und Witterungsverlauf

Bisher wurden mit Hilfe des Modells bundesweit schlagspezifische Düngungsprognosen und Ertragsschätzungen erstellt. Neben der jahres- und standortspezifischen Witterung haben insbesondere die Bodenverhältnisse, charakterisiert durch Textur und Bodenzahl, eine herausragende Bedeutung für die Ermittlung des N-Düngerbedarfes.

Durch den Einsatz von geographischen Bodeninformationssystemen (z. B. GIS, DGPS) die je nach Schlaggröße, Bodenvariabilität und -heterogenität entsprechend unterschiedliche Informationsdichten bereitstellen müssen, könnten unter Berücksichtigung vorgegebener Rahmenbedingungen (Getreideart, Sorte, Vorfrucht usw.) nicht nur zeitlich differenzierte, sondern auch teilflächenspezifische N-Bedarfsermittlungen erstellt werden.

$y_i = \text{const} + \sum_{m=1}^{13} w_m \cdot s_{i,m} + \sum_{m=1}^{12} \sum_{k=m+1}^{13} w_{w,m,k} \cdot s_{i,m} \cdot s_{i,k}$	
$+ \sum_{m=1}^{13} \sum_{g=1}^3 w_{n,m,g} \cdot s_{i,m} \cdot nd_{g,i}$	
$+ \sum_{g=1}^3 c_g \cdot nd_{g,i} + \sum_{g=1}^3 \sum_{h=g}^3 cc_{g,h} \cdot nd_g \cdot nd_{h,i}$	
$y_i$	geschätzter Ertrag unterschiedlicher N-Düngungssysteme ( $i=1-48$ ) aufgrund des Witterungsverlaufes unter Berücksichtigung der Bedeutung der Einzelmonatsschätzungen ( $s_{i,m}$ ), der Höhe der 3 N-Teilgaben ( $nd_{g,i}$ ) und der Wechselwirkungen
$w_m$	Wichtungskoeffizienten ( $m=1-13$ ) der Einzelmonatsschätzungen ( $s_{i,m}$ )
$w_{w,m,k}$	Wichtungskoeffizienten der Wechselwirkungen zwischen den Einzelmonatsschätzungen ( $s_{i,m} \cdot s_{i,k}$ )
$w_{n,m,g}$	Wichtungskoeffizienten der Wechselwirkungen zwischen den Einzelmonatsschätzungen und der Höhe der 3 N-Teilgaben ( $s_{i,m} \cdot nd_{g,i}$ )
$c_g$	Wichtungskoeffizienten, der von der Witterung isolierten linearen Wirkung der 3 N-Teilgaben auf den Ertrag
$cc_{g,h}$	Wichtungskoeffizienten der von der Witterung isolierten quadratischen Wirkungen und Wechselwirkungen der N-Teilgaben auf den Ertrag
Die linearen, quadratischen und Wechselwirkungsglieder werden nur im Fall einer signifikanten Varianzklärung in die Regression aufgenommen	

Tabelle 4: Struktur der Regressionsfunktionen zur Schätzung der Erträge unterschiedlicher N-Düngungssysteme aufgrund des Witterungsverlaufes von August vor Aussaat bis August zur Ernte

$y = a_0 + b_1 \cdot N_1 + b_2 \cdot N_2 + b_3 \cdot N_3$ $+ b_4 \cdot N_1 \cdot N_2 + b_5 \cdot N_1 \cdot N_3 + b_6 \cdot N_2 \cdot N_3$ $+ b_7 \cdot N_1^2 + b_8 \cdot N_2^2 + b_9 \cdot N_3^2$	
Witterungsspezifische bzw. witterungs- und schlagspezifische Parameter	
$y$	geschätzter Ertrag
$N_1-N_3$	N-Menge zu den Terminen: Veg.-beg. n. Winter, EC 29/31 und EC 49/51
$a_0$	Ertrag ohne N-Düngung
$b_1-b_3$	Koeffizienten der linearen Wirkung der Teilgaben
$b_4-b_6$	Koeffizienten der Wechselwirkungen zwischen den Teilgaben
$b_7-b_9$	Koeffizienten der quadratischen Wirkung der Teilgaben

Tabelle 5: Witterungsspezifische bzw. witterungs- und schlagspezifische Funktion zur Quantifizierung der Abhängigkeit des Ertrages von N-Menge und Aufteilung

Die folgende Modellsimulation soll beispielhaft zeigen, in welchem Ausmaß unterschiedliche Witterungs- und Bodenverhältnisse die Beziehungen zwischen N-Düngung und Ertrag verändern können und welche optimalen N-Aufwandmengen und Erträge daraus resultieren. Hierfür wurden die Witterungsverläufe der Jahre 1977 und 1984 sowie ein schluffiger und ein sandiger Lehm Boden (Bodenzahl 80 bzw. 40) ausgewählt.

