

Modellierung der N-Dynamik zur Stickstoffdüngungsoptimierung auf heterogenen Standorten - Voraussetzungen für den operationellen Einsatz in der Praxis -

KURT CHRISTIAN KERSEBAUM

Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e. V. (ZALF), Müncheberg

Einleitung

Vor dem Hintergrund sinkender Erzeugerpreise und steigender Umweltauflagen für Landwirte ist ein möglichst effizienter Einsatz von Produktionsmitteln dringend erforderlich. Dies trifft insbesondere auf die Stickstoffdüngung von Kulturpflanzen zu, die in der Vergangenheit seitens der Wasserwirtschaft zunehmend kritisiert worden ist. Dabei bedeutet effizienter Einsatz in erster Linie eine dem Bedarf der Kulturpflanze angepaßte N-Versorgung unter Berücksichtigung des standortspezifischen N-Angebots. Im Detail verbergen sich hinter dieser so einfach scheinenden Forderung jedoch eine Reihe von Unsicherheiten sowohl hinsichtlich der Bedarfs- als auch der Angebotsbestimmung. Beide sind nämlich das Resultat einer Vielzahl verschiedener zum Teil miteinander wechselwirkender raumzeitlich variabler Prozesse. Verschiedene Eigenschaften eines Standorts beeinflussen diese Dynamik nicht nur zwischen sondern auch innerhalb von Schlägen. Oftmals sind diese Unterschiede innerhalb von Schlägen rein visuell z. B. an der Boden- oder Bestandsfärbung auf Luftaufnahmen erkennbar.

In der praktischen Bewirtschaftung derartiger Flächen versucht der Landwirt, auf die wesentlichen Heterogenitätsausprägungen zu reagieren. Er kann dies allerdings nur bei den Mustern, die sich in der Zeit nicht oder nur wenig verändern und die flächenmäßig größere zusammenhängende Bereiche ergeben.

Technische Unterstützung erfährt der Landwirt in den letzten Jahren durch die zivile Nutzung von Ortungssystemen, die sowohl der räumlichen Zuordnung von Messgrößen, aber auch zur ortabhängigen Steuerung von Landmaschinen dienen können. Durch den Einsatz dieser Technik wäre es möglich, die Heterogenität bei der Bemessung der Stickstoffdüngung zu berücksichtigen. Durch eine den jeweiligen Standorteigenschaften angepaßte Düngung könnte gegenüber einer schlageinheitlich applizierten Gabe eine Über bzw. Unterversorgung auf Teilflächen mit geringerem bzw. höherem Ertragspotential vermieden werden. Im folgenden soll darauf eingegangen werden, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um eine gezielte Stickstoffdüngung zu realisieren.

Heterogenität von Ackerflächen

Räumliche Variabilität tritt vor allem an Standorten mit einer ehemals hoben Umlagerungsdynamik auf. Dies trifft vor allem auf die glazial geprägten Landschaften zu, aber zum Teil auch auf Auenbereiche und Bereiche mit hoher Reliefenergie. Untersuchungen von Dahiya et al. (1984, 1985) und Springob et al. (1985) zeigen jedoch, daß hinsichtlich der N-

Dynamik auch auf den scheinbar homogenen und flachen Standorten der niedersächsischen Bördelandschaften mit einer erheblichen Variabilität gerechnet werden muß (Abbildung 1).

Die Ursache derartiger Variabilität sind vielfältig. Neben der bodensubstratbedingten Heterogenität von Bodenmerkmalen und Pflanzenbeständen können auch solche auftreten, die durch die Anbautechnik, die historische Landnutzung oder durch die Wirkung angrenzender Ökosysteme (z. B. Beschattung durch Wald) verursacht werden bzw. Positionseffekte darstellen. Im gezeigten Beispiel sind die sehr hohen N_{\min} -Gehalte im Bereich links unten vermutlich auf ein vor über 30 Jahren umgebrochenes Grünlandstück zurückzuführen.

Die Verteilungsmuster beim Mineralstickstoff sind aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik jedoch starken Änderungen unterworfen, obwohl die Prozesse der N-Dynamik entscheidend von der Textur und dem Gehalt an umsetzbarer organischer Substanz beeinflusst werden, die ihrerseits ein langfristig stabiles Verteilungsmuster aufweisen. Im jahreszeitlichen Zyklus wechselt jedoch die Dominanz der verschiedenen Prozesse. Während in den frühen Herbstmonaten die Umsetzungsprozesse Mineralisation/Immobilisation die N-Dynamik prägen, bestimmt über die Wintermonate in erster Linie das Wasserspeichervermögen der Böden die vertikale Bewegung und den Austrag von Nitrat aus der Wurzelzone. Durch die Abhängigkeit von der Witterung ergeben sich in jedem Jahr unterschiedliche Relationen der Prozesse zueinander und folglich auch immer veränderte Verteilungsmuster.

