

## Standortgerechte N-Düngung mit Hilfe von GPS, Elektronik und Stickstoff-Simulation

THOMAS ENGEL

Technische Universität München-Weihenstephan

### 1 Einführung

Viele Ackerflächen weisen eine sehr starke räumliche Heterogenität der Bodeneigenschaften auf. Dies ist vor allem auf die Entstehungsgeschichte zurückzuführen, kann aber auch bewirtschaftungsbedingt sein. Die meisten Ackerflächen werden von den Landwirten jedoch weitestgehend einheitlich bewirtschaftet, was sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht negativ zu bewerten ist. Da die N-Düngung am Durchschnittsertrag orientiert wird, wird einerseits Ertragspotential durch zu niedrige Düngung verschenkt, andererseits wird die Umwelt unnötig belastet, da das überschüssige Nitrat an ertragschwächeren Stellen ausgewaschen werden kann. Nach Sch n u g und H o l s t (1994) kann eine räumlich variable Bewirtschaftung daher einen wichtigen Beitrag zur Realisierung einer ökonomisch erfolgreichen und ökologisch akzeptablen Landwirtschaft der Zukunft leisten.

### 2 Prinzipielle Vorgehensweise

Voraussetzung für eine räumlich variable Düngung ist die Identifizierung und Lokalisierung homogener Teilflächen. Für alle ausgewiesenen Teilflächen muß der Düngerbedarf separat kalkuliert werden. Als Grundlagen dafür können der Vorjahresertrag, das Ertragspotential der homogenen Teilfläche oder auch der langjährige Durchschnittsertrag herangezogen werden. Die technische Umsetzung des Konzeptes mit Hilfe von Schlepperortung und Steuerung des Düngerstreuers durch die Bordelektronik hat bereits einen Reifegrad erreicht, der mit relativ geringem Aufwand den Einsatz in der teilschlagspezifischen Bewirtschaftung möglich macht (Schueller und Wang, 1994; Stafford und Ampler, 1994). Bei der Satellitenortung mittels DGPS (Differential Global Positioning System) ist die Verfügbarkeit eines Korrektursignals jedoch von entscheidender Bedeutung (Auernhammer et al., 1994a). Sobald eine flächendeckende und permanente Ausstrahlung z. B. durch Radiosender gewährleistet ist, steht einem breiten Einsatz dieses Systems in der landwirtschaftlichen Praxis nichts mehr im Wege (Graff et al., 1995). Während die techni-

sche Umsetzung weitestgehend gelöst ist, bestehen von Seiten des Pflanzenbaus und der Pflanzenernährung noch mehr oder weniger große Probleme, die in diesem Beitrag diskutiert werden sollen.

### 3 Räumlich variable P- und K-Düngung

Die Nährstoffe Phosphor und Kalium sind bei ausreichender Bodenversorgung nicht direkt ertragswirksam und die Auswaschungsgefahr ist auf den meisten Standorten relativ gering. Eine teilflächenorientierte P- und K-Düngung ist daher konzeptionell nicht schwierig, da eine Düngung des Pflanzenentzuges des Vorjahres in der Regel ausreichend ist, um das Ertragspotential des Standortes langfristig zu sichern. Eine räumlich variable P- bzw. K-Düngung beinhaltet daher folgende Schritte. Als Basis dient die Ertragskartierung mit Hilfe einer mit DGPS und Ertragssensorik ausgestatteten Erntemaschine, z. B. des Mähdeschers (Abbildung 1).

Nach Auernhammer et al. (1994b) ist die Technik dazu, zumindestens für den Bereich Mähdrusch, ausgereift und von mehreren Herstellern erhältlich. Die resultierende Datei enthält Koordinaten und die entsprechenden punktbezogenen Erträge. Im zweiten Schritt müssen diese punktbezogenen Erträge in Relation zu Fläche gesetzt werden. Dazu sind die Daten zunächst auf

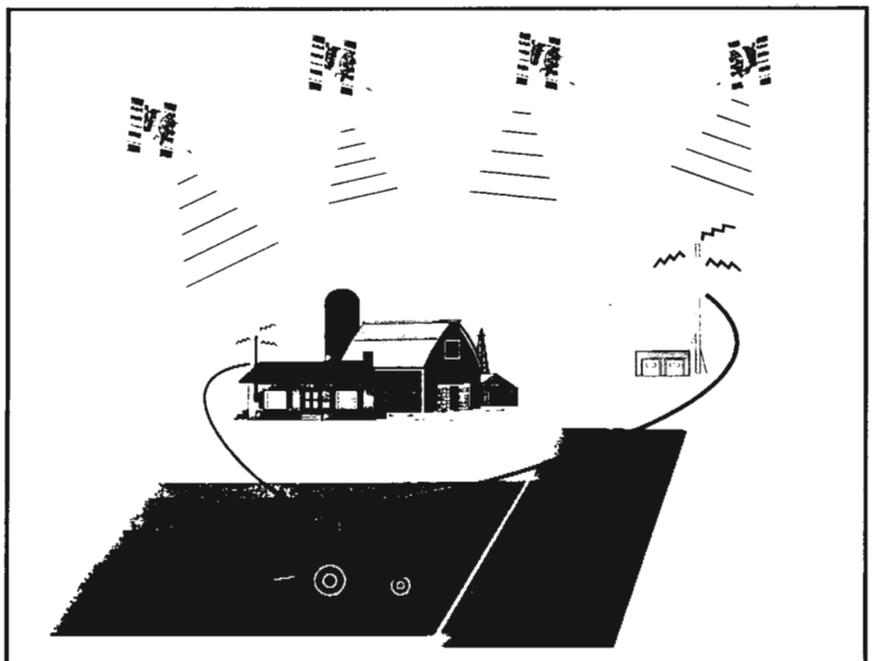


Abbildung 1: Ertragskartierung mit Hilfe von DGPS (nach Graff et al., 1995)

