Die Stickstoffaufnahme durch Pflanzen im N-Modell HERMES

Kurt-Christian Kersebaum, Müncheberg

Zusammenfassung

Aus dem N-Modell HERMES wird der Modellbereich zur Simulation von Pflanzenwachstum und N-Aufnahme näher beschrieben. Im vorliegenden Modellansatz wird die Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen im wesentlichen durch drei Komponenten bestimmt: den N-Bedarf als Differenz zwischen aktuellen N-Gehalt zu einem pflanzenentwicklungsabhängigen maximalen N-Gehalt, der maximalen täglichen N-Aufnahme pro cm Wurzellänge sowie dem N-Angebot durch konvektiven und diffusiven Antransport von Nitrat im Boden. Die Wurzellänge und Verteilung spielt dabei eine entscheidene Rolle. Aufgrund der simulierten Wurzellänge ergibt sich eine maximale tägliche N-Aufnahme von ca. 7 kg N/ha zur Zeit der Blüte. Im Oberboden sind durch die hohe Wurzeldichte auch bei geringen Wassergehalten nur ca. 6 kg N/(ha*10 cm) notwendig, um durch rein diffusiven Antransport die maximale N-Aufnahme zu erreichen. Lediglich im Unterboden kann es bei geringen Wurzeldichten in Trockenphasen zu einer Einschränkung der N-Aufnahme kommen.

1. Einleitung

Eine am Pflanzenbedarf ausgerichtete Stickstoffdüngung ist sowohl im Hinblick auf eine hohe Düngereffizienz als auch hinsichtlich einer Verringerung des Nitratauswaschungsrisikos anzustreben. Dies bedeutet, daß über den zeitlichen Verlauf von N-Angebot aus dem Boden einerseits sowie des N-Bedarfs der Pflanze auf der anderen Seite möglichst genaue Vorstellungen bestehen müssen.

Mit Hilfe von Simulationsmodellen wird seit einigen Jahren versucht, die N-Dynamik im System Boden-Pflanze zu beschreiben, um damit ein Instrument zu entwickeln, welches N-Angebot und N-Bedarf in Abhängigkeit von Boden-, Bewirtschaftungs- und Witterungseinflüßen zueinander in Beziehung setzt und durch Düngung zu ergänzende Defizite ausweist.

Im Modell HERMES (*Kersebaum,* 1989) werden basierend auf täglichen Witterungsdaten simultan die Prozesse der N-Mineralisation, der Denitrifikation, der Wasserhaushalt, der Transport von Nitrat im Bodenprofil sowie Wachstum und N-Aufnahme durch Winterweizen simuliert. Im folgenden sollen die Modellprinzipien, die die N-Aufnahme durch die Pflanze abbilden, näher beleuchtet werden.

2. Wachstum und N-Bedarf

Das Modul für das Pflanzenwachstum simuliert auf der Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die Nettotrockenmassebildung als Resultat von Photosynthese und Atmung.

Grundlage für das Modell ist das Modell SUCROS von *van Keulen et al.* (1982). Der Blattflächenindex stellt die Schnittstelle zwischen Pflanze und Atmosphäre dar. Er wird unter Verwendung eines konstanten Verhältnisses von Blattfläche zu Blattgewicht von 0.002 ha/kg TM (*Aase*, 1978) aus dem Blattgewicht berechnet. Die Lichtinterception im Bestand wird in Abhängigkeit vom Blattflächenindex durch ein Gleichungssystem von *Goudriaan* (1982) beschrieben.

Die Aufteilung der assimilierten Kohlenstoffverbindungen auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane erfolgt in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanze (Abb. 1). Die Verteilungskoeffizienten wurden aus Angaben von *Weir et al.* (1984) sowie *Groot* (1987) abgeleitet.