Die Simulationsergebnisse der Szenarien verdeutlichen, daß die Erträge und die erforderlichen N-Aufwandmengen mit zunehmender Bodengüte in beiden Jahren ansteigen (Abbildung 2 und Tabelle 6).

Im Jahr 1977 wurden auf besseren Böden 31 kg N/ha, 1984 zusätzlich 41 kg N/ha benötigt, um das erreichbare Ertragspotential auf sandigem Lehm Boden um 22 dt/ha bzw. 29 dt/ha zu übertreffen.

Witter.	1977		1984	
	sL/40	uL/80	sL/40	uL/80
N1	51	73	83	90
N2	64	73	54	91
N3	80	80	76	73
Nges	195	226	213	254
Ertrag	85	107	77	106

Tabelle 6: Optimale N-Aufwandmenge und Ertragsleistung von Winterweizen in Abhängigkeit von der Wechselwirkung zwischen Witterungsverlauf und Bodenbonität (N-Düngung in kg N/ha, Ertrag in dt/ha)

Auf leichten Böden war das erreichbare Ertragspotential 1977 bei einer geringeren Aufwandmenge sogar höher als 1984, auf guten in beiden Jahren etwa gleich, jedoch war hierfür 1984 der N-Aufwand um 28 kg/ha höher. Auch auf die zeitliche Aufteilung der erforderlichen N-Gesamtgaben wirkten sich die jahrespezifischen Witterungsverläufe und Bodenverhältnisse aus.

Bei etwas geringeren N-Gaben zum Ährenschieben 1984 auf beiden Böden mußte das Schwergewicht der Frühjahrsdüngung in diesem Jahr auf leichtem Boden auf der ersten Teilgabe nach Winter (N1) liegen. 1977 mußte die Gabe zu Schoßbeginn (N2) betont werden. Die Höchstertragsfläche (Abbildungen 2 und 3) war 1984 auf diesem Boden jedoch wesentlich ausgedehnter als 1977, was bedeutet, daß Abweichungen hinsichtlich Menge und Aufteilung der Frühjahrsgaben (N1 und N2) nicht so große Ertragseinbußen zur Folge gehabt hätten, wie dies 1977 der Fall gewesen wäre.