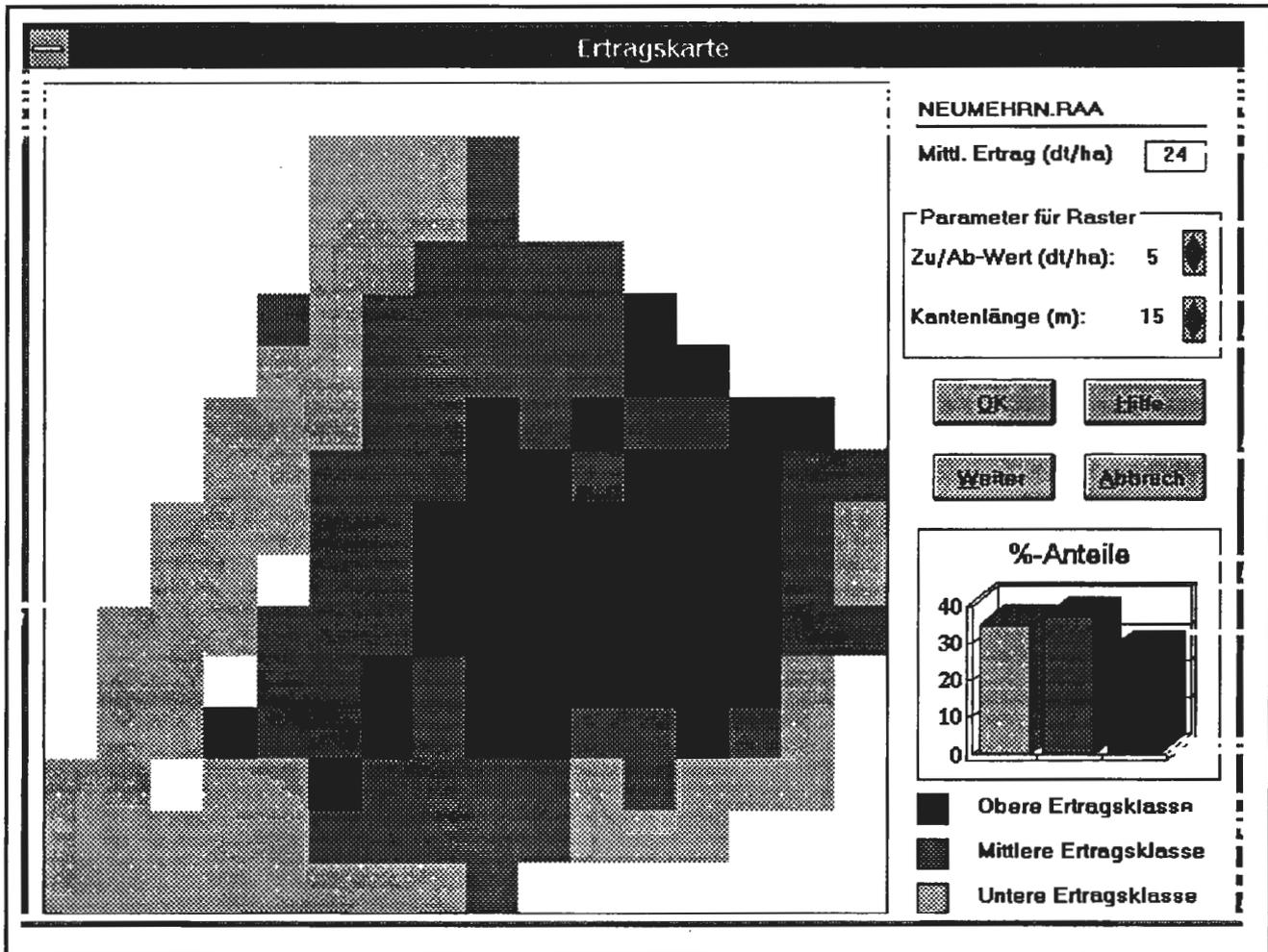


Abbildung 2: Rasterorientierte Ertragskarte

Plausibilität zu prüfen und Fehlstellen durch Interpolationsverfahren aufzufüllen. Die Erstellung der Ertragskarte kann durch rasterorientierte Bildung von Ertragsklassen oder durch Berechnung von Isoertragslinien mit Hilfe geostatistischer Verfahren (z. B. Kriging) erfolgen.

Abbildung 2 zeigt eine rasterorientierte Ertragskarte, deren Rastergröße sich an der Streubreite des Düngerstreuers, in diesem Fall 15 m, orientiert. Aus den Erträgen lassen sich die durchschnittlichen P- und K-Entzüge berechnen.

Weiterhin ist die Bodenversorgung mit P und K flächendeckend zu analysieren. Mit Hilfe eines Düngungsplanungs-Programmes, welches auch Bilanz-Überhänge des Vorjahres sowie die Bodenversorgung miteinbezieht, werden die notwendigen Düngermengen teilflächenbezogen berechnet. Den Abschluß bildet die Erstellung eines Düngungs-Auftrages für den Bordcomputer sowie die standortgerechte Ausbringung mit einem mit DGPS ausgestatteten Schlepper und einem vom Bordcomputer gesteuerten Düngerstreuer. Der Datenfluß einer solchen Vorgehensweise ist in Abbildung 3 dargestellt. Bei dieser Vorgehensweise sind üblicherweise getrennte Arbeitsgänge für die P- und K-Düngung durchzuführen, um den unterschiedlichen P- und K-Versorgungsstufen der Teilflächen gerecht zu werden.