Augenfällig ist die Heterogenität vor allem beim Pflanzenbestand. Mit Hilfe entsprechend ausgerüsteter Erntemaschinen lassen sich heute ohne größeren manuellen Aufwand Ertragskartierungen von Flächen durchführen. Auch hier können die beobachteten Muster von Jahr zu Jahr variieren. So zeigen beispielsweise von Werner (1994) ermittelte Ertragskarten eines Schrages von drei aufeinanderfolgenden Jahren nur geringe Ähnlichkeit untereinander. Die Heterogenität des Bodensubstrates führt offenbar nicht immer zum gleichen Verteilungsmuster. Vielmehr variieren die Relationen einzelner Bodenprozesse zueinander sowie die Reaktion des Pflanzenbestandes darauf in Abhängigkeit von der Jahreswitterung sowie der Vorjahresvariabilität. Dieses variable Verteilungsmuster des Pflanzenbestandes bewirkt seinerseits ein variables Muster der mineralisierbaren Ernterückstände, des Bodenfeuchtegehalts sowie des nicht aufgenommenen Mineralstickstoffs nach der Ernte und hat damit wiederum Auswirkungen auf die N-Umsetzungen im Herbst. Durch diese vielfältigen Überlagerungen der verschiedenen Heterogenitätsausprägungen und -ursachen im System Boden-

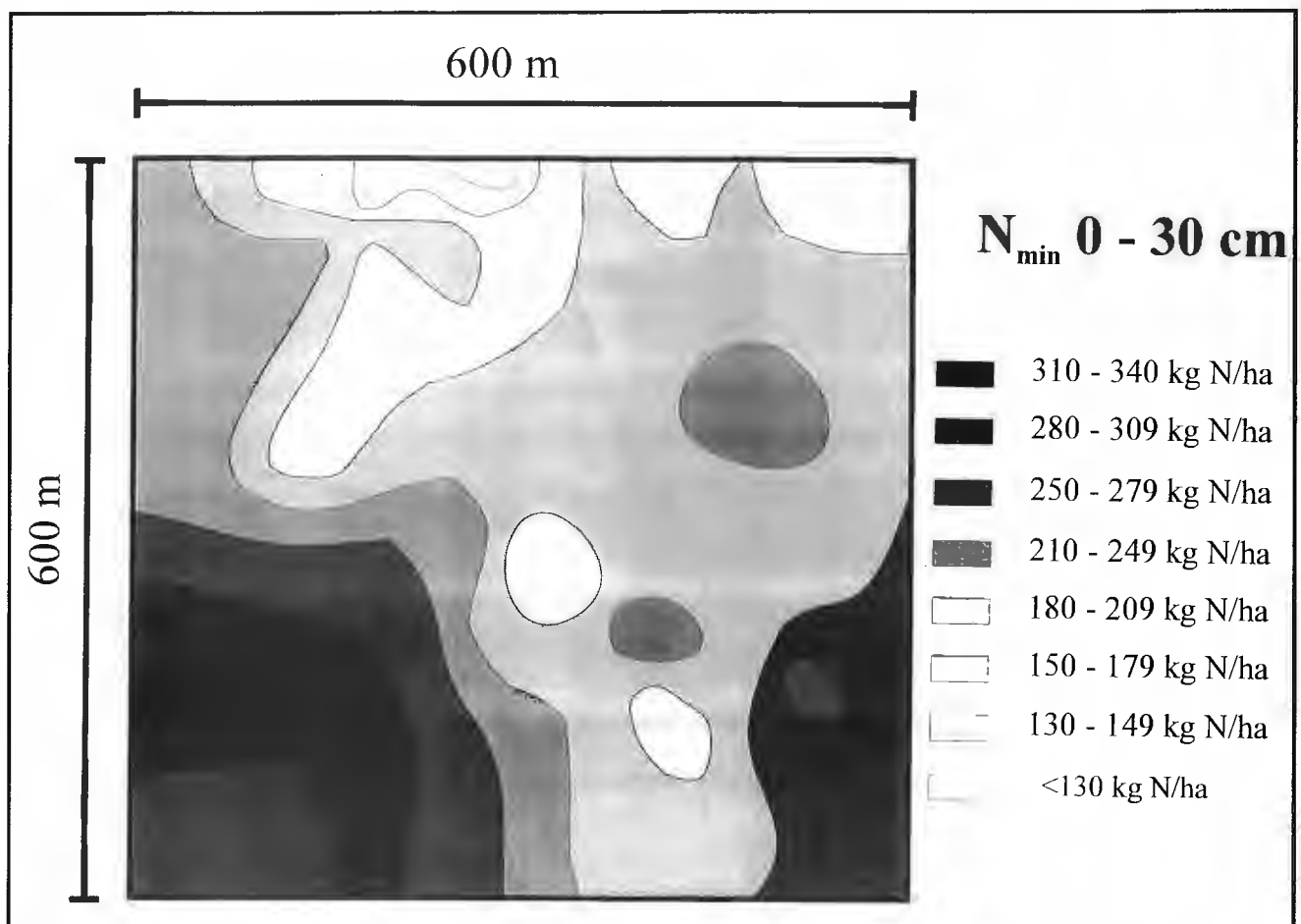


Abbildung 1: Räumliche Verteilung des N_{\min} -Gehalts in 0 - 30 cm Tiefe eines 36 ha-Schlages zu Zuckerrüben nach Ausbringung einer flüssigen N-Gabe (aus Springob et al., 1985).
(Mittel: 177 kg N/ha, $s = 72$ kg N/ha, $cv = 41$ %)

