N-SIM

Autor: Th. Engel

1 Überblick

Das Simulationsmodell N-SIM wurde im Rahmen einer Promotion (*Engel*, 1991a) mit der Zielvorstellung entwickelt, den mineralischen N-Gehalt im Frühjahr mit einer der Bodenuntersuchung vergleichbaren Genauigkeit zu simulieren. Daneben standen leichte Bedienbarkeit des Modells und Beschränkung auf leicht verfügbare Eingabedaten im Vordergrund.

Zentraler Bestandteil des Simulationsmodells ist ein einfaches Wassermodell nach *Jones und Kiniry* (1986), welches den Boden in Schichten definierter Mächtigkeit und Speicherfähigkeit einteilt. Im einzelnen werden Evaporation und Transpiration, Oberflächenabfluß, Versickerung und kapillarer Wasseraufstieg simuliert.

Hinsichtlich der N-Dynamik berücksichtigt das Modell N-SIM alle wichtigen Vorgänge wie Mineralisierung, Immobilisierung, Nitrifzierung, Denitrifzierung, mineralische und organische Düngung sowie atmosphärische N-Einträge.

Die verwendeten Ansätze zur Simulation der N-Transformationen stammen zur Hauptsache von *Godwin* (1987). Sie wurden jedoch in zahlreichen Punkten verändert und angepaßt. Die Simulation von organischer Düngung und N-Deposition basiert auf Ansätzen von *Engel* (1991a), die aus Grundlagenuntersuchungen aus der Literatur abgeleitet wurden.

Das Wachstumsmodell für Winterweizen nach *Ritchie et al.* (1987) simuliert Biomassebildung und phänologische Entwicklung von Winterweizen sowie Stickstoffaufnahme und -verteilung in den einzelnen Pflanzenorganen.

2 Bodenwasser und Bodenwärme

2.1 Bodenwasser

Zur Beschreibung des Wasserhaushaltes wurde im Modell N-SIM wegen der geringeren Rechenzeit und der einfacheren Parameterableitung ein einfaches Schichtenmodell nach *Jones und Kiniry* (1986) ausgewählt, bei dem der Boden in Schichten mit definierter Mächtigkeit eingeteilt wird (vgl. Dokumentation CERES). Der Wassergehalt der einzelnen Schichten ist das Resultat von Verdunstung, Wasseraufnahme durch die Wurzeln und Wasserfluß zwischen den Schichten. Als mögliche Grenzen, zwischen denen sich der Wassergehalt der einzelnen Schichten bewegen kann, werden der Wassergehalt bei Permanentem Welkepunkt (Θ_{PWP}), bei Feldkapazität (Θ_{FK}) und bei Wassersättigung (Θ_{SAT}) verwendet. Diese Parameter lassen sich aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (*AG Bodenkunde*, 1982) ableiten, welche für verschiedene Bodenarten durchschnittliche Werte für Θ_{PWP} und Θ_{FK} sowie für das Gesamtporenvolumen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte angibt.

Das Wassermodell benötigt außerdem Angaben zu den Reflexionseigenschaften (Albedo) des Bodens, zur maximalen täglichen Evaporation und die SCS-Kurvennummer zur Berechnung des Oberflächenabflusses nach *Williams et al* (1984). Während diese Parameter in den CERES-Modellen als Inputgrößen vorliegen müssen, werden sie in N-SIM programmintern aus der angegebenen Bodenart, dem Gehalt an organischer Substanz sowie der Hangneigung abgeleitet.

2.2 Bodenwärme

Die Bodentemperatur hat auf fast alle N-Transformationen einen entscheidenden Einfluß und wird in N-SIM daher simuliert. Das verwendete Bodentemperaturmodell ist vergleichbar mit dem des EPIC-Modells (*Williams et al.*, 1984).

3 Bodenstickstoff

3.1 Mineralisierung

Der im Modell N-SIM gewählte Ansatz zur Beschreibung von Mineralisierung und Immobilisierung ist in modifizierter Form vom Modell nach *Godwin* (1987) abgeleitet (vgl. Dokumention CERES).

Im Modell N-SIM werden Mineralisierung und Immobilisierung über den Zerfall zweier Arten von organischer Substanz simuliert. Die organische Substanz wird unterteilt in die frische organische Substanz (FOS), die sich aus Ernterückständen und Grünmasse zusammensetzt, und in einen stabilen Humus-Pool (HUM).

Der FOS-Pool ist nochmals unterteilt in die Fraktionen Kohlenhydrate, Zellulose und Lignin. Zu Beginn der Simulation wird ein Verhältnis von 20% Kohlenhydraten, 70% Zellulose und 10% Lignin angenommen. Zur Kalkulation der Menge und Verteilung umsetzbarer organischer Substanz werden die Menge an zugeführten Ernte- und Wurzelrückständen, das C/N-Verhältnis der Rückstände und die Einarbeitungstiefe herangezogen. *Godwin* (1987) geht von einem fixen C/N-Verhältnis der Wurzelrückstände von 40 aus. Zahlreiche Untersuchungen über C/N-Verhältnisse der Wurzeln zeigen jedoch, daß aufgrund des intensiven europäischen Produktionsniveaus je nach Fruchtart Werte zwischen 10 und 20 auftreten. Da das C/N-Verhältnis sowohl die zur Verfügung stehende N-Menge als auch die Umsetzungsgeschwindigkeit beeinflußt, wurde das C/N-Verhältnis der Wurzel als weitere Eingabegröße aufgenommen. Im Erfassungsprogramm von N-SIM werden Mengen und C/N-Verhältnisse intern aus dem Ertrag geschätzt. Liegen genauere Zahlen vor, können die Schätzergebnisse überschrieben werden.