#### 4 Räumlich variable N-Düngung

Eine räumlich differenzierte Stickstoffdüngung gestaltet sich aus zahlreichen Gründen wesentlich schwieriger. Einige dieser Probleme sowie vorhandene Lösungsansätze sollen im folgenden angesprochen werden.

##### 4.1 Besonderheiten der Stickstoff-Düngung

Im Gegensatz zu P und K ist eine einfache Nährstoffbilanzierung zur Kalkulation der N-Düngung aufgrund des komplexen N-Kreislaufes völlig unzureichend. Die alleinige Verwendung einer Ertragskarte als Berechnungsgrundlage für eine Stickstoffdüngung ist daher nicht möglich. Im Gegensatz zu Phosphat und Kali sind die verschiedenen Stickstoffformen teilweise auswaschungsgefährdet und intensiven Umsetzungsprozessen auch nach der Ernte ausgesetzt. Basis der Düngungsempfehlung muß der Zielertrag des Standortes sein, der wiederum sehr stark vom Wasserhaushalt, der phytosanitären Situation sowie der Jahreswitterung beeinflusst wird. Die Festlegung einer teilschlagspezifischen Stickstoffdüngung ist ein sehr komplexes Feld, das in verschiedenen Forschergruppen bearbeitet wird (Basten und Lamp, 1994; Graff et al., 1995). Der Verwendung von Simulationsmodellen

zur N-Dynamik wird dabei eine bedeutende Rolle zugewiesen, um auf diesem Sektor Fortschritte zu erzielen.

#### 4.2 Eignung von Simulationsmodellen zur N-Dynamik

Die Einbindung von Stickstoffsimulationsmodellen in eine rechnergestützte, teilschlagspezifische Pflanzenproduktion ist eine große Herausforderung für die Wissenschaft. Ziel ist eine optimale N-Düngerbedarfsprognose zur mengen-, zeit- und ortsgerechten Anpassung pflanzenbaulicher Maßnahmen. N-Simulationsmodelle sind aufgrund ihrer adäquat hohen zeitlichen Auflösung wichtige und zwingend notwendige Hilfsmittel für Düngerbedarfsprognosen während der Vegetationszeit, um die ausgeprägte N-Dynamik zu berücksichtigen. Simulationsmodelle setzen homogene Standortbedingungen voraus und simulieren meist nur vertikale Stoffströme. Die Identifizierung und Lokalisierung homogener Teilflächen sind daher Voraussetzung für den Einsatz. Die Simulation des Pflanzenwachstums und der N-Dynamik auf allen homogenen Teilflächen bildet die Grundlage für die Kalkulation des Düngerbedarfs aus der Differenz von prognostiziertem N-Bedarf und N-Nachlieferung des Standortes.

Streng genommen handelt es sich bei den Simulationsergebnissen um Informationen, die sich immer nur auf einen Punkt beziehen. Die Simulation gibt damit Ergebnisse für verschiedene Punkte (abhängig von den eingegebenen Werten) innerhalb eines Schlags aus. Die teilschlagspezifische Bewirtschaftung ist aber auf Flächen (Teilschläge) ausgerichtet. Um die Ergebnisse der Simulation auf die Fläche zu übertragen, müssen die einzelnen Meßpunkte repräsentativ für homogene Teilschläge sein, die die gleichen Grundbedingungen bei der Simulation erfüllen. Neben noch vorhandenen Schwächen bei den Simulationsmodellen, die noch anzusprechen sind, bereitet die Bestimmung und Bereitstellung homogener Teilschläge besondere Probleme.

#### 4.3 Abgrenzung und Identifizierung homogener Teilflächen

Zur Identifizierung und Lokalisierung homogener Teilflächen bieten sich verschiedene Verfahren an.

Die Ertragskartierung mit Hilfe von DGPS und Ertragsensorik auf unterschiedlichen Erntemaschinen ist zur Lokalisierung homogener Teilflächen nur bedingt geeignet. Nach Werner (1995) findet man unterschiedliche Ertragsverteilungen je nach Jahr und Fruchtart. Es ist daher nicht möglich, durch Kartierung des Ertrags der einen Fruchtart auf das Ertragsverhalten der nächsten Fruchtart zu schließen. Es ergaben sich im Rahmen dieser Untersuchungen keine nennenswerten Beziehungen zwischen

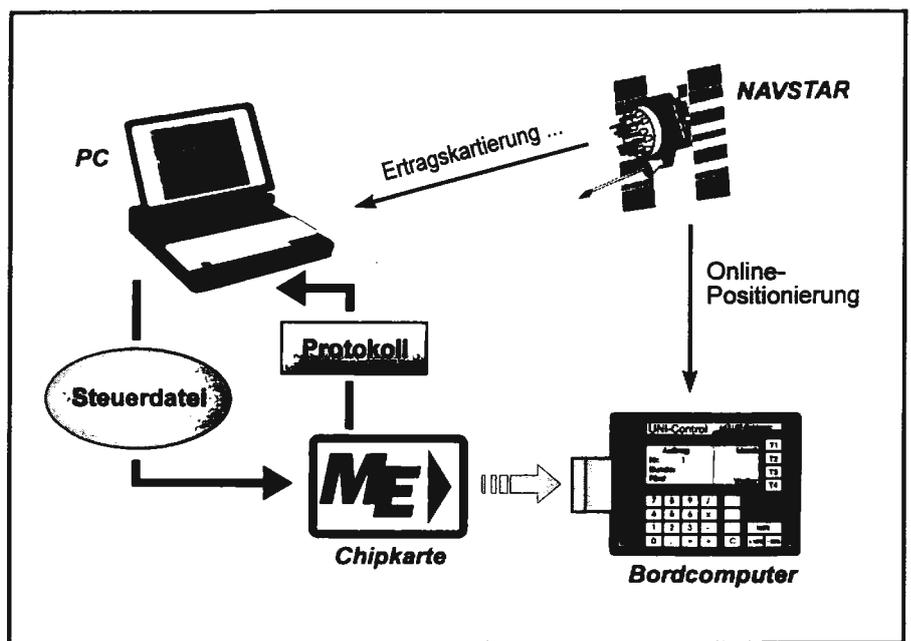


Abbildung 3: Datenfluß für eine räumlich variable P- und K-Düngung (nach Graff et al., 1995)

Ertrag und einzelnen chemischen bzw. physikalischen Bodeneigenschaften.