Pflanze, ist die Zuordnung zu Einflußgrößen und die Vorhersagbarkeit der Heterogenitätsmuster meist nur schwer möglich. Es besteht jedoch die Aussicht, mit Hilfe von integrierten Simulationsmodellen zumindest die wesentlichen Reaktionen im System Boden-Pflanze unter Berücksichtigung der aktuellen Witterung nachzuvollziehen. Somit könnten solche Modelle auch zur teilflächenspezifischen Düngungsoptimierung herangezogen werden.

Abschätzung des Düngedarfs

Der Stickstoffdüngungsbedarf ergibt sich aus der Differenz zwischen dem N-Bedarf der Pflanze und dem N-Angebot des Bodens. Abbildung 2 zeigt ausgehend von einer klassischen N_{\min} -Bestimmung zu Vegetationsbeginn wie sich während der nachfolgenden Vegetationsperiode aufgrund zeitlicher Veränderungen des N_{\min} -Vorrats (z. B. Mineralisation, Nitratauswaschung) bzw. einer veränderten räumlichen Koinzidenz von Mineralstickstoff und Durchwurzelung eine zeitliche Staffelung des durch Düngung zu deckenden zusätzlichen N-Bedarfs ergibt.

Wollte man eine räumlich differenzierte Düngedarfermittlung auf der Basis von N_{\min} -Gehalten machen, würde dies bedeuten, daß aus den vorstehend angeführten Gründen in jedem

Frühjahr eine aufwendige Rasterbeprobung und Einzelanalyse der Probenahmepunkte durchgeführt werden müßte. Abgesehen vom erheblichen Arbeits- und Kostenaufwand stellt aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik des Mineralstickstoffgehalts die Messung lediglich eine Momentaufnahme dar, die je nach Standortbedingungen nur eine begrenzte Aussagekraft für die Düngerbemessung hat.

Durch die Simulation der wesentlichen Prozesse im System Pflanze-Boden in Abhängigkeit von der aktuellen Witterung lassen sich diese Veränderungen nachvollziehen und eine Bestimmung der aktuellen N-Versorgung ist praktisch zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich. Ein weiterer Vorteil ist, daß diese Dynamik sich auf im wesentlichen statische oder nur langsam veränderbare Bodenparameter zurückführen läßt, sodaß deren Verteilungsmuster nur einmalig bestimmt werden müssen. Alle weiteren notwendigen Eingabegrößen beziehen sich entweder auf Ertragsdaten, die bei entsprechender Technik auch räumlich differenziert mit vertretbarem Aufwand bestimmt werden können oder auf Bewirtschaftungsdaten, die ohnehin im Rahmen der Schlagkartei aufgezeichnet werden.