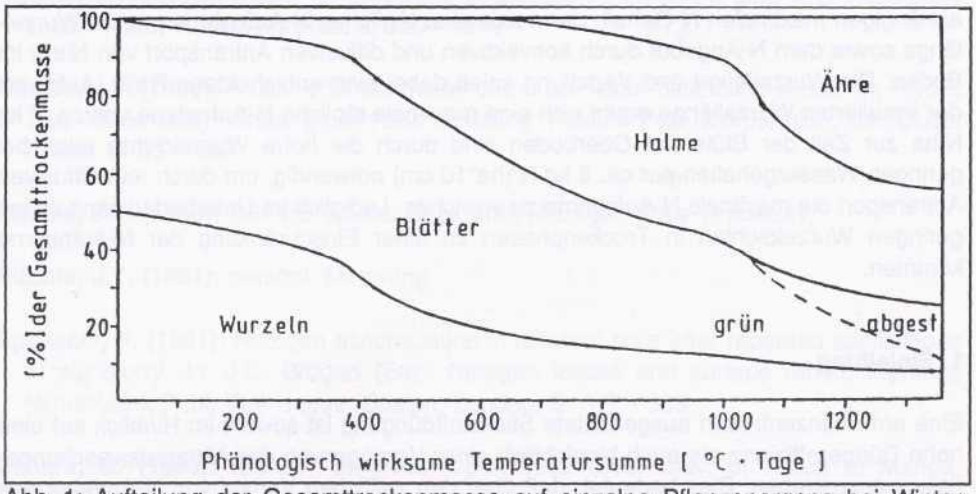

Abb. 1: Aufteilung der Gesamttrockenmasse auf einzelne Pflanzenorgane bei Winterweizen in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung

Die Entwicklung des Winterweizens wird in Anlehnung an einen Modellansatz von *Weir et al.* (1984) simuliert. Für die Zeit zwischen Aussaat und Auflaufen wird, ausreichende Bodenfeuchte vorausgesetzt, eine Temperatursumme von 148 °C (T > 1 °C) benötigt. In einer zweiten Phase zwischen Auflaufen und Doppelringstadium wird die Entwicklung neben der Temperatur zusätzlich durch die Tageslänge und die Erfüllung der Vernalisationsansprüche gesteuert. Die Temperatursumme wird um entsprechende Tageslängen- und Vernalisationsfaktoren zu einer "phänologisch wirksamen Temperatursumme" modifiziert. Zwischen Doppelringstadium und Blüte wirkt nur noch die Tageslänge modifizierend auf die phänologisch wirksame Temperatursumme, wohingegen zwischen Blüte und Abreife nur die Temperatursumme oberhalb 9 °C entwicklungsbestimmend ist. Der N-Bedarf zu einem Zeitpunkt ergibt sich aus der bis dahin simulierten Pflanzentrockenmasse und der Differenz zwischen dem aktuellen N-Gehalt in der Pflanze und