Zusätzliche Informationen lassen sich durch die Auswertung von Satellitenaufnahmen ableiten. Durch Spektralanalyse des reflektierten Lichtes ergibt sich eine gute Eignung zur Diagnose von Biomasseunterschieden. Aufgrund von Wetter- und Lichtabhängigkeit (Aufnahme am Tag und bei wolkenlosem Himmel), einer relativ geringen Auflösung (20 x 20m bei Spot) sowie einer eingeschränkten Verfügbarkeit kommt ein großflächiger Einsatz solcher Verfahren derzeit nicht in Frage.

Luftbilder (Schwarz/Weiß- oder Infrarot-Aufnahmen) haben eine hohe Auflösung (weniger als 1m) und sind vor allem auf unbewachsenen Flächen gut zur Abgrenzung von Teilflächen geeignet. Nach Amon (1995) eignen sich Luftbilder sehr gut zur Diagnose des Skelettanteils. Bei Wahl des richtigen Überfliegszeitpunktes ist eine gute Differenzierung der Wasserspeicherkapazität des Oberbodens möglich.

Radiospektrometer sind sehr gut zur Diagnose von Boden- bzw. Bestandesunterschieden wie Wuchshöhe, Bestandesdichte und Blattflächenindex geeignet. Untersuchungen von Schneider (1995) zeigen eine enge Beziehung zwischen Reflexionssignatur und diesen Bestandesmerkmalen. Amon und Schneider (1993) konstatieren daher dem Radiospektrometer eine hervorragende Eignung als potentieller Sensor für die Stickstoffdüngung.

Die Bodenbeprobung wird als Grundlage für die Kartierung homogener Teilflächen trotz der mittelfristigen Konstanz der meisten Kenngrößen sehr kritisch betrachtet. Einerseits treten sehr hohe Kartierungskosten auf, andererseits ist die Anzahl der zu erhebenden Parameter sowie die Größe des Beprobungsrasters sehr umstritten.

Lamp und Gottfriedt (1994) beziffern die Kosten für die Erstellung einer digitalen Hof-Bodenkarte für einen 100 ha-Betrieb mit ca. 3500 - 4000 DM. Dabei werden die Kosten für die

Digitalisierung sowie für ca. 80 Bodenuntersuchungen zugrundegelegt. Dies beinhaltet jedoch lediglich eine Grundinventur, d. h. Analyseergebnisse hinsichtlich des pH-Wertes und verfügbarer Nährstoffe. Die Fülle von Daten, die für N-Simulationsmodelle benötigt werden wie z. B. Gehalt an organischer Substanz oder an organisch gebundenem Stickstoff, würde beträchtlich höhere Kosten verursachen. Murphy et al. (1995) schätzen, daß ca. 1 bis 4 Mischproben/ha zu ziehen sind, um eine ausreichend genaue Abschätzung der Verteilung der unterschiedlichen Bodenparameter zu ermöglichen. Die Autoren folgern daraus, daß die Kosten konventioneller Bodenanalysen die Einführung der Kartierungstechnologie in die Praxis verhindern werden.

Die Charakterisierung von Teilschlägen durch Merkmale aus Bodenbeprobungen und Pflanzenbonituren ist das Ziel von Amorn (1995). Dabei werden die Ergebnisse der Untersuchungen (Steingehalt, Textur, organische Substanz u. a.) einzelner Parzellen der Bodenfruchtbarkeit auf diesen Flächen gegenübergestellt. Die Bodenfruchtbarkeit ist dabei eine Größe, die nach der Erfahrung des Landwirts in 2 (hoch und niedrig) oder 3 (hoch, mittel und niedrig) Kategorien eingeteilt ist. Die Ergebnisse zeigen, daß die Abgrenzung einzelner Teilflächen mit einzelnen Merkmalen sehr unsicher ist. Erst die statistische Auswertung (Diskriminanzanalyse) mehrerer Merkmale erlaubt einen Rückschluß auf die Bodenfruchtbarkeit.

Murphy et al. (1995) fordern den Einsatz von Schnellmethoden sowie die Nutzung von vorhandenen Korrelationen zwischen einzelnen Parametern, um die Kosten für die Analytik so gering wie möglich zu halten.

Ein eleganter Weg zur Ermittlung homogener Flächen ist die Überlagerung von vorhandenem Kartenmaterial mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Im Gegensatz zu anderen Ländern (z. B. USA) liegen in der Bundesrepublik keine flächendeckenden Karten über die wichtigsten Bodeneigenschaften vor, so daß dieses Hilfsmittel weitestgehend ausscheidet.

Die bisherigen Ausführungen zeigen, daß derzeit kein Standardrezept zur Abgrenzung homogener Flächen existiert. Es kann daher keine eindeutige Empfehlung zur richtigen Vorgehensweise ausgesprochen werden, vielmehr müssen die im Einzelfall verfügbaren Hilfsmittel ausgenutzt und so gut als möglich kombiniert werden. So könnte beispielsweise zunächst eine Grobklassifikation mit Hilfe der Fernerkundung (Satellitenaufnahme oder Luftbild) durchgeführt werden. Diese könnte dann in Problemzonen durch die Bodenuntersuchung ergänzt bzw. durch die Ertragskartierung verfeinert werden.