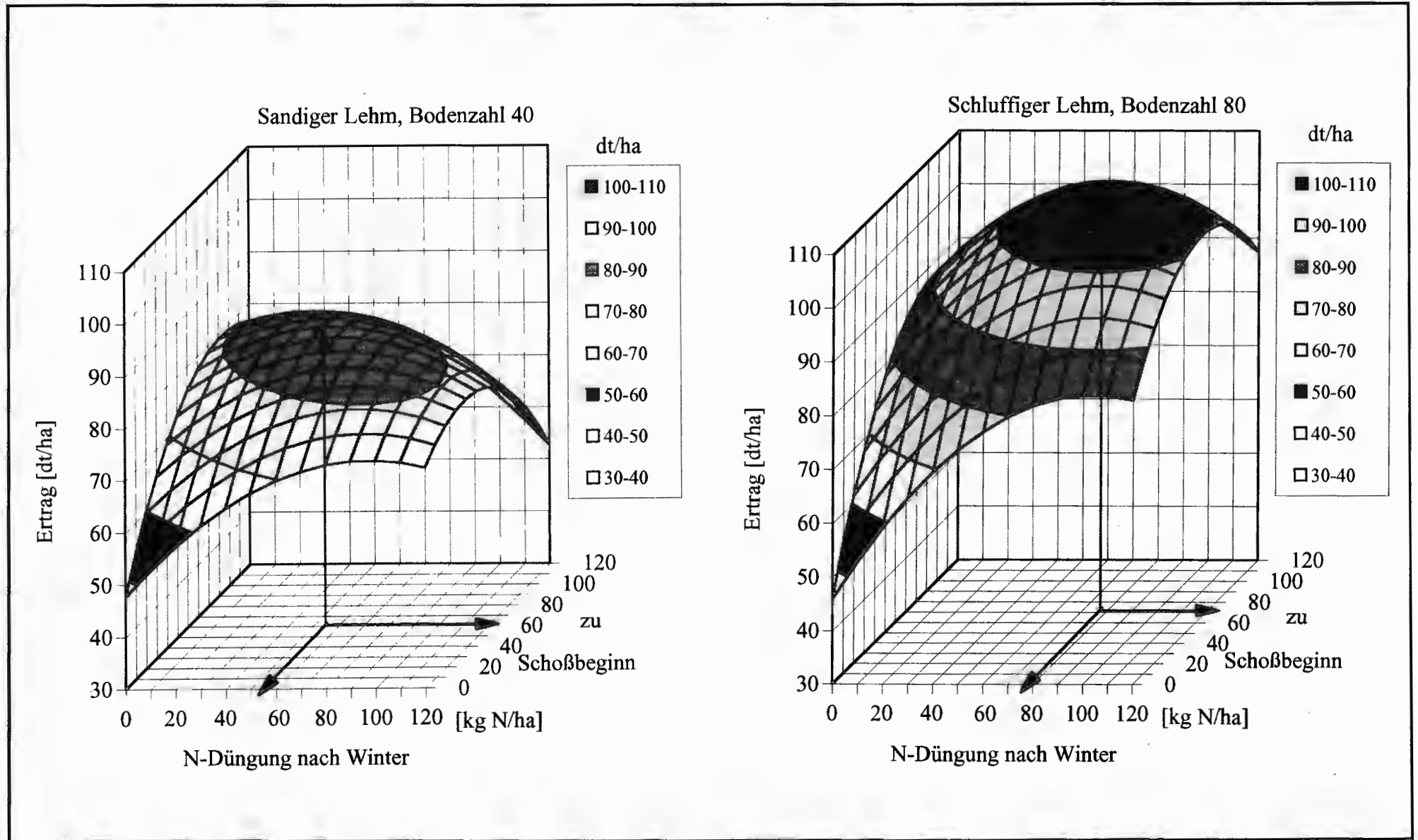


Abbildung 2: Beziehungen zwischen N-Düngung und Ertrag und optimale Aufwandmengen der Frühjahrsgaben auf sandigem und schluffigem Lehm Boden unter den Witterungsverhältnissen von 1977