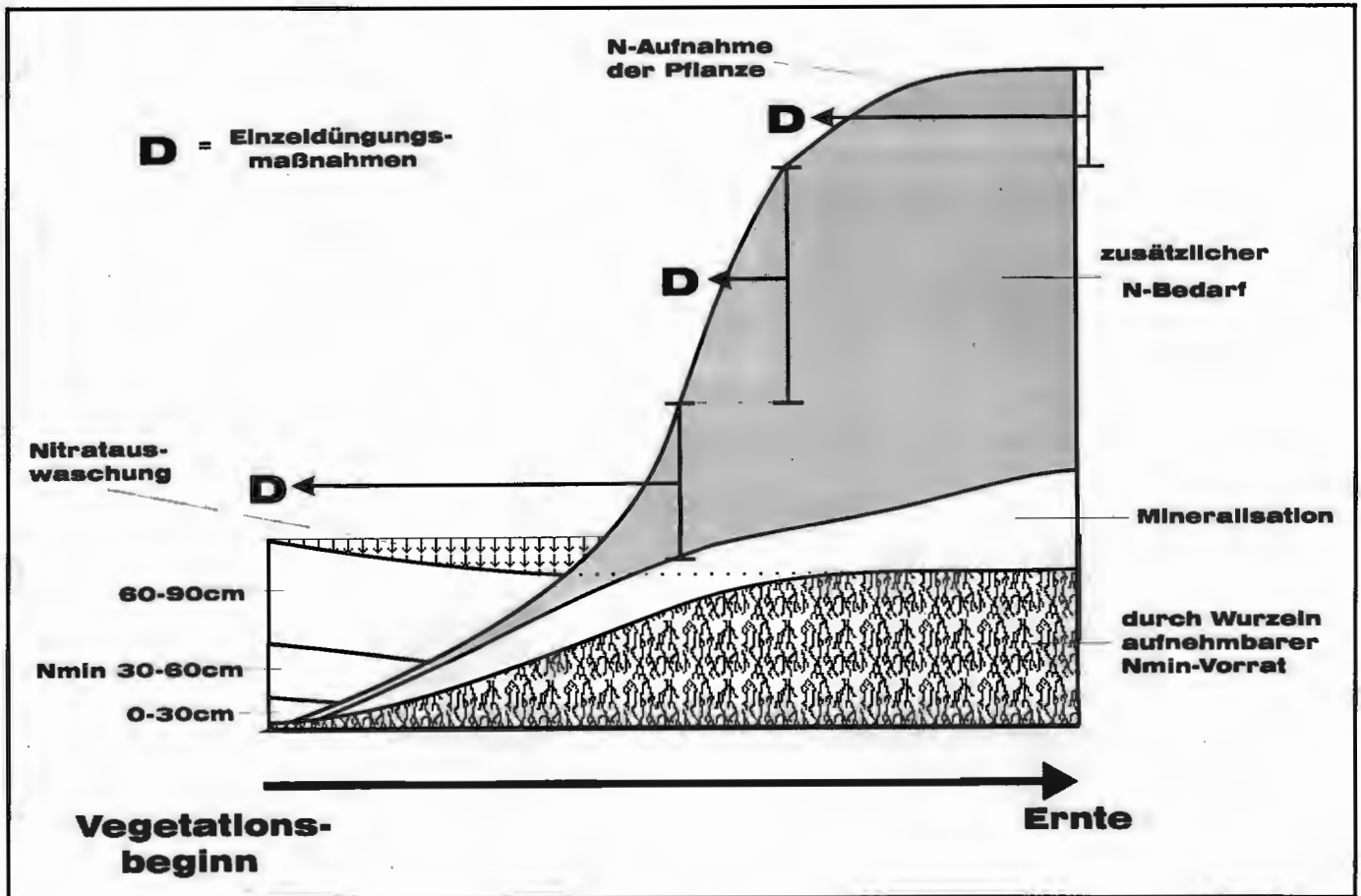


Abbildung 2: Schema der Düngedarfsermittlung

Simulation der N-Dynamik

Im folgenden soll zum allgemeinen Verständnis kurz der Aufbau eines solchen Modells skizziert werden. Es handelt sich hierbei um das Modell HERMES, welches in den vergangenen Jahren bereits in Verbindung mit der Ackerschlagkartei von Land-Data für Zwecke der Düngedarfprognose eingesetzt wird. Detailliertere Beschreibungen der Modellansätze finden sich u. a. bei Kersebaum und Richter (1991), Kersebaum (1993) und Kersebaum (1995). Der Modellaufbau gliedert sich, wie in Abbildung 3 skizziert, in unterschiedliche Teilmolelle.

Wegen der engen Verflechtung sowohl der biologischen Stick- und Kohlenstoffumsetzung wie auch der physikalischen Transportprozesse ist die Simulation des Wasserhaushalts ein unverzichtbarer Bestandteil des Modells. Hierfür wird ein einfaches Plattenmodell verwendet, da die hierfür notwendigen Kapazitätsparameter (Feldkapazität und Permanenter Welkepunkt) sich relativ einfach anhand der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde, 1994) im wesentlichen aus der Textur und dem Humusgehalt abschätzen lassen. Diese Parameter bzw. Korrekturalgorithmen sind für die existierenden Körnungsklassen bereits an das Modell gekoppelt, sodaß lediglich die Angabe der Bodenart notwendig ist.

Notwendig für die Berechnung des Wasserhaushalts ist neben dem täglichen Niederschlag das Sättigungsdefizit der Luft. Dieses wird zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Haude (1955) unter Verwendung von bewuchsspezifischen Monatsfaktoren (Heger 1978, Deutscher Wetterdienst, unveröffentlicht) verwendet. Die potentielle Verdunstung wird, abhängig vom Bodenwassergehalt, zu einer aktuellen Verdunstung reduziert, wobei durchwurzelungsabhängig verschiedene Bodenschichten beteiligt sind.

Die berechneten Wasserflüsse zwischen den Bodenkompartimenten werden zur Berechnung der Nitratverlagerung mit Hilfe der klassischen Konvektions-Dispensionsgleichung verwendet.

Die Mineralisation von organischer Substanz im Boden wird im wesentlichen durch die Temperatur (T) und die Bodenfeuchte (Q) beeinflusst. Sie wird im Modell unter Annahme von zwei unterschiedlich schnell mineralisierbaren N-Fractionen mit zwei Reaktionsgleichungen 1. Ordnung beschrieben (Richter et al. 1982):

$$N_{\min}(t) = N_r (1 - e^{-k_r(T,\theta)t}) + N_d (1 - e^{-k_d(T,\theta)t}) \quad (01)$$

Dabei stellt N_r das Mineralisationspotential einer langsam abbaubaren N-Fraktion dar, das sich im wesentlichen aus einem am Umsatz beteiligten Teil der organischen Substanz des Bodens