#### 4.4 Simulation des N-Bedarfs

Sobald eine Einteilung in homogene Teilschläge erfolgt ist, kann die Stickstoffsimulation Entscheidungsgrundlagen für eine teilschlagspezifische Stickstoffdüngung liefern. Dazu muß die Simulation für alle homogenen Teilschläge durchgeführt werden. Die Prognose des Pflanzenwachstums steht dabei im Vordergrund. Das Pflanzenwachstum kann jedoch nur dann korrekt simuliert werden, wenn auch Wasser- und Stickstoffhaushalt richtig abgebildet werden. Die Simulation wird bis zum aktuellen Termin mit dem tatsächlich bis zu diesem Termin aufgetretenen Wetter durchgeführt, bis zum potentiellen Düngungstermin muß dann mit pro-

gnostiziertem Wetter weitergerechnet werden. Dazu kann eine aktuelle Wetterprognose, langjähriges Durchschnittswetter oder mit Hilfe eines Wettergenerators erzeugtes Wetter Verwendung finden. Die Kalkulation der N-Düngung setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Die Festlegung des nächsten Düngetermins erfolgt in Abhängigkeit vom simulierten Wachstumsstadium der Pflanze, wobei Stadien mit erhöhtem N-Bedarf wie z. B. das Terminal-Spikelet-Stadium bevorzugt werden. Die Berechnung der Düngermenge ergibt sich aus dem simulierten N-Defizit zwischen N-Bedarf der Pflanze und N-Angebot des Bodens.

#### 4.5 Probleme der N-Simulation

Das Leistungspotential und die Notwendigkeit von Simulationsmodellen sind in der Wissenschaft mittlerweile anerkannt und unbestritten. Deshalb wird international zur Zeit in mehreren Arbeitsgruppen an der Entwicklung von Simulationsmodellen zur Stickstoffdynamik gearbeitet. Ein breiter Einsatz solcher Modelle in der Düngeberatung scheiterte bislang aus folgenden Gründen:

- Voraussetzung für die Simulation ist eine große Anzahl von Eingabedaten. Neben umfangreichen Informationen zur Bewirtschaftung des Schlags und täglichen Wetterdaten ist eine genaue Beschreibung des Bodenprofils erforderlich (Skelettanteil, Textur, Permanenter Welkepunkt, Feldkapazität, Gesamtporenvolumen, Organische Substanz, Gesamt-N, Reflexionseigenschaften, Wasser- und Stickstoffgehalte zu Simulationsbeginn etc.). Diese Daten stehen für die breite Masse der landwirtschaftlichen Schläge nicht zur Verfügung und können nur mit einem arbeitswirtschaftlich oder finanziell unzumutbar erscheinenden Aufwand bestimmt werden.
- Ein wichtiger Bestandteil von Modellen zur N-Dynamik sind Wachstumsmodelle. Die vorhandenen Modelle decken jedoch nicht das ganze Spektrum von wichtigen Fruchtarten ab. Während für Getreide zahlreiche Modelle und Modellansätze vorliegen, ist an der Modellierung des Wachstums von Raps, Leguminosen oder Hackfrüchten bisher kaum gearbeitet worden.
- Simulationsmodelle sind meist für bestimmte Naturräume entwickelt und validiert. Sie gelten daher oft nur für ganz bestimmte Bodenarten und Standorttypen.
- Die Modelle sind aufgrund des Fehlens von brauchbaren, jedem Entwickler zugänglichen Datensätzen meist unzureichend validiert.
- Modelle liefern vielfach reine Simulationsergebnisse, aber keine konkreten Düngungsempfehlungen.

#### 4.6 Das Modellbaukastensystem "Expert-N"

Um die im vorigen Kapitel genannten Probleme zu verringern bzw. zu beseitigen, wurde das Forschungsvorhaben "Expert-N" initiiert (Engel, 1995). Das Ziel dieses Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines baukastenartig aufgebauten Modellsystems, das einerseits eine Grundlage zur Integration und zum Vergleich von Modellen und Modellansätzen bildet und andererseits selbst ein äußerst flexibles, modular aufgebautes Stickstoffsimulationsmodell darstellt. Expert-N stellt in seiner jet-

zigen Ausbaustufe das Kernsystem eines Modellbaukastens dar. Dieser Baukasten kann z. Z. für die Simulation der Wasser-, Wärme- und Stickstoffdynamik im Boden und in der Pflanze genutzt werden.

Eines der Ziele bei der Entwicklung des Modellbaukastens war eine einfache Programmbedienung durch Nutzer aus den unterschiedlichsten Fachbereichen. Außerdem war die breite Einsatzfähigkeit des Modellbaukastens auf verschiedenen Rechnersystemen sicherzustellen. Die Modellalgorithmen zur Beschreibung der einzelnen Prozesse innerhalb eines Agrarökosystems wurden deshalb streng nach dem ANSI-C-Standard programmiert. Nur die Benutzeroberfläche des Baukastens muß dazu angepaßt werden. Die einfache Bedienung des Modellbaukastens wird durch eine graphische Windows-Oberfläche unterstützt.

Expert-N wird in drei auf die entsprechenden Nutzer zugeschnittenen Varianten ausgeliefert:

- Der Modellentwickler hat Zugriff auf alle Möglichkeiten des Simulationsmoduls d. h. er kann beispielsweise eigene Modellansätze integrieren und so den Baukasten stufenweise erweitern.
- Eine weitere Variante bietet dem Wissenschaftler die Möglichkeit, eigene Modelle mit vorhandenen Bausteinen zu konfigurieren. Durch Vergleich mit Meßwerten ist es somit möglich, die für den jeweiligen Standort geeignetsten Modellansätze bzw. die geeignetste Modellkonfiguration zu ermitteln.
- Die letzte Variante stellt dem reinen Modellanwender beispielsweise dem Berater oder interessierten Landwirt ausschließlich fertig konfigurierte Modelle zur Verfügung, die ausreichend getestet und validiert sind.