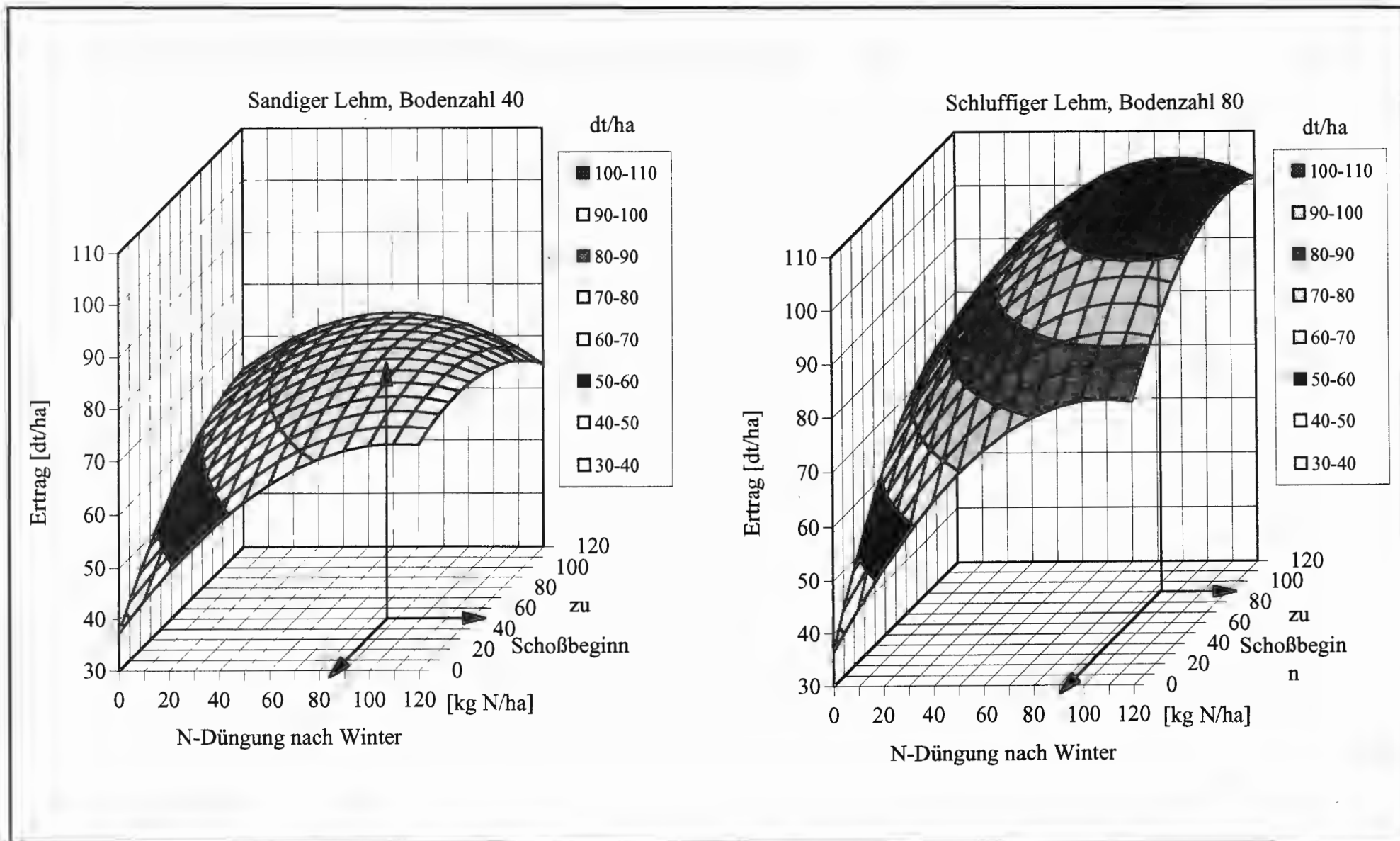


Abbildung 3: Beziehungen zwischen N-Düngung und Ertrag und optimale Aufwandmengen der Frühjahrsgaben auf sandigem und schluffigem Lehm Boden unter den Witterungsverhältnissen von 1984

Auf schluffigem Lehmboden mußten die beiden Teilgaben in beiden Jahren gleich hoch bemessen werden. Jedoch war 1977 die erforderliche Aufwandmenge je Teilgabe um ca 17 kg N/ha geringer als 1984.

### Mißachtung der Wechselwirkungen zwischen Boden und Witterungsverlauf

Abweichungen von der optimalen Düngung können je nach Situation beträchtliche Ertragseinbußen und damit wirtschaftliche Verluste zur Folge haben.

Mit zunehmender Bodengüte steigt das Ertragspotential an; auf besseren Böden sind jedoch stärkere Ertragseinbußen zu erwarten, wenn von der optimalen N-Menge und Verteilung abgewichen wird. Dies wird besonders im Jahr 1984 an der sich verkleinernden Fläche der Höchstträge deutlich (Abbildung 3).

In der Tabelle 7 sind die Effekte wiedergegeben, die bei einer fehlerhaften N-Düngung in Abhängigkeit von den Wechselwirkungen zwischen Witterung und Boden eintreten können.

Im 2. und 4. Quadranten der Tabelle ist unterstellt, daß in beiden Jahren zwar der Witterungsverlauf korrekt berücksichtigt wurde, daß aber die Düngung auf andere Bodenverhältnisse ausgerichtet worden wäre. In der Diagonalen, die jeweils die korrekte Düngung wiedergibt, sind die erreichbaren Erträge eingetragen, die jeweils für die betreffende Zeile gelten. In beiden Jahren wäre der Effekt sehr ähnlich gewesen. Hätte man gute Böden so gedüngt wie mittlere bzw. umgekehrt, wären Mindererträge eingetreten, und zwar um so stärkere, je größer die Diskrepanz zwischen Schätzbasis und Anwendungsbereich gewesen wäre. Die N-kostenfreien Leistungen werden in jedem Fall gemindert, insbesondere wenn leichtere Böden so gedüngt werden wie bessere, da neben den Ertragseinbußen zusätzliche Kosten durch die erhöhten Stickstoffaufwendungen entstehen. Aber auch im umgekehrten Fall können die Stickstoffeinsparungen die Mindererträge nicht ausgleichen.