Der Abbau der drei FOS-Pools erfolgt mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Unter optimalen Bedingungen werden Zerfallsraten (R_{Zmax}) von 0,2 für Kohlenhydrate, 0,05 für Zellulose und 0,0095 für Lignin verwendet. *Godwin* (1987) benutzt dagegen eine Zerfallsrate für Kohlehydrate von 0,8. Die Zerfallskonstante von 0,2 für Kohlenhydrate unterstellt, daß unter optimalen Bedingungen 20% des gesamten Pools innerhalb eines Tages abgebaut werden. Optimale Bedingungen sind jedoch in landwirtschaftlich genutzten Böden fast nie vorzufinden, da Bodentemperatur, Bodenfeuchte oder die Zusammensetzung der Ernterückstände den Zerfallsprozeß deutlich beeinträchtigen können. Zur Quantifizierung dieser Beeinträchtigungen werden zusätzliche Reduktionsfaktoren für den Wassergehalt, die Bodentemperatur und das C/N-Verhältnis in die Zerfallsgleichungen aufgenommen, die im wesentlichen mit den von *Godwin* (1987) verwendeten übereinstimmen.

Bei der Berechnung des Temperaturfaktors wurden Korrekturen vorgenommen. Im Gegensatz zum Godwin-Modell, welches als untere Mineralisierungsgrenze 5°C verwendet, wird im Modell N-SIM 0°C als untere Grenze angesehen. Untersuchungen von *Stadelmann et al.* (1983) zeigen, daß bei 0°C noch leichte Mineralisierungsvorgänge ablaufen und selbst kleine Temperaturveränderungen zwischen 0° und 10°C einen deutlichen Anstieg der Mineralisierung bewirken. Der Temperaturfaktor nimmt bei 0°C einen Wert von 0 an, steigt mit zunehmender Temperatur linear an und

erreicht bei 30°C den Optimalwert 1, der sich auch bei höheren Temperaturen nicht mehr verändert.

Die N-Freisetzung aus dem im Humus-Pool gebundenen organischen Stickstoff erfolgt nur mit einer sehr kleinen Zerfallsrate von 83 ppm unter Berücksichtigung des bereits berechneten Temperatur- und Feuchtefaktors. Während *Godwin* (1987) die für die Umsetzung zur Verfügung stehende N-Menge aus dem C-Gehalt mit einem fixen C/N-Verhältnis des Bodens von 10 berechnet, wird in N-SIM der Gesamt-N-Gehalt des Bodens als zusätzliche Eingabegröße eingeführt, die als Grundlage für die Berechnungen dient.

3.2 Nitrifzierung und Denitrifzierung

Nitrifzierung und Denitrifzierung werden in N-SIM nach den Ansätzen von *Godwin* (1987) simuliert (vgl. Dokumentation CERES).

3.3 Düngung

Die Wirkung ausgebrachter Düngergaben auf die N-Dynamik im Boden wird im Modell N-SIM in Abhängigkeit von der Düngerart unterschiedlich berücksichtigt.

Die Nitrat- und Ammoniumanteile mineralischer Dünger werden dem Nitrat- und Ammoniumpool der obersten Bodenschicht zugerechnet, wobei für den Ammoniumanteil gasförmige Verluste von durchschnittlich 10% angesetzt werden.

Stickstoff in harnstoffhaltigen Düngern (z.B. AHL) oder in Harnstoff kann zunächst keinem Bodenpool zugerechnet werden. Erst nach der hydrolytischen Spaltung durch das Enzym Urease steht der Stickstoff in Form von Ammonium für die Pflanzenernährung zur Verfügung. Der Harnstoffzerfall wird im Modell in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und -temperatur sowie von pH-Wert und organischem Kohlenstoffgehalt nach *Godwin* (1987) simuliert (vgl. Dokumentation CERES).

Der NH_4-Anteil organischer Dünger erhöht den Ammoniumpool und der organische N-Anteil den langsam fließenden N-Pool des Bodens. Die Nitrifzierung des Ammoniums aus organischen Düngern ist von der Nitrifzierung des bodenbürtigen Ammoniums abgekoppelt und beträgt täglich 10% der verbleibenden Ammoniummenge.

Die Berechnung der Ammoniakverluste ist aufgrund der vielen Einflußfaktoren sehr problematisch. Der im Modell N-SIM gewählte Ansatz berechnet die Ammoniak-

Freisetzung in Abhängigkeit von Düngerart, Bodenbedeckung, Einarbeitungszeitpunkt und Temperatur. Der Ansatz geht davon aus, daß Ammoniakverluste bis zu einem Zeitraum von maximal 10 Tagen nach der Ausbringung auftreten und nach Einarbeitung nicht mehr beobachtet werden können.