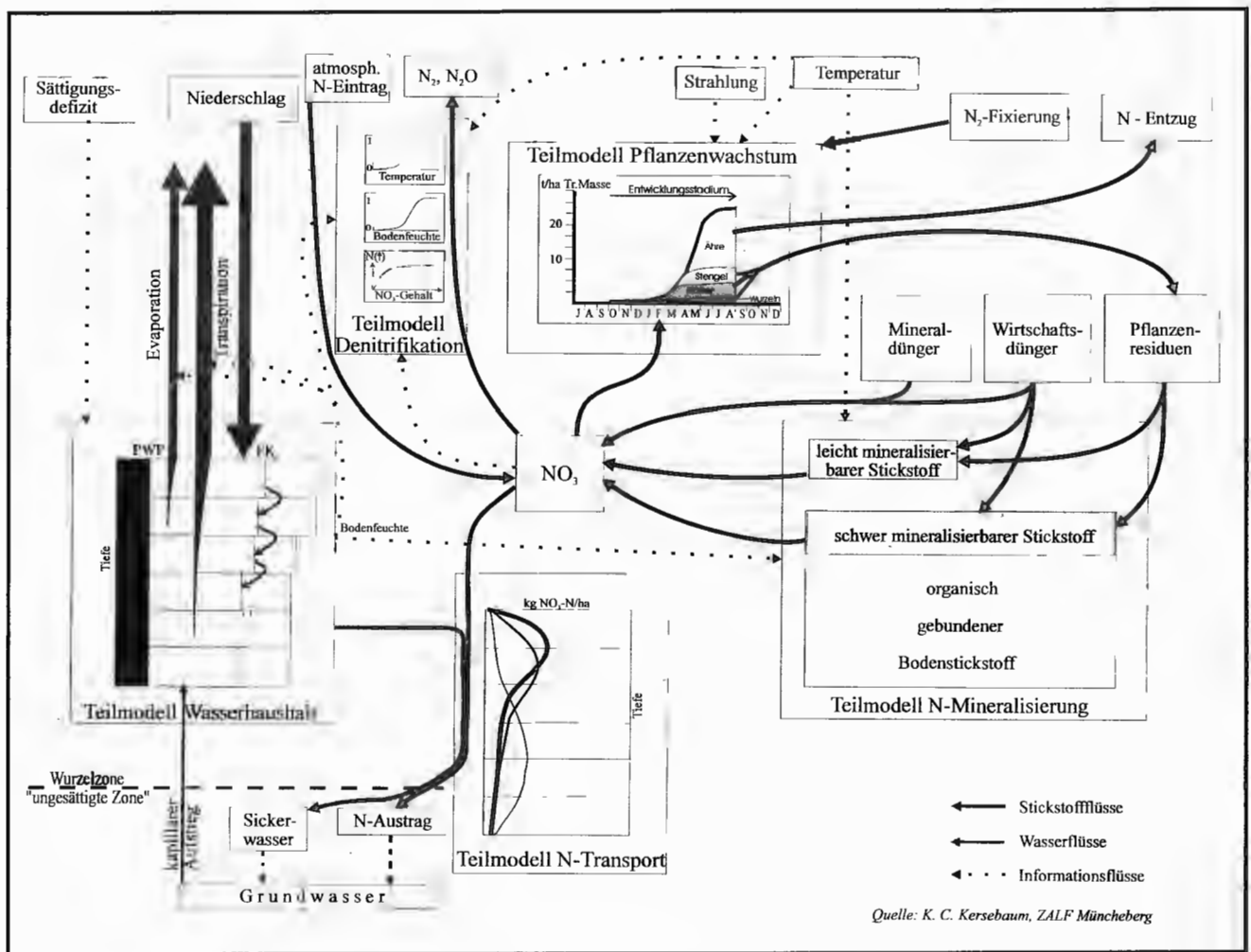


Abbildung 3: Schema des Stickstoff-Simulationsmodells HERMES

(nach Nuske (1983) 13 % von N_{total}) sowie schwer zersetzbaren Ernterückständen zusammensetzt. Das Mineralisationspotential N_d der schnell umsetzbaren N-Fraktion besteht aus den leicht abbaubaren Stickstoffverbindungen in frischen Ernterückständen. Die Abhängigkeit der Mineralisationskoeffizienten k_r und k_d von der Temperatur T wird durch zwei Arrheniusfunktionen (Nuske 1983, Nordmeyer und Richter 1985) beschrieben:

$$k_r(T) = 4.0 \cdot 10^9 \cdot e^{-8400/(T+273)} \quad (02)$$

$$k_d(T) = 5.6 \cdot 10^{12} \cdot e^{-9800/(T+273)} \quad (03)$$

Der Einfluß der Bodenfeuchte auf die Mineralisation wird durch Korrektur der Mineralisationskoeffizienten mit einem von Myers et al. (1982) abgeleiteten Reduktionsfaktor berücksichtigt.