Wäre man auch bei der Witterung von einer falschen Schätzbasis ausgegangen und hätte die Teilflächen 1984 so gedüngt wie 1977 bzw. umgekehrt (1. u. 3. Quadrant in Tabelle 7),

Ernte	Düng.	1977		1984	
		sL/40	uL/90	sL/40	uL/90
19	sL/40	85/0	-2/31	-2/18	-11/59
77	uL/90	-3/-31	107/0	-1/-13	-4/28
19	sL/40	-3/-18	-1/13	77/0	-3/41
84	uL/90	-9/-59	-1/-28	-3/-41	106/0

Tabelle 7: Abweichungen von der optimalen N-Aufwandmenge und Ertragseinbußen bei Winterweizen durch Nichtbeachtung der Wechselwirkung zwischen Witterung und Bodenbonität (Ertrag dt/ha/ Abweichung N-Düngung in kg N/ha)

wären erheblich größere Ertragseinbußen eingetreten. Darüber hinaus ist erkennbar, daß die Effekte einer solchen Fehleinschätzung in beiden Jahren entgegengesetzt gewesen wären. Während 1977 besonders auf leichten Böden große Ertragseinbußen eingetreten wären, wenn man sie falsch gedüngt hätte (11 dt/ha Ertragsminderung mit 59 kg N/ha Mehraufwand), wäre dies 1984 auf besseren Standorten der Fall gewesen (9 dt/ha Ertragsminderung mit 59 kg N/ha Minderaufwand).

### Schlußbetrachtung

Der vorgestellte Modellansatz zur Berücksichtigung von ökologischen und produktionstechnischen Einflußfaktoren bei der Gestaltung der N-Düngung zu Wintergetreide geht über die bestehenden Ansätze zur Optimierung der N-Düngung insofern hinaus, da nicht nur der verfügbare N-Vorrat des Bodens zu bestimmten Zeitpunkten (N<sub>min</sub>-Methode) und die nachlieferbare N-Menge (EUF) oder der Versorgungszustand des Bestandes (Nitratkonzentration des Zellsaftes) sowie die Ausgangsbedingungen (Saatzeit, Fruchtfolge etc.) berücksichtigt werden, sondern die N-Düngung wird zusätzlich am veränderten Ertragspotential des jeweiligen Produktionssystems in Abhängigkeit von der Jahreswitterung und den Bodenverhältnissen ausgerichtet. Damit erhält das Verfahren die erforderliche dynamische Komponente. Die retrospektiven Analysen offenbaren das Ausmaß notwendiger und möglicher Reaktionen. Es kann jedoch nur voll ausgeschöpft werden, wenn zum Zeitpunkt der jeweiligen Entscheidung vollständige Information vorliegt. Dies ist in der Praxis nicht der Fall, da vielfach die Folgewitterung darüber entscheidet, ob die verabreichte Menge optimal war. Bei einer Aufteilung der Gesamtmenge auf mehrere Vegetationsabschnitte nimmt der Informationsstand jedoch ständig zu und damit auch die Trefferwahrscheinlichkeit. Hinzu kommt, daß durch die Folgegaben Fehleinschätzungen bei der vorausgegangenen N-Düngung korrigiert werden können. Außerdem lassen sich für die Folgewitterung unterschiedliche Szenarien vorgeben und die daraus resultierenden Konsequenzen im Sinne einer Risikominderung nutzen.

Mit Kenntnis und Einbeziehung der Bodenvariabilität eines Schlags in die Modellrechnungen, ist es möglich, teilflächenorientierte Ertragsschätzungen vorzunehmen, daran die N-Düngung zu optimieren und eine räumlich variable Düngungskartierung für den gesamten Schlag zu erstellen. Die anschließende Ermittlung der räumlichen Ertragsverteilung erlaubt eine Überprüfung der abgegebenen Prognosen. Mit Hilfe retrospektiver Analysen kann eine für den jeweiligen Schlag und dessen Heterogenität spezifische Kalibrierung vorgenommen werden. Die Informationen jährlich erstellter Ertragskartierungen können modellmäßig erfaßt werden, so daß eine zunehmende Prognosesicherheit und damit auch eine erhöhte Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs zu erwarten ist. Hierdurch würden ökologischen und ökonomischen Belangen gleichermaßen Rechnung getragen (Schoop und Hanus 1989b).



## Zusammenfassung

Die Kalkulation der Stickstoffdüngung hinsichtlich Menge und Aufteilung ist immer noch mit Unsicherheit verbunden. Die Ursachen hierfür liegen im Witterungsverlauf und dessen Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften und produktionstechnischen Faktoren auf die N-Dynamik im Boden und das Pflanzenwachstum. Aus diesem Grunde wurde ein Modell mit Ergebnissen eines Langzeitversuches (Versuchsbeginn 1974) zur Stickstoffdüngung entwickelt, das die aktuell abgelaufene Witterung des Standortes bis zum jeweiligen Düngungstermin berücksichtigt. Mit Hilfe der Mitarbeit von Landwirten, Beratungsstellen und Schlagkarteiauswertungen (seit 1982) aus dem gesamten Bundesgebiet wird das Modell derzeit getestet. Die dabei gewonnenen Ergebnisse dienen der Anpassung des Prognosemodells an andere Bodenverhältnisse und der Berücksichtigung anderer Produktionsbedingungen und Sorteneigenschaften.