Als Maximalverluste werden bei Ausbringung von Rindergülle 60% angenommen. Dieser Maximalverlust erhöht sich bei Ausbringung auf Getreidestroh auf 90%. Für Schweinegülle werden halb so hohe Verluste wie für Rindergülle angesetzt. Die Maximalverluste bei der Ausbringung von Festmist betragen 30%. Diese Maximalverluste werden nur erreicht, wenn keine Einarbeitung der organischen Dünger erfolgt. Der für die NH_3-Entgasung zur Verfügung stehende Ammoniumpool errechnet sich aus dem Produkt von Ammoniumanteil im organischen Dünger und Maximalverlust.

Die tägliche Freisetzungsrate wird in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet. Bei Maximaltemperaturen über 20°C beträgt die tägliche Freisetzungsrate 0,5. Sie sinkt mit zurückgehenden Temperaturen linear auf 0,25 bei 0°C und beträgt bei gefrorenem Boden 0,16. Die Ammoniakverluste des ersten Tages errechnen sich aus dem Produkt von Freisetzungsrate und Ammoniumpool. An den darauffolgenden Tagen verringern sich die Verluste, da bei gleicher Verlustrate nur mehr der verbleibende Ammoniumpool herangezogen werden kann. Bei Einarbeitung noch am Tag der Ausbringung werden generell Verluste von 10% angenommen.

Abbildung 1 zeigt den kumulativen Verlauf der NH_3-Verluste in Abhängigkeit vom Einarbeitungstermin für einige Beispiele.

3.4 Atmosphärische N-Einträge

Nach *Rohmann & Sontheimer* (1985) beträgt die mittlere N-Konzentration im Niederschlagswasser 2,1 mg N/l. Im Modell N-SIM wird mit dieser durchschnittlichen Konzentration gerechnet, trockene Deposition wird nicht berücksichtigt. Bei Niederschlagsverhältnissen wie in Weihenstephan ergibt sich ein jährlicher N-Eintrag von 18 kg N/ha.

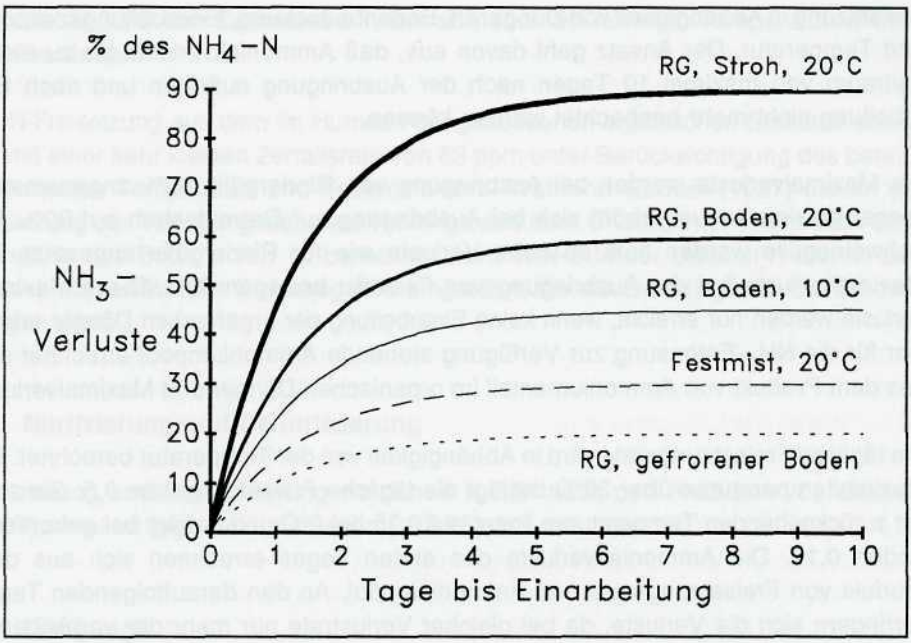

Abb. 1: Kumulative Ammoniak-Verluste in Abhängigkeit vom Einarbeitungstermin für Rindergülle (RG) und Festmist

4 Pflanze

Das Modell N-SIM enthält ein Wachstumsmodell für Winterweizen, welches in Abhängigkeit von der Sorte Biomassebildung, phänologische Entwicklung sowie Stickstoffaufnahme und -verteilung in der Weizenpflanze beschreibt. Grundlage ist das CERES-WHEAT-Modell (*Ritchie et al., 1987)*, welches entwickelt wurde, um Ertrag und Entwicklungsdauer verschiedener Weizensorten unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen überall auf der Welt schätzen zu können.

Die Dauer der einzelnen Wachstumsstadien wird im wesentlichen in Abhängigkeit von physiologisch wirksamen Temperatursummen und sortenspezifischen genetischen Faktoren berechnet. Da die benötigten genetischen Parameter für deutsche Weizensorten nicht vorliegen, wurden Algorithmen entwickelt, um diese Parameter aus den Boniturdaten der Bundessortenliste zu schätzen.

Aufgrund der Komplexität des Weizenmodells sollen im Rahmen der Dokumentation nur die Bereiche des Wachstumsmodells ausführlich erläutert werden, die im Hinblick auf die Stickstoff-Dynamik von Bedeutung sind.