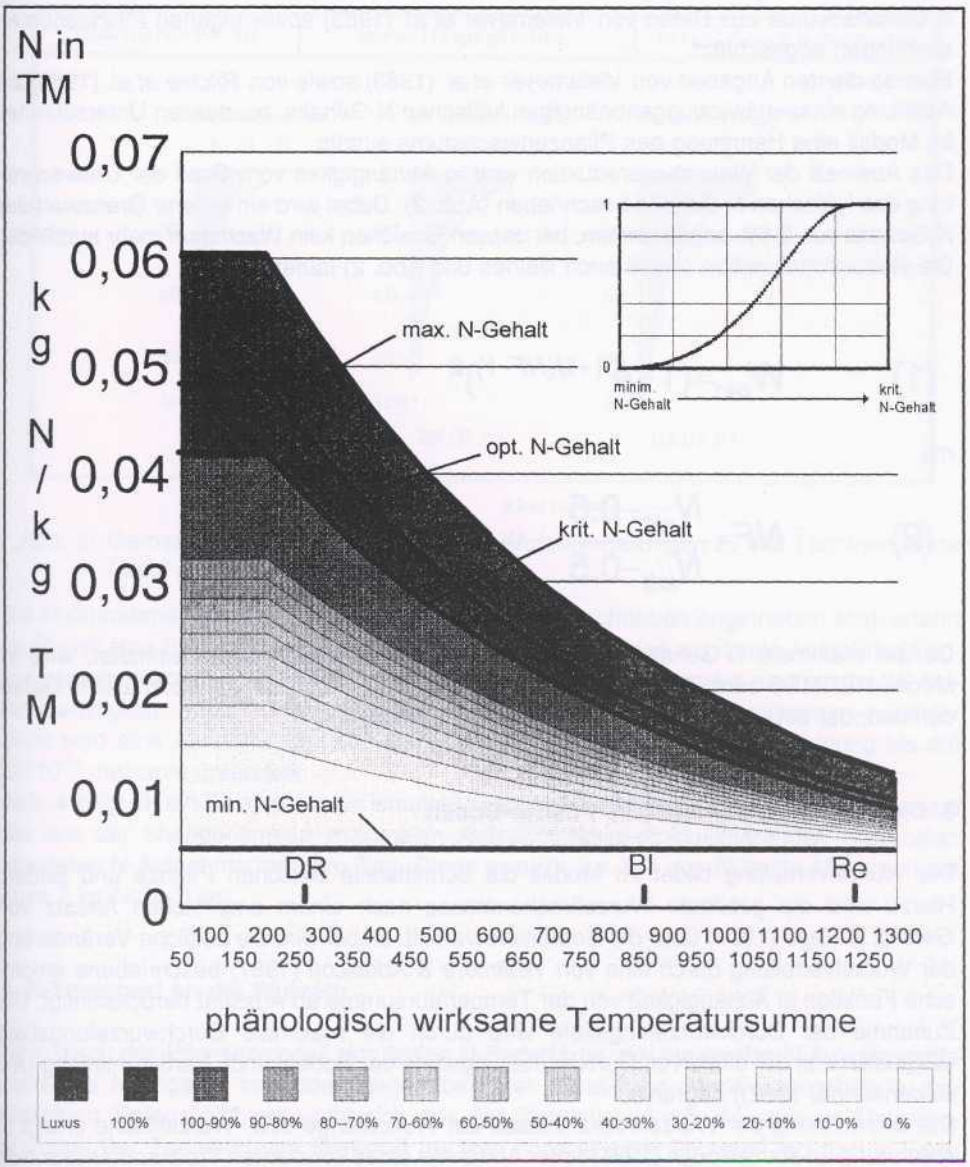

Abb. 2: Kritischer, optimaler und maximaler N-Gehalt in der oberirdischen Trockenmasse in Abhängigkeit vom Entwicklungszustand bei Winterweizen sowie Zonen verschiedener Wachstumshemmung (Kleines Bild: Reduktionsfunktion Gl. 1 u. 2)

einem entwicklungsabhängigen maximalen N-Gehalt (Abb. 2). Der Verlauf des maximalen N-Gehalts wurde aus Daten von *Vielemeyer et al.* (1983) sowie eigenen Pflanzenuntersuchungen abgeschätzt.
Ebenso dienten Angaben von *Vielemeyer et al.* (1983) sowie von *Ritchie et al.* (1989) zur Ableitung eines entwicklungsabhängigen kritischen N-Gehalts, bei dessen Unterschreiten im Modell eine Hemmung des Pflanzenwachstums eintritt.
Das Ausmaß der Wachstumsreduktion wird in Abhängigkeit vom Grad der Unterschreitung des kritischen N-Gehalts beschrieben (Abb. 2). Dabei wird ein unterer Grenzwert des N-Gehalts von 0.5% angenommen, bei dessen Erreichen kein Wachstum mehr stattfindet. Die Reduktionsfunktion (siehe auch kleines Bild Abb. 2) lautet:

$$(1) \qquad W_{red} = (1 - e^{1+1/(NF-1)})^2$$

mit

$$(2) \qquad NF = \frac{N_{akt} - 0.5}{N_{krit} - 0.5}$$

Da der maximale N-Gehalt bereits einen gewissen Luxuskonsum beinhaltet, wird im Modell HERMES zum Zweck der N-Bedarfsprognose zusätzlich ein optimaler N-Gehalt definiert, der ein ungehemmtes Wachstum ermöglicht.

3. Die Wurzel als Schnittstelle Pflanze-Boden

Die Wurzelverteilung bildet im Modell die Schnittstelle zwischen Pflanze und Boden. Hierzu wird die gebildete Wurzeltrockenmasse nach einem empirischen Ansatz von *Gerwitz & Page* (1974) über die Bodentiefe verteilt. Dabei wird die zeitliche Veränderung der Wurzelverteilung durch eine von *Whitmore & Addiscott* (1987) beschriebene empirische Funktion in Abhängigkeit von der Temperatursumme ab Aussaat berücksichtigt. Die Zunahme der Durchwurzelungstiefe wird durch die maximale Durchwurzelungstiefe (abgeleitet aus der effektiven Durchwurzelungstiefe der Bodenkundl. Kartieranleitung (*AG Bodenkunde,* 1982)) begrenzt.
Die Umrechnung der Wurzeltrockenmasse auf Wurzellänge bzw. Wurzelfläche erfolgt in Anlehnung an *Barraclough* (1986) unter Annahme eines konstanten Trockenmasseanteils von 7%, eines spezifischen Gewichts der Wurzelfrischmasse von 1 g/cm^3 und eines mittleren Wurzelradius r_w von 0.015 cm. Einen Vergleich von gemessenen und simulierten Wurzelverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten zeigt Abb. 3 am Beispiel eines Datensatzes aus den Niederlanden (*Groot & Verberne,* 1991).