Durch diese Vorgehensweise sollen der jeweilige Nutzer optimal unterstützt und Bedienungsfehler so weit wie möglich unterbunden werden.

Expert-N besteht aus den drei Programmen Datenerfassung, ASCII-Schnittstelle und Simulation. Zur Verwaltung des umfangreichen Datenmaterials wird eine Btrieve Datenbank verwendet. Die relationale Struktur dieser Datenbank basiert auf der Struktur der Bayerischen Schlagkartei der Bayerischen Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur und wurde um die nicht in der Schlagkartei vorhandenen Daten erweitert. Vorteil dieser Vorgehensweise ist neben der Vermeidung von Datenredundanz die zentrale Pflege der Schlüsseliste. Alle notwendigen Codes, wie z. B. zur Verschlüsselung von Mineräldüngern, werden zentral gewartet und erweitert. Oftmals ist ein großer Teil der notwendigen Input-Daten, wie z. B. bestimmte Bodeneigenschaften, vielen Nutzern nicht bekannt bzw. nicht zugänglich. Das Erfassungsmodul von Expert-N enthält daher Algorithmen, mit denen der Nutzer nicht vorhandene Daten aus einfacheren Kenngrößen schätzen kann. Viele Modelle zur Simulation des Wasserflusses benötigen als Eingabegrößen z. B. das Gesamtporenvolumen oder den Wassergehalt bei Feldkapazität und permanentem Welkepunkt. Hat der Benutzer diese Werte nicht vorliegen, so werden sie vom Erfassungsprogramm aus Bodenart und Lagerungsdichte geschätzt. Modelle, deren Wassertransport durch die Richards-Gleichung beschrieben werden,

erfordern noch wesentlich komplexere Eingabegrößen. Auch diese lassen sich vom Eingabeprogramm mit Hilfe von Pedotransferfunktionen schätzen.

Zwei ASCII-Dateien (Schlagdaten und Wetterdaten) fungieren als Schnittstelle zwischen der Datenbank und dem Simulationsmodul. Deshalb können unproblematisch Daten aus anderen Datenspeichern in Form dieser Dateien gespeichert und für die Simulation mit Expert-N genutzt werden. Die Abkopplung der Datenbank von der Simulation durch das Zwischenschalten von ASCII-Dateien hat weitere Vorteile. Einerseits können alle Input-Daten mit Hilfe eines Editors sehr schnell eingesehen und verändert werden. Andererseits können bei einer Erweiterung des Modellbaukastens zusätzlich notwendige Input-Variablen zunächst für Testzwecke an das Ende der ASCII-Datei angefügt werden, ohne daß Änderungen in der Datenbank vorgenommen werden müssen. Dies ermöglicht eine voneinander unabhängige Weiterentwicklung von Datenerfassung und Modellbaukasten, da lediglich der Zugriff auf die ASCII-Dateien aufeinander abgestimmt werden muß.

Die Simulation der Stickstoff-, Wasser- und Wärmedynamik sowie des Pflanzenwachstums erfolgt in Abhängigkeit von der gewählten Modellkonfiguration. Der Nutzer kann über eine komfortable Oberfläche auswählen, welche Prozesse er simulieren möchte, und welche Algorithmen er dazu benutzen will. Diese Auswahl erfolgt unter dem Menüpunkt 'Konfiguration' für die Zeitsteuerung sowie für die Bereiche Stickstoff, Wasser, Wärme und Pflanze (Abbildung 4).

Jedem Prozeß innerhalb der einzelnen Bereiche ist eine Funktionsgruppe zugeordnet, die Modellansätze zur Beschreibung des Prozesses enthält. Expert-N enthält derzeit Modellansätze aus den Modellen LEACHN, N-SIM sowie aus den Wachstumsmodellen CERES-Wheat, CERES-Barley und CERES-Maize. Daneben wurden unterschiedliche hydraulische Funktionen und mathematische Algorithmen zur Lösung der partiellen Differentialgleichung implementiert. Es besteht außerdem die Möglichkeit, eigene Funktionen als "Dynamic-Link-Libraries" unter Windows einzubinden und somit die Funktionsbibliothek von Expert-N zu erweitern.