4.1 Einfluß der N-Versorgung auf das Wachstum

Die Pflanze benötigt zu jedem Wachstumszeitpunkt eine bestimmte interne Stickstoffkonzentration, damit es nicht zu einer negativen Beeinflussung des Wachstums kommt. Als kritische N-Konzentration wird die Konzentration in der Pflanze mit optimalem oder fast-optimalem Wachstum definiert, d.h. höhere N-Konzentrationen führen zu keinem weiteren Anstieg des Wachstums und geringere Konzentrationen führen zu einer Wachstumshemmung. Die Berechnungen der kritischen N-Konzentrationen in den oberirdischen Pflanzenorganen erfolgen in N-SIM nach *Godwin* (1987) mit verschiedenen Gleichungen für Sommerweizen (1) und Winterweizen (2). Sommerweizen benötigt nach diesen Gleichungen im Jugendstadium deutlich höhere N-Konzentrationen als Winterweizen. Die kritische N-Konzentration in den Wurzeln liegt deutlich niedriger und errechnet sich nach Gleichung (3):

$$N\%O_{krit} = 7{,}45 + 0{,}609*\sqrt{ZS} - 1{,}79*ZS + 0{,}0934*ZS^2 \quad (1)$$

$$N\%O_{krit} = -5{,}01 + 14{,}9*\sqrt{ZS} - 6{,}35*ZS + 0{,}224*ZS^2 \quad (2)$$

$$N\%W_{krit} = 2{,}1 - 0{,}14*\sqrt{ZS} \quad (3)$$

$N\%O_{krit}$ kritische N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenorganen
$N\%W_{krit}$ kritische N-Konzentration in den Wurzeln
ZS Wachstumstadium nach Zadoks

Eine weitere wichtige Rolle spielen minimale N-Konzentrationen in der Pflanze, bei deren Erreichen ein Wachstumsstop simuliert wird. Die Kalkulation der minimalen N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenteilen ($N\%O_{min}$) erfolgt nach Gleichung (4). Für die Wurzeln wird eine minimale N-Konzentration ($N\%W_{min}$) von 75% der kritischen N-Konzentration angenommen.

$$N\%O_{min} = 2{,}97 - 0{,}455*ZS \quad (4)$$

$N\%O_{min}$ minimale N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenorganen
ZS Wachstumstadium nach Zadoks

Mit Hilfe der minimalen und kritischen N-Konzentrationen wird ein Stickstoff-Mangelfaktor (F_N) ermittelt, der im Modell als Grundlage für die Berücksichtigung von Stick-

stoff-Mangelsituationen dient. Dieser Faktor setzt die aktuelle N-Konzentration ins Verhältnis zur kritischen und minimalen N-Konzentration nach folgender Gleichung:

$$F_N = 1 - \frac{N\%O_{krit} - N\%O_{akt}}{N\%O_{krit} - N\%O_{min}} \quad (5)$$

F_N Stickstoff-Mangelfaktor
$N\%O_{krit}$ kritische N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenorganen
$N\%O_{min}$ minimale N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenorganen
$N\%O_{akt}$ aktuelle N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenorganen

Bei N-Konzentrationen über der kritischen N-Konzentration wird das Wachstum nicht positiv beeinflußt, so daß F_N in diesem Fall gleich 1 gesetzt wird. Nicht alle Wachstumsprozesse reagieren in gleicher Weise auf Stickstoff-Streß. Deshalb wird der Stickstoff-Faktor bei einzelnen Wachstumsprozessen unterschiedlich gewichtet. Das Blattwachstum reagiert weniger empfindlich auf N-Mangel, weshalb bei dieser Berechnung F_N direkt benutzt wird. Wesentlich empfindlicher reagieren dagegen Photosyntheserate, Bestockung und N-Einlagerung ins Korn auf mangelnde N-Versorgung. Bei diesen Vorgängen wird deshalb der quadratische Wert von F_N für die Kalkulationen verwendet.

4.2 N-Aufnahme der Weizenpflanze

Die im Modell N-SIM benutzte Annäherung zur Kalkulation der N-Aufnahme berechnet in Anlehnung an *Godwin* (1987) getrennt die beiden Komponenten Bedarf und Angebot und benutzt den kleineren Wert, um die aktuelle Pflanzenaufnahme zu bestimmen.

Der Pflanzenbedarf setzt sich zusammen aus dem N-Bedarf für die Versorgung von alten und neu gebildeten Pflanzenteilen. Zunächst wird der N-Bedarf einer Pflanze berechnet, der nötig ist, um die aktuelle N-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenteilen bzw. in der Wurzel nicht unter die kritischen N-Konzentrationen absinken zu lassen. Zu diesem N-Bedarf addiert sich der Bedarf für neu gebildeten Pflanzenteile. Dieser wird unter der Annahme berechnet, daß in den neugebildeten Blättern N-Gehalte in Höhe der kritischen N-Konzentration zu finden sind.