Mit Kenntnis kleinräumiger Bodenunterschiede größerer, in der Regel einheitlich bewirtschafteter Flächen, bietet sich eine teilflächenspezifische Optimierung der Stickstoffdüngung aus ertraglichen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten an.

Es werden daher an ausgewählten Szenarien die Auswirkungen unterschiedlicher Witterungsbedingungen und Bodeneigenschaften auf die Ertrags- und N-Düngungsprognosen sowie die Folgen fehlerhafter Düngung dargestellt und diskutiert.

### **Computer-aided model for estimating the requirements of nitrogen and yields of cereals dependent on weather conditions, quality and kind of soils and parameters of plant production**

In crop management uncertain factors are the calculation and distribution of nitrogen fertilizers in time and space. The main reason for this uncertainty arises from weather cycle conditions and their interaction with different qualities of soil and parameters of plant production on nitrogen dynamic and growth of cereals. For this reason a model has been developed based on data of a long term experiment, set up in 1974. At different stages of growth this model is able to estimate the nitrogen requirements and yields of cereals dependent on actual and long term weather data.

The model is now being tested and calibrated (and has been since 1982) under different conditions of plant production, qualities and textures of soil with the analysis of other field trials, crop management and weather data and the aid of 250 farmers in the FRG. Recommendations for nitrogen fertilizing and the corresponding annual results of harvest are used to validate the model and - if necessary - to calibrate the model further on.

For special fields of crop production the calculation of nitrogen requirements often are calculated unique. But if there are informations about the variability of texture and quality of soil within the field, it is possible, to calculate adapted amounts of nitrogen fertilizer dependent on these factors. The proportions weather cycle conditions and their interaction with different qualities of soil can determine the nitrogen requirements, yields and the results of not adapted fertilizing are simulated and discussed.

## Literatur

- Günther-Borstel, O., 1994: Einfluß der Produktionsintensität und Jahreswitterung auf die N-Dynamik unter Winterraps, Winterweizen und Wintergerste. - Dissertation Universität Kiel.
- Finck, M., 1994: Einfluß der Wechselwirkungen zwischen Gülledüngung, mineralischer N-Düngung, Bodenbearbeitung und Fungizidbehandlung auf Wachstum, N-Aufnahme, Ertrag und N-Verwertung bei Winterweizen. - Dissertation Universität Kiel.
- Hanus, H. und P. Schoop, 1987: Response of yields and yield variability of wheat and barley to nitrogen fertilizing and fungicide treatments. - J. Agronomy & Crop Science, 159, S. 108-118.
- Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 1987: Landessorntenversuche und Versuchsergebnisse, Wulfshagen 1987.
- Schoop, P., 1987: Computergestützte Prognosemodelle zur Berücksichtigung der Witterung bei der Stickstoffdüngung im Getreidebau. - Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 69, S. 149-158.
- Schoop, P., 1988: Computergestützte Prognosemodelle zur Berücksichtigung der Witterung, standortspezifischer und produktionstechnischer Parameter bei der Stickstoffdüngung im Getreidebau. - VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongreßband 1988, Teil II, S. 53-65.
- Schoop, P. und Hanus, H., 1989a: Computergestütztes Prognosemodell zur Berücksichtigung der Witterung, sorten- und schlagspezifischer Parameter bei der Stickstoffdüngung im Getreidebau, Agrar-informatik, Informationsverarbeitung Agrarwissenschaft. - Referate der 10. GIL-Jahrestagung in Karlsruhe 1989, Band 16, S. 185-194.
- Schoop, P. und Hanus, H., 1989b: Nutzung von Computermodellen zur Steuerung des Stickstoffeinsatzes im Getreidebau unter gleichzeitiger Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Ziele. - Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 71, S. 163-172.
- Schoop, P. und Hanus, H., 1990: Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen Witterung, Standortfaktoren und Produktionstechnik für die N-Düngungsprognosen. - Tagungsbericht, Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin (1990) 289, S. 167-174.

Verfasser: Schoop, Peter, Dr., Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Lehrstuhl Allgemeiner Pflanzenbau, Sonderforschungsbereich 192, Olshausenstraße 40/60, 24118 Kiel.