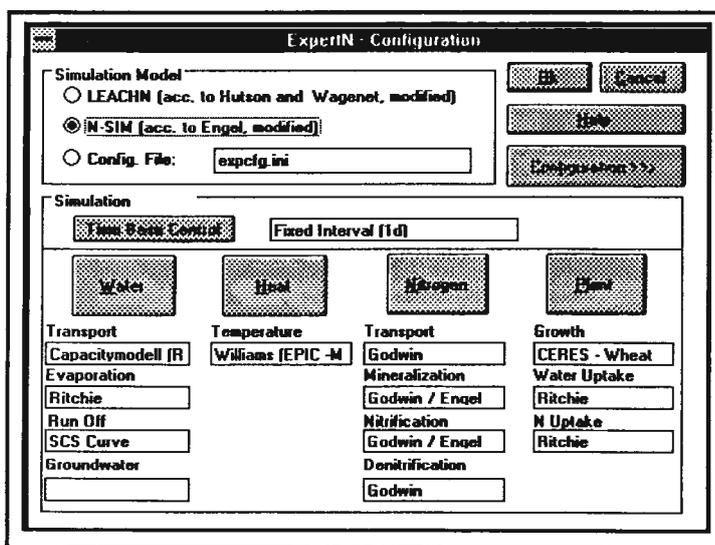


Abbildung 4: Konfigurationsfenster in Expert-N

#### 4.7 Notwendige Weiterentwicklungen

Die existierenden Simulationsmodelle können bereits einen wichtigen Beitrag zu einer verbesserten Düngeberatung liefern. Für einen flächendeckenden Einsatz von Simulationsmodellen sind allerdings noch zahlreiche Weiterentwicklungen notwendig. Die zur Zeit in der Entwicklung befindlichen Baukastensysteme müssen weiter ausgebaut werden. Dazu bedarf es zunächst der Entwicklung von Wachstumsmodellen für alle wichtigen Fruchtarten. Eine Standardisierung der Datenformate, wie beispielsweise von Jones et al. (1994) vorgeschlagen, würde den Datenaustausch zwischen Modellierern und somit die Modellentwicklung wesentlich forcieren.

Für eine flächendeckende Betrachtung ist die Kopplung von Simulationsmodellen und Geographischen Informationssystemen von großer Bedeutung. Es bestehen bereits zahlreiche Ansätze (Conrad et al., 1995; Engel et al., 1995; Franko und Schenk, 1995), die jedoch zielgerichtet weiterentwickelt werden müssen. Probleme beim Übergang in die Fläche bestehen vor allem im Hinblick auf die Wahl eines geeigneten Modellansatzes, da die meisten Ansätze zunächst für punktuelle Betrachtungsweisen entwickelt wurden. Nach Addiscott (1995) gilt es das geeignetste mechanistische Modell zu suchen, welches für den entsprechenden Zweck und die entsprechende Skalierung validiert wurde. Das resultierende Modell dürfte bei größeren Skalierungen seiner Meinung nach eher ein funktionales als ein mechanistisches Modell sein. Außerdem müssen laterale Stoffflüsse zwischen homogenen Flächen berücksichtigt werden, da beispielsweise der oberflächliche Wasserabfluß einer Fläche am Hang als Zufluß zur Fläche am Hangfuß berücksichtigt werden muß.

#### 4.8 Nutzung von Bodenkarten

Der Einsatz der Simulationsmodelle wird sicherlich zunehmen und auch Eingang in die landwirtschaftliche Praxis und die Düngeberatung finden.

Um aber bereits vorher eine praxistaugliche Möglichkeit für eine teilschlagspezifische Stickstoffdüngung einsetzen zu können, entwickelten Graff et al. (1995) ein Teilschlagprogramm, welches die Möglichkeit bietet, gescannte Flurkarten mit Angaben zu Daten der Reichsbodenschätzung als Grundlage zu verwenden. Dabei liegt die Überlegung zugrunde, daß Teilflächen mit höherer Ackerzahl auch ein höheres Ertragspotential aufweisen. Wird nun der Stickstoff bei der Düngung so auf dem Schlag verteilt, daß "bessere" Teilstücke mehr und "schlechtere" Teilstücke weniger Stickstoff erhalten, erfolgt eine bessere Ausnutzung des Stickstoffdüngers. Dies kann jedoch nur ein erster Ansatz sein, der durch die Integration von Verfahren zur Schätzung homogener Teilflächen und durch die Kopplung von Simulationsmodellen zielgerichtet weiter ausgebaut werden muß.

### 5 Ökonomische Bewertung

Die ökonomischen Auswirkungen einer räumlich variablen Stickstoffdüngung sind sehr schwierig zu kalkulieren. Die vorliegenden Forschungsergebnisse sind sehr uneinheitlich. In vielen Fällen kommt es lediglich zu einer Umverteilung der Kosten, da zwar Betriebsmittel eingespart werden können, statt dessen jedoch in Technik investiert werden muß. Nach Ebel (1995) profitiert der Landwirt am meisten von einer räumlich variablen N-Düngung, der bislang am weitesten vom Produktionsoptimum entfernt war. Unter Berücksichtigung der positiven ökologischen Auswirkungen und der gesamtwirtschaftlichen Folgen, deren monetäre Bewertung äußerst schwierig ist, dürfte die räumlich variable N-Düngung jedoch durchweg positiv zu bewerten sein.

#### Zusammenfassung

Eine räumlich variable Stickstoffdüngung ist eine wichtige Grundlage für eine ökologisch und ökonomisch ausgewogene Landwirtschaft. Die dazu notwendige Technik beinhaltet die Nutzung von DGPS in Kombination mit Ertragssensorik an Erntemaschinen und Bordelektronik an Schlepper und Düngerstreuer und ist heute weitgehend praxisreif. Im Hinblick auf die pflanzenbauliche Umsetzung bestehen jedoch noch zahlreiche offene Fragen. Voraussetzung für eine räumlich variable N-Düngung ist die Identifizierung und Lokalisierung homogener Flächeneinheiten. Für jede Flächeneinheit kann dann der Düngerbedarf mit Hilfe von Simulationsmodellen zum Pflanzenwachstum und zur N-Dynamik getrennt kalkuliert werden. Dieser Artikel gibt einen Überblick über Probleme und Lösungsansätze bei der Identifizierung homogener Flächeneinheiten. Weiterhin werden Probleme beim praktischen Einsatz von Stickstoffs simulationsmodellen angesprochen. Die sich daraus ergebenden aktuellen und zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Stickstoffs simulation werden diskutiert.

#### Site-specific nitrogen fertilization using GPS, electronics and nitrogen simulation models

A site-specific nitrogen fertilization is necessary from an economical and an ecological point of view. The necessary technical equipment includes the use of DGPS, yield sensors on harvesters and electronics on tractor and fertilizer spreader and is well tested for practical operation. But there are many open questions concerning the correct way to calculate the fertilizer amounts. The first step is to identify and localize homogeneous areas. The fertilizer amount for each area can be estimated using simulation models for crop growth and nitrogen dynamics. This paper gives an overview about problems and solving strategies for the identification of homogeneous areas. Because of the existing problems of the practical use of nitrogen simulation models the resulting strategies for the actual and further development of the simulation models are discussed.