Die zweite Komponente, die Höhe des nutzbaren N-Angebots im Boden, hängt von mehreren Faktoren ab. Ein wichtiger Punkt ist die Konzentration von Nitrat und

Ammonium, die durch Ermittlung der Verfügbarkeitsfaktoren F_{NO3} und F_{NH4} in folgender Weise berücksichtigt wird:

$$F_{NO3} = 1 - EXP(-0{,}0275 * NO_{3ppm}) \quad (6)$$

$$F_{NH4} = 1 - EXP(-0{,}025 * NH_{4ppm}) \quad (7)$$

F_{NO3}	Verfügbarkeitsfaktor für Nitrat
F_{NH4}	Verfügbarkeitsfaktor für Ammonium
NO_{3ppm}	Nitratkonzentration im Boden
NH_{4ppm}	Ammoniumkonzentration im Boden

Die Koeffizienten wurden von *Godwin* (1987) empirisch ermittelt, wobei der größere Koeffizient (0,0275) die größere Mobilität von Nitrat gegenüber Ammonium abbilden soll.

Die N-Aufnahme ist stark vom Wassergehalt des Bodens abhängig. Deshalb wird auch bei der Berechnung der N-Aufnahme ein Feuchtefaktor eingeführt. Dieser nimmt bei Wassergehalten unterhalb des Permanenten Welkepunkts einen Wert von 0 an, da keine Wasseraufnahme und damit auch keine N-Aufnahme möglich ist. Mit steigenden Wassergehalten steigt $F_{Feuchte}$ linear bis zur Feldkapazität auf 1 an, da bei diesem Wassergehalt optimale Verhältnisse für die N-Aufnahme herrschen. Bis zum Erreichen des Wassergehaltes bei Wassersättigung erfolgt wieder eine lineare Reduzierung von $F_{Feuchte}$ bis auf 0, um den zunehmend anaeroben Verhältnissen und der abnehmenden Wurzelfunktion gerecht zu werden.

Die potentielle Nitrat- und Ammonium-Aufnahme aus einer Bodenschicht errechnet sich unter Berücksichtigung der Schichtdicke sowie der Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit von der Wurzellängendichte nach Gleichung (8) und (9). Dabei wird eine maximale N-Aufnahmerate von 0,006 kg N/ha und cm Wurzellänge unterstellt.

$$NO_3A_{pot} = 100 * D_{Schicht} * F_{Feuchte}^{\ 2} * F_{NO3} * L_{Wurzel} * 0{,}006 \quad (8)$$

$$NH_4A_{pot} = 100 * D_{Schicht} * F_{Feuchte}^{\ 2} * F_{NH4} * L_{Wurzel} * 0{,}006 \quad (9)$$

NO_3A_{pot}	potentielle Nitrataufnahme	$F_{Feuchte}$	Feuchtefaktor
NH_4A_{pot}	potentielle Ammonium-aufnahme	$D_{Schicht}$	Mächtigkeit der Bodenschicht
		F_{NH4}	Verfügbarkeitsfaktor für NH_4
L_{Wurzel}	Wurzellängendichte	F_{NO3}	Verfügbarkeitsfaktor für NO_3

Diese potentielle Aufnahmerate wird während der Kornfüllungsphase mit zunehmendem Pflanzenalter linear reduziert, da in diesem Wachstumsabschnitt die Wurzelfunktion deutlich abnimmt. Die potentielle N-Aufnahme (NA_{pot}) aus dem gesamten Profil entspricht der Summe der potentiellen Nitrat- und Ammonium-Aufnahmen aus den Einzelschichten. NA_{pot} reagiert deshalb auf Veränderungen der Wurzeldichte, der Ionenkonzentrationen und des Wassergehaltes.

Daher kann dieser Ansatz auch Situationen simulieren, bei denen trotz hoher Wurzeldichte und Nährstoffkonzentration in den oberen Schichten die Nährstoffaufnahme aufgrund von Trockenheit eingeschränkt ist. Die Pflanze versorgt sich dann mit Wasser aus tieferen Schichten, die aber nur geringe Mengen Stickstoff enthalten können.

Ist die errechnete potentielle N-Aufnahme geringer als der N-Bedarf der Pflanze, kann nur diese Menge aufgenommen werden. Im umgekehrten Fall wird nur der tatsächliche N-Bedarf von der Pflanze aufgenommen. Tritt Luxuskonsum auf, d.h., die aktuelle N-Konzentration in der Pflanze überschreitet die kritische N-Konzentration, kann die Wurzel organische N-Verbindungen ausscheiden (Exudation). Im Modellansatz nach *Godwin* (1987) wird angenommen, daß diese Wurzelausscheidungen täglich 5% des N-Gehaltes der Wurzeln betragen können. Dieser ausgeschiedene Stickstoff wird der frischen organischen Substanz des Bodens zugerechnet und kann deshalb schnell wieder mineralisiert und der Pflanze zugänglich gemacht werden.

4.3 Verteilung von Stickstoff in den Pflanzenorganen

Die Verteilung der Assimilate auf die einzelnen Pflanzenorgane unterliegt keinem festen, vom Entwicklungsstadium abhängigen Schema, sondern wird in Abhängigkeit von Klimabedingungen und Nährstoffversorgung berechnet.