Gasförmige Stickstoffverluste werden im wesentlichen durch Denitrifikation und NH_3 -Entbindung hervorgerufen. Für mineralische und organische Düngemittel werden mittlere Ausbringungsverluste von 15 % des Ammonium- bzw. Harnstoffanteils im Dünger veranschlagt. Die Simulation der Denitrifikation erfolgte

mit einem einfachen Modellansatz von Richter und Sönderath (unveröffentlicht, zit. in Schneider 1991). Darin wird die Denitrifikation als eine Funktion des Nitratgehalts im Boden, der Bodenfeuchte (als Prozent wassergefüllten Porenraums Q_r) und der Temperatur abgebildet.

Das Pflanzenmodell basiert auf dem SUCROS-Modell (Van Keulen, 1982) und simuliert auf der Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die tägliche Nettotrockenmassebildung. Die phänologische Entwicklung der Pflanze wird mittels einer durch Tageslänge und Vernalisationsgrad modifizierten Temperatursumme (Weir et al., 1984) simuliert. Die gebildeten Assimilate werden in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium auf einzelne Pflanzenorgane verteilt. Für die gebildete Wurzelmasse wird dabei zusätzlich eine entwicklungs- und bodenartabhängige Tiefenverteilung modelliert.

Die Aufnahme von Wasser und Stickstoff wird unter Berücksichtigung der Tiefenverteilungen von Wurzellängendichte und Wasser- bzw. Nitratgehalt für die einzelnen Tiefenabschnitte im Boden berechnet. Dabei wird zunächst der N-Bedarf der Pflanze über die bereits gebildete Trockenmasse sowie deren N-Gehalt berechnet. Die potentielle tägliche Aufnahme wird durch eine maximale Aufnahmerate pro Wurzellänge begrenzt. Die eigentliche Aufnahme ergibt sich aus dem Antransport von Nitrat an die

Wurzeloberfläche mit dem aufgenommenen Wasser sowie über Diffusion. Bei Auftreten von Wasserstreß bzw. Stickstoffmangel erfolgt eine Rückkopplung auf die Trockenmassebildung.

Eingabebedarf des Modells

Die für das Modell notwendigen Daten sind weitgehend in den handelsüblichen Schlagdateisystemen vorgesehen. Die notwendigen Eingaben gliedern sich in Witterungsdaten, Bodendaten und Bewirtschaftungsdaten. Tabelle 1 enthält die notwendigen Eingabedaten mit der jeweiligen Genauigkeitsanforderung.

Die Genauigkeitsanforderungen einzelner Größen orientieren sich dabei eher an der Sensitivität des Modells als an den messtechnischen Möglichkeiten. Während in der Praxis einzelne Bewirtschaftungsmaßnahmen meist gut erfaßt sind, besteht hinsichtlich der Standortbeschreibung (Bodenart, Humusgehalt) bereits ohne räumliche Differenzierung auf dem Schlag oft ein Defizit. Entsprechende Untersuchungen zur Flächenheterogenität liegen bislang nur in wissenschaftlich begleiteten Versuchen vor.

Auch der Zugriff auf aktuelle Wetterdaten kann ohne eine eigene Meßstation problematisch werden. Eine betriebseigene automatisch aufzeichnende Wettererfassungsstation mit Anbindung an die Schlagkartei wäre arbeitstechnisch von erheblichem Vorteil.

Konzeption einer simulationsgestützten Düngerbedarfsermittlung

Bereits aus Abbildung 2 wird ein prinzipielles Problem deutlich: die Düngung muß ein Defizit abdecken, daß zum aktuellen Zeitpunkt oft noch gar nicht besteht, sondern sich erst zukünftig entwickelt. Für die Ermittlung einer konkreten Empfehlung hinsichtlich Zeitpunkt und Menge einer N-Düngung ist es daher unerlässlich, eine Prognose über den zukünftigen Verlauf von N-Angebot und N-Bedarf anzustellen. Diese Prognose soll die Zeit zwischen dem aktuellen Termin und dem voraussichtlichen Termin der Folgedüngung abdecken. Für die Modellrechnungen werden daher günstige Düngungsmomente definiert, die sich an bestimmten Pflanzenentwicklungsstadien orientieren. Da Wettervorhersagen über die z. T. sehr langen Zeiträume nicht möglich sind, muß auf der Basis standortspezifischer möglichst langjähriger Wetterdaten ein Prognoseszenario ermittelt werden. Aufgrund der in diesem Szenario simulierten Wachstums- Mineralisations- und Verlagerungsprozesse ergibt sich unter der Prämisse eines hinsichtlich der N-Versorgung optimalen Wachstums ein täglicher Vergleich von N-Angebot und N-Bedarf.