## Literatur

- Addiscott, T. M., 1995: Modelling the fate of crop nutrients in the environment: problems of scale and complexity. - *Eur. J. Agron.* 4 (4), S. 413-417.
- Amon, H., 1995: Abgrenzung und Bewirtschaftung von Teilschlägen mit Hilfe von Fernerkundung und Elektronik. - Dissertation, Technische Universität München-Weihenstephan, 1995.
- Amon, H., und T. Schneider, 1993: Anwendung spektraler Signaturen von Pflanzenbeständen für die Produktionstechnik im Pflanzenbau. - *Zeitschrift für Agrar-informatik*, Heft 3, S. 54-60.
- Auernhammer, H., T. Muhr & M. Demmel, 1994a: Vierjährige Einsatzerfahrungen mit GPS und DGPS. - *Z PflKrankh. PflSchutz, Sonderheft XIV*, S. 133-142.
- Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier, K. Wild, 1994b: GPS for yield mapping on combines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 11 (1994), S. 53-68.
- Basten, M. & J. Lamp, 1994: Eignung von Stickstoff-Simulationsmodellen für die rechnergestützte Pflanzenproduktion (CAF). - In: *Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL-Arbeitspapier Nr. 175*, S. 155-161.
- Conrad, R., B. Dieckkrüger & O. Richter, 1995: Koppung von Umweltsimulationsmodellen mit einem Geo-Informationssystem. - In: *Referate der 16. GIL - Jahrestagung in Kiel 1994, Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft*, Band 7, Hrsg.: C. Noell & J. M. Pohlmann, S. 46-51.
- Ebel, M. W., 1995: Ökonomische Bewertung einer GPS-gestützten teilschlagbezogenen Bewirtschaftung. - In: *Technik für die kleinräumige Bestandesführung, KTBL-Arbeitspapier Nr. 214*, S. 83-89.
- Engel, T., 1995: Expert-N - Ein Baukastensystem für Stickstoffmodelle als Hilfsmittel für Beratung, Forschung, Wasserwirtschaft und politische Entscheidungsträger. - *Abschlußbericht zu einem Forschungsvorhaben des BMBF*.
- Engel, Th., J.W. Jones & G. Hoogenboom, 1995: AEGIS/WIN - A Windows Interface Combining GIS and Crop Simulation Models. - Paper No. 953244 of the Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems (ASAE), pp. 12.
- Franko, U. und S. Schenk, 1995: Gebietsbezogene Modellierung der Humusakkumulation in Abhängigkeit von Standort und Bewirtschaftung. - In: *Referate der 16. GIL - Jahrestagung in Kiel 1995, Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft*, Band 7, Hrsg.: C. Noell & J. M. Pohlmann, S. 84-91.
- Graff, M., T. Engel und L. Reiner, 1995: Umweltverträgliche Pflanzenproduktion durch überbetriebliche Nutzung rechnergestützter Planungs- und Arbeitsverfahren. - *Abschlußbericht der TU München-Weihenstephan zu einem vom BML geförderten FuE-Vorhaben an der Lehrereinheit für Ackerbau und Informatik im Pflanzenbau*.
- Jones, J. W., L. A. Hunt, G. Hoogenboom, D. C. Godwin, U. Singh, G. Y. Tsuji, N. B. Pickering, P. K. Thornton, W. T. Bowen, K. J. Boote, J. T. Ritchie, and S. Balas, 1994: Input and Output Files. - In: *DSSAT version 3. G. Y. Tsuji, G. Uehara, and S. Balas (Eds). IBSNAT, University of Hawaii, Honolulu/Hawaii*, S. 1-94.
- Lamp, J. und K. Gottfriedt, 1994: Effiziente Erstellung digitaler Hof-Bodenkarten als Grundlage der rechnergestützten Pflanzenproduktion (CAF). - In: *Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL-Arbeitspapier Nr. 175*, S. 138-145.
- Murphy, D., H. Oestergaard und E. Schnug, 1995: Lokales Ressourcen Management - Ergebnisse und Ausblick. - In: *Technik für die kleinräumige Bestandesführung, KTBL-Arbeitspapier Nr. 214*, S. 90-101.
- Schneider, T., 1994: Möglichkeiten und Grenzen der spektralen Trennbarkeit ackerbaulicher Oberflächentypen - eine Abschätzung anhand spektroskopischer Untersuchungen über die Vegetationsperiode. - *Informationsmanagement in den Agrarwissenschaften*, Band 4, Hrsg.: Mangstl, A. & J. M. Pohlmann.
- Schnug, E. und P. Holst, 1994: CAF - Realisierung einer ökologischen und ökonomischen Landwirtschaft. - In: *Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL-Arbeitspapier Nr. 175*, S. 175-178.
- Schueller, K. J. und M. W. Wang, 1994: Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. - *Computers and Electronics in Agriculture* 11, S. 69-83.
- Stafford, J. V. und B. Ambler, 1994: In-field location using GPS for spatially variable field operations. - *Computers and Electronics in Agriculture*, 11, S. 23-36.
- Werner, A., 1995: Ziele und Möglichkeiten der kleinräumigen Bestandesführung. - In: *Technik für die kleinräumige Bestandesführung, KTBL-Arbeitspapier Nr. 214*, S. 7-26.
- Verfasser: Engel, Thomas, Dr., Institut für Ackerbau und Informatik im Pflanzenbau der Technischen Universität München, Lange Point 51, 85350 Freising-Weihenstephan.