In der Kornfüllungsphase kann z.B. bei Trockenheit oder bei fehlendem N-Angebot im Boden ein hoher N-Bedarf der Pflanze mit einer geringen N-Verfügbarkeit zusammentreffen. In diesem Fall kann der N-Bedarf der Ähren teilweise durch Remobilisierung von Eiweiß aus vegetativen Pflanzenorganen und Wurzeln gedeckt werden. Der N-Gehalt im Korn wird neben der N-Verfügbarkeit auch von den Temperaturbedingungen während der Kornfüllungsphase und von der Bodenfeuchte beeinflußt.

Die N-Einlagerung ins Korn wird im Modell N-SIM über die Berechnung einer Kornfüllungsrate für Stickstoff (R_K) simuliert. R_K (in µg N/Korn u. Tag) hängt nach Gleichung (10) von der im Wachstumsmodell berechneten pflanzenphysiologisch wirksamen Temperatur (T_{Pfl}) sowie der Maximum-, Mittel- und Minimumtemperatur des Tages ab.

$$R_K = \begin{cases} 4{,}83 - 3{,}25 * T_{Pfl} + 0{,}25 * (T_{max} - T_{min}) + 4{,}31 * T_{mit} & \text{für } T_{mit} \geq 10 \\ 0{,}483 * T_{mit} & \text{für } T_{mit} < 10 \end{cases} \quad (10)$$

R_K	Kornfüllungsrate für Stickstoff für ein einzelnes Korn
T_{Pfl}	pflanzenphysiologisch wirksame Temperatur
T_{max}	maximale Tagestemperatur
T_{min}	minimale Tagestemperatur
T_{mit}	mittlere Tagestemperatur

Dieser N-Bedarf kann nur dann aus anderen Pflanzenteilen mobilisiert und in die Ähre transportiert werden, wenn die aktuelle N-Konzentration in diesen Pflanzenteilen die kritische N-Konzentration überschreitet. Im anderen Fall wird keine N-Verlagerung aus Blatt, Halm und Wurzeln in die Ähre simuliert. Die N-Mengen oberhalb der kritischen N-Konzentration können jedoch nicht in ihrer Gesamtheit mobilisiert werden. Die labilen Anteile (NO_{labil} bzw. NW_{labil}) dieser Stickstoffpools werden in Abhängigkeit von der N-Verfügbarkeit (F_N) nach folgenden Gleichungen ermittelt:

$$NO_{labil} = (0{,}15 + (0{,}2 * F_N)) * NPool_{oben} \quad (11)$$

$$NW_{labil} = (0{,}15 + (0{,}2 * F_N)) * NPool_{wurz} \quad (12)$$

NO_{labil}	labiler N-Pool in den oberirdischen Pflanzenteilen
NW_{labil}	labiler N-Pool in den Wurzeln
$NPool_{oben}$	überschüssiger N-Pool in den oberirdischen Pflanzenteilen
$NPool_{wurz}$	überschüssiger N-Pool in den Wurzeln
F_N	N-Verfügbarkeit

Solange der N-Bedarf der Körner über den oberirdischen labilen N-Pool gedeckt werden kann, wird nur von dort Stickstoff translociert. Erst nach dessen Erschöpfung gelangt auch Stickstoff aus den Wurzeln in die Ähre. Sind beide Pools erschöpft und kann auch vom Boden kein N mehr aufgenommen werden, kann der Stickstoffgehalt der Körner nicht weiter erhöht werden.

5 Modellüberprüfung

Die Validierung des Modells erfolgte für den Zeitraum von der Ernte bis zum Frühjahr durch Vergleich gemessener und simulierter Nitratverläufe auf ausgewählten Praxisschlägen (*Engel*, 1991a). Um die Aussagekraft der Ergebnisse nicht von vorneherein

auf einen bestimmten Naturraum zu beschränken, wurden Schläge aus den verschiedensten Regionen Bayerns in die Versuchsreihe aufgenommen, wobei Unterfranken und Südbayern den Schwerpunkt bildeten. Auf den untersuchten Standorten sind zum überwiegenden Teil mittelschwere Böden zu finden. Etwa ein Viertel der Standorte sind als leichte Böden einzustufen, während nur auf 10% der Schläge schwere Böden anzutreffen sind. Ungefähr ein Drittel der Schläge wurden ausschließlich mineralisch gedüngt. Die übrigen Schläge erhielten jährlich oder in mehrjährigem Abstand zusätzlich wirtschaftseigene Düngemittel wie Gülle, Jauche oder Stallmist.

Weiterhin wurde N-SIM unter den Bedingungen leichtdurchlässiger Sandböden des nordostdeutschen Tieflandes (Standort Müncheberg) getestet (*Mirschel et al.*, 1991). Als Testdaten dienten Winterweizenversuche der Jahre 1986/87 bis 1988/89 mit Vorfrucht Kartoffeln oder Leguminosen. Für den Zeitraum Herbst bis Frühjahr ergab sich eine ausreichende Schätzgenauigkeit.