Dabei wird nicht ein schlichter Mengenvergleich durchgeführt, sondern es wird für jede Tiefenschicht (10 cm Auflösung) die mögliche N-Aufnahme aufgrund von Konvektion und Diffusion unter Berücksichtigung von N_{\min} -Gehalt, Wassergehalt und Wurzellängendichte berechnet. Bei auftretenden Defiziten wird der obersten Schicht rechnerisch solange Stickstoff zugeführt, bis das Defizit abgedeckt ist. Diese rechnerische Düngung wird während des Prognosezeitraums summiert und ergibt die notwendige Düngermenge für den Prognosezeitraum. Der Prognosezeitraum ergibt sich beispielsweise für die Frühjahrsdüngung wenn die Simulation für das angenommene Witterungsszenario das Erreichen des nächsten düngungsrelevanten Entwicklungsstadiums, in diesem Falle den Schossbeginn, berechnet. Bei hohem Düngerbedarf wird insbesondere bei leichten Böden ein Splitting vorgeschlagen.

Da die tatsächlich eintretenden Witterungsbedingungen deutlich von den angenommenen abweichen können, ist es notwendig, bereits einige Zeit vor Ablauf des zuerst geschätzten Prognosezeitraums eine erneute, durch reale Witterungsdaten

Eingabegröße	möglicher Fehler der Angabe	Auswirkung	angestrebte Genauigkeit
Bewirtschaftung			
Erntedatum Vorfrucht	zu früh zu spät	Mineralisationsdauer v. Winter + -	Dekade
Ertrag Vorfrucht	zu wenig zu hoch	Mineralisation - " +	Getr. ± 10 dt/ha TM Hack ± 30 dt/ha FM.
Aussaatdatum Frucht	zu früh zu spät	N-Aufn. v. Winter + " -	Woche
Aussaat Zw. frucht	zu früh zu spät	N-Aufn. v. Winter + " -	Woche
Ernte/Einarb. Zw.frucht	zu früh zu spät	N-Aufn. - Min.dauer+ " + " -	Woche
N-Düngung Menge	zu wenig zu hoch	N_{\min} -Gehalt - " +	kg N/ha bzw. m ³ /ha bzw. dt/ha
N-Düngung Termin	zu früh zu spät	N_{\min} -Gehalt - " +	Tag
Bodendaten			
Bodenartklasse nach Kartieranleitung	FK zu hoch FK zu niedrig	N-Austrag - N_{\min} + " + " -	± 20mm/100 cm
Humusgehalt (C/N)	zu hoch zu niedrig	Mineralisation + Mineralisation -	± 0.2% C_{total}
Wetterdaten (täglich)			
Niederschläge	zu gering zu hoch	N-Austrag - N_{\min} + " + " -	± 10 %
Temperatur (Tagesmittel)	zu gering zu hoch	Mineralisation - " +	± 0.5 °C
Sättigungsdefizit d. Luft	zu gering zu hoch	N-Austrag + N_{\min} - " - " +	± 10 %
Globalstrahlung	zu gering zu hoch	Pflanzenwachstum - " +	± 10 %

Tabelle 1: Eingabedaten des Modells und Genauigkeitsanforderung

aktualisierte Simulation durchzuführen. Fällt das N-Defizit geringer aus, wird bei der folgenden Düngung eine geringere Menge notwendig sein. Ist das Defizit höher als erwartet, z. B. durch Auswaschung nach schweren Niederschlägen, ist die Folgedüngung entsprechend vorzuziehen oder eine Zwischengabe notwendig. Mit diesem Verfahren läßt sich für die gesamte Vegetationsperiode der Düngungsbedarf berechnen.

Resumée

Wenngleich erste Tests anhand von Düngungsversuchen bereits gute Resultate des Modellsystems gezeigt haben, bleiben für den Einsatz in der Praxis dennoch eine Reihe von Problemen zu lösen. Abgesehen von den z. T. noch offenen Fragen über die Zusammenhänge bei der C- und N-Dynamik, die die Genauigkeit des Modells an sich beschränken und des bislang noch eingeschränkten Kulturartenspektrums, bleibt vor allem die Frage der Bereitstellung der notwendigen Eingabegrößen. Dies betrifft in erster Linie die geocodierte Erfassung von Bodenparametern. Obwohl im Modell lediglich einmalig zu bestimmende Größen (selbst die Startwertverteilung der N_{\min} -Gehalte wird nur im ersten Jahr benötigt) erforderlich sind, bedeutet deren Kartierung für den einzelnen Betrieb zunächst eine arbeits- und kostenintensive Vorleistung. Die Entwicklung einfach zu handhabener Alternativbestimmungsmethoden hätte in diesem Zusammenhang hohe Priorität.

Letztlich beinhaltet auch das oben beschriebene Konzept der Düngebedarfsberechnung, welches sich zunächst an den Ansprüchen der Kulturpflanze orientiert, hinsichtlich des ökologischen Einsatzes von Dünger noch Probleme. So sind aufgrund des beschriebenen Modellansatzes für den Nährstofftransport an die Pflanzenwurzel bei den leichten Böden wegen der geringeren Bodenfeuchte und damit verbundenen niedrigeren Diffusionskoeffizienten rechnerisch höhere Nährstoffgradienten zur optimalen Versorgung notwendig, als auf bindigen Substraten. Zudem werden im Verlauf der Vegetationsperiode die eingetretenen N-Verluste durch Auswaschung vom Modell z. T. wieder ausgeglichen. Dies resultiert nicht selten bei Böden mit an sich niedrigerer Ertragsersparnis in einer höheren Empfehlung. Zur Vermeidung unerwünschter N-Austräge wäre demnach eine Mehrzieloptimierung notwendig, die zwangsläufig dazu führt, daß das im wesentlichen durch das Wasser bedingte Ertragspotential unterschritten werden müßte.