6 Ein- und Ausgabedaten

6.1 Eingabedaten

Für den Einsatz des Modells N-SIM werden folgende Eingabeparameter benötigt:

Standortdaten	essentiell	optional
• geographischer Breitengrad	x	
• Hangneigung (leicht,mittel,stark)	x	
• Exposition		x
• mittlerer Grundwasserstand		x
• Tiefe und Abstand einer Drainage		x
• Bodendaten möglichst für mehrere Schichten:		
- Mächtigkeit der Schicht	x	
- Bodenart (nach DIN)	x	
- Lagerungsdichte	x	
- Steingehalt	x	
- Organischer C-Gehalt	x	
- Organischer N-Gehalt (N_{total})	x	
- pH-Wert	x	
- Wassergehalt (Vol%) bei		
Permanentem Welkepunkt		x
Feldkapazität		x
Wassersättigung		x

Bewirtschaftungsdaten

Vorfrucht		
• Art	x	
• Ertrag	x	
• Erntetermin	x	
• Stroh bzw. Blattabfuhr (J/N)	x	
• Ernterückstände (Menge und C/N)		x
• Wurzelrückstände (Menge und C/N)		x
Zwischenfrucht		
• Art	x	
• Aussaattermin	x	
• Einarbeitungs- bzw. Erntetermin	x	
• Verwendung (eingearbeitet, abgefahren, abgefroren)	x	
• Masseentwicklung (schlecht, normal, kräftig)	x	
Hauptfrucht		
• Art (W.-Weizen oder W.-Brache)	x	
• Aussaattermin	x	
• Sorte	x	
• Saatstärke und Saattiefe	x	
• Reihenabstand	x	
Mineralische und Organische Düngung		
• Ausbringungstermin	x	
• Art	x	
• Menge	x	
• Einarbeitungstermin	x	
• Einarbeitungstiefe	x	
Bodenbearbeitung		
• Bearbeitungstermin	x	
• Bearbeitungstiefe	x	
• Bearbeitungsgerät		x
Beregnung		
• Termin und Menge	x	

Wetterdaten

Tägliche Witterungsdaten für folgende Größen:		
• Maximaltemperatur (°C)	x	
• Minimaltemperatur (°C)	x	

- Niederschlag (mm) x
- Globalstrahlung (MJ/m^2) oder
  Sonnenscheindauer (h) x

6.2 Ausgabedaten

N-SIM legt für jeden simulierten Schlag eine Ausgabedatei mit wichtigen Simulationsergebnissen an. Diese beginnt mit einem Header, der Informationen zu Betriebsnummer, Schlagnummer, Schlagname, Hauptfrucht, Vorfrucht, Simulationsdauer, Anzahl der Bodenschichten und Horizontgrenzen enthält.
Nach eventuell vorhandenen Meßwerten für Nitratgehalte im Boden folgen die Simulationsergebnisse. Für jeden Tag der Simulationsdauer werden zeilenweise folgende Informationen ausgegeben:

- Kumulative N-Aufnahme der Pflanze
- Kumulative N-Auswaschung
- Kumulative Denitrifzierung in kg/ha
- NO_3-Gehalt in allen Bodenschichten und im Gesamtprofil
- NH_4-Gehalt in allen Bodenschichten und im Gesamtprofil
- N-Mineralisierung aus Humus
- N-Mineralisierung aus Ernterückständen
- Gesamte Netto-N-Mineralisierung
- Niederschlag
- Verdunstung
- Oberirdischer Abfluß
- Sickerwasserbildung unterhalb des Bodenprofils
- Wassergehalt aller Bodenschichten
- Modellinterne Wachstumsstadien
- Blattflächenindex
- Gesamt-Biomasse
- Biomasse ohne Korn
- Kornertrag
- Triebzahl
- N-Konzentration im Sproß
- Kritische N-Konzentration im Sproß
- Kumulativer N-Entzug der vegetativen Biomasse
- Kumulativer N-Entzug durch das Korn
- Mittlere Lufttempertur
- Niederschlag
- Bodentemperatur für alle Bodenschichten

7 EDV-technische Umsetzung

Eine wichtige Zielsetzung bei der Entwicklung von N-SIM war, vorhandene Modellierungsansätze aufzugreifen und sie EDV-technisch so aufzubereiten, daß das entstehende Modell sehr benutzerfreundlich ist und auch von einem unerfahrenen PC-Benutzer eingesetzt werden kann. Die Erfassung der notwendigen Eingabedaten erfolgt über ein in der Programmiersprache COBOL erstelltes sehr benutzerfreundliches Erfassungsprogramm, das durch Verwendung von Pull-Down-Menüs, Window-Technik und Plausibilitätsprüfungen fehlerhafte Eingaben weitestgehend ausschließt. Das eigentliche Simulationsmodell ist ein Windows-Programm, welches mit Hilfe der objektorientierten Programmierumgebung Smalltalk für Windows (*Digitalk Inc.*, 1991; *Engel*, 1991d) programmiert wurde. Neben simultaner graphischer Ergebnisdarstellung bietet das Modell zahlreiche tabellarische und graphische Auswertungen, die die Transparenz der Simulationsergebnisse erhöhen und eine weitergehende Interpretation erleichtern. Die Graphikfähigkeiten von N-SIM ermöglichen die Darstellung der Veränderung folgender Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Simulationszeit:

- Nitratgehalte in verschiedenen Bodenschichten
- Kumulative N-Aufnahme durch die Pflanze
- Verlagerung von Nitrat in tiefere Bodenschichten
- Mineralisierung aus Humus und aus Ernterückständen
- Denitrifzierung
- Kumulativer Verlauf von Oberflächenabfluß, Verdunstung und Sickerwasserbildung
- Wassergehalte in verschiedenen Bodenschichten
- Triebzahl, vegetative Biomasse und Kornertrag
- Mittlere Lufttemperatur und Bodentemperatur in verschiedenen Schichten
- Niederschlagsverteilung

Zum Einsatz von N-SIM wird folgende Hard- und Software-Ausstattung benötigt:

- IBM-kompatibler Personal Computer AT (80286, 80386 oder 80486)
- 3 MB Arbeitsspeicher (sinnvoll 4-6 MB)
- VGA-Karte bzw. Super-VGA (640x480, 800x600 oder 1028x768)
- Festplatte mit mindestens 5 MB freiem Speicherplatz
- Mathematischer Koprozessor 80287 oder 80387 werden unterstützt
- Microsoft-kompatible Maus
- Microsoft-Windows 3.X
- DOS 3.1 oder höher

8 Literatur

AG Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, 1982.

Digitalk Inc. (1991): Smalltalk/V for Windows, Object-Oriented Programming System, Tutorial and Programming Handbook. Los Angeles, 1991.

Engel, Th., A. Mangstl und L. Reiner (1989a): Simulation der Stickstoffdynamik im Herbst und Winter. In: G. Geisler und W. Diepenbrock (Hrsg), Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 2, 65-68.

Engel, Th., A. Mangstl und L.Reiner (1989b): Simulation der Stickstoffdynamik nach GODWIN im Simulationsmodell CERES. In: H. Geidel und A. Mangstl (Hrsg), Referate der 10. GIL - Jahrestagung in Karlsruhe, Agrarinformatik, 16, 269-278.

Engel, Th. und L. Reiner (1990): Computer simulation of nitrogen dynamics in soil and plant. In: A. Scaife (ed), Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy, Paris, 5.-7. Dez. 1990, Colmar Cedex, Frankreich, Eigenverlag der ESA 1990, Session 2, p 02.

Engel, Th. (1991a): Entwicklung und Validierung eines Simulationsmodells zur Stickstoffdynamik in Boden und Pflanze mit Hilfe objektorientierter Programmierung. Dissertation, Weihenstephan.

Engel, Th. (1991b): Simulation der N-Dynamik im Ackerboden als Grundlage für standortgerechte Düngungsstrategien. In: J.M. Pohlmann (Hrsg) Bilanzmodell Ackerbau, Agrarinformatik 22, 52-69

Engel, Th. (1991c): Einsatz eines Stickstoff-Simulationsmodells zur Reduzierung von Nitrateinträgen in das Grundwasser. Wasser und Boden, 43, 8, 474-477

Engel, Th. (1991d): Effiziente Entwicklung landwirtschaftlicher Simulationsmodelle mit Hilfe objektorientierter Programmierung. In: H.-J. Budde et al. (Hrsg), Referate der 12. GIL - Jahrestagung in Göttingen, Agrarinformatik, 21, 383-392.

Engel, Th. (1992): Einsatz von Stickstoff-Simulationsmodellen in der Düngeberatung - Funktionsweise, Möglichkeiten und Grenzen. In: R. Ackmann et al. (Hrsg), Referate der 13. GIL - Jahrestagung in Gießen, Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, 3, 47-52.

Engel, Th. und Ch. Mainka (1992): Ersetzen Computer bald den Bohrstock? DLG-Mitteilungen/agrar•inform, 107, 1, 20-22.

Godwin, D.C. (1987): Simulation of nitrogen dynamics in wheat cropping systems. Dissertation, University of New England.

Jones, C.A. and J.R. Kiniry (1986): CERES-Maize - A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press.

Mirschel, W., K.-O. Wenkel und Th. Engel (1991): Überprüfung und Eignung des Stickstoffsimulationsmodells N-SIM für die Prognose des Boden-Nitratgehaltes im Frühjahr sowie des Restnitratgehaltes zur Ernte auf grundwasserfernen Sandstandorten Nordostdeutschlands. In: H.-J. Budde et al., Referate der 12. GIL - Jahrestagung in Göttingen, Agrarinformatik, 21, 325-338.

Ritchie, J.T., D.C. Godwin and S. Otter-Nacke (1987): CERES-WHEAT - A simulation model of wheat growth and development. Unveröffentlichtes Manuskript zur Beschreibung des Modells.

Rohmann, U. und H. Sontheimer (1985): Nitrat im Grundwasser - Ursachen, Bedeutung, Lösungswege. Karlsruhe.

Stadelmann, F. X., O. J. Furrer, S. K. Gupta und P. Lischer (1983): Einfluß von Bodeneigenschaften, Bodennutzung und Bodentemperatur auf die N-Mobilisierung von Kulturböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 146, 228-242.

Williams, J. R., C. A. Jones and P. T. Dyke (1984): EPIC, The Erosion-Productivity Impact Calculator, Volume I., Model documentation, Chapter 1, The EPIC Model. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Temple, Texas.