Zusammenfassung

Die derzeitige Praxis der N- Düngebedarfsermittlung geht im wesentlichen von gemessenen Flächenmittelwerten aus. Der derzeitige Stand der Positionierungstechnik würde eine Berücksichtigung von standörtlich erfassten Variabilitäten innerhalb von Flächen gestatten. Die Beibehaltung des bisherigen Systems würde jedoch einen kaum zu vertretenden Messaufwand erfordern, da durch die Vielzahl der beteiligten Bodenprozesse mit zeitlich variierender Dominanz in jedem Jahr unterschiedliche Mengen und Verteilungen gemessen werden.

Es wird ein Konzept zur operationalen Nutzung eines Simulationsmodells vorgestellt. Die Eingabeanforderungen wer-

den aufgezeigt, aktuelle Probleme und Hemmnisse für den Einsatz im Betrieb werden diskutiert.

Modelling the nitrogen dynamics to optimize nitrogen fertilization on heterogenous sites - requirements for the operational use in practice

Actual nitrogen fertilizer recommendations are based predominantly on average measurements on fields. The present status of the positioning systems would make it possible to consider the spatial variability within fields. Continuance of the present method would lead to non acceptable efforts for spatial measurements, because the quaternary number of processes involved will lead to a variance of annual measurement and spatial distributions.

A concept for the operational use of a simulation model is presented. The input requirements are introduced, actual problems and obstacles for the use in practice are discussed.

Literatur

- AG Bodenkunde (1994) Bodenkundliche Kartieranleitung. - 4. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.
- Dahiya, I. S., K. C. Kersebaum und J. Richter (1984): Spatial variability of some nutrient constituents of an Alfisol from loess. I. Classical statistical analysis. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 147, S. 695 - 703.
- Dahiya, I. S., R. Anlauf, K. C. Kersebaum und J. Richter (1985): Spatial variability of some nutrient constituents of an Alfisol from loess. - II. Geostatistical analysis. Z. Pflanzenern. Bodenk. 148, S. 268 - 277.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung auf möglichst einfache Weise. - Mitt. d. Dtsch. Wetterdienst, S. 11.
- Heger, K. (1978): Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen. - Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 26, S. 21 - 40.
- Kersebaum, K. C. (1993): Die Stickstoffaufnahme durch Pflanzen im Nmodell HERMES. - Agrarinformatik 24, S. 51 - 159.
- Kersebaum, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. - Ecol. Modelling 81, S. 145 - 156.
- Kersebaum, K. C. and J. Richter (1991): Modelling nitrogen dynamics in a plant-soil system with a simple model for advisory purposes. - Fert. Res. 27, S. 273 - 281.
- Keulen, H. van, F. W. T. Penning de Vries and E. M. Drees (1982): A summary model for crop growth. - In: F. W. T. Penning de Vries & H. H. van Laar (eds.): simulation of plant growth and plant production. - PUDOC, Centre of agric. publishing and documentation, Wageningen, S. 87 - 97.
- Myers, R. J. K., C. A. Campbell, and K. L. Weier (1982): Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. - Can. J. Soil Sci., 62, S. 111 - 124.
- Nordmeyer, H. & J. Richter (1985): Incubation experiments

on nitrogen mineralization in loess and sandy soils. - *Plant and Soil* 83, S. 433 - 445.

Nuske, A. (1983): Ein Modell für die Stickstoff-Dynamik von Acker-Lößböden im Winterhalbjahr. Messungen und Simulationen. - Diss. Univ. Hannover.

Richter, J., A. Nuske, W. Habenicht, and J. Bauer (1982): Optimized N-mineralization parameters of loess soils from incubation experiments. - *Plant and Soil*, 68, S. 379 - 388.

Schneider, U. (1991): Messungen von Denitrifikations- und Nitratwaschungsverlusten in einem landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebiet. - Diss. Univ. Bonn.

Springob, G., R. Anlauf, K. C. Kersebaum und J. Richter (1985): Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalten zweier Schläge auf Löss-Parabraunerden. - *Mitteilungen Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 43/II, S. 691 - 696.

Weir, A. H., P. L. Bragg, J. R. Porter and J. H. Rayner (1984): A winter wheat crop simulation model without water and nutrient limitations. - *J. agric. Sci. Camb.*, 102, S. 371 - 382.

Werner, A. (1994): Ziele und Möglichkeiten der kleinräumigen Bestandsführung. - *KTBL- Arbeitspapier* 214, S. 7 - 26.

Verfasser: Kersebaum, Kurt Christian, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e. V. (ZALF), Institut für Landschaftsmodellierung, 15374 Müncheberg.