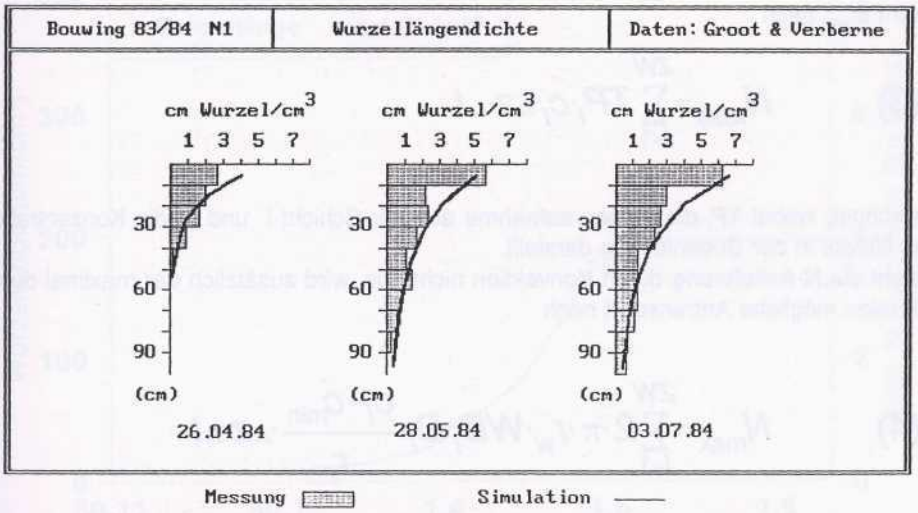

Abb. 3: Gemessene und simulierte (Kurven) Wurzelverteilungen zu drei Terminen (Daten: *Groot & Verberne*, 1991)

Die N-Aufnahme, die durch den N-Bedarf wie oben beschrieben angetrieben wird, erfährt im Modell eine Begrenzung dadurch, daß für die Wurzeln eine maximale Aufnahmefähigkeit pro cm Wurzellänge definiert wird. Für die Zeit bis zur Blüte wird eine maximale Aufnahmefähigkeit von $30*10^{-14}$ mol/cm Wurzel/s (*Barraclough*, 1986) angenommen, nach der Blüte wird eine Abnahme der Aufnahmefähigkeit mit zunehmender Entwicklung bis auf $23*10^{-14}$ mol/cm/s unterstellt.

Abb. 4 zeigt für ein Beispiel für die simulierte Gesamtwurzellänge in einem Lößboden und die aus der obengenannten maximalen Aufnahmefähigkeit resultierenden maximalen absoluten N-Aufnahmeraten pro Tag. Diese erreicht zur Zeit der Blüte ihr Maximum mit etwa 7 kg N/(ha*Tag).

4. N-Transport an die Wurzeln

Dem durch das Pflanzenmodell simulierten N-Bedarf bzw. der maximalen N-Aufnahmerate steht das N-Angebot im Boden gegenüber. Der Nitrat- und der Wassergehalt in den einzelnen Tiefenschichten ergibt sich aus der Simulation durch die anderen Unterprogramme. Der Transport von Stickstoff (es wird mineralischer Stickstoff lediglich in Form von Nitrat angenommen) erfolgt durch Konvektion mit dem Transpirationsstrom sowie durch Diffusion.

In einem vereinfachten Ansatz wird zunächst die N-Anlieferung durch den Transpirationsstrom N_{mas} nach

$$(3) \qquad N_{mas} = \sum_{i=1}^{ZW} TP_i \cdot c_i \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

berechnet, wobei TP_i die Wasseraufnahme aus der Schicht i und C_i die Konzentration des Nitrats in der Bodenlösung darstellt.
Reicht die N-Anlieferung durch Konvektion nicht aus, wird zusätzlich der maximal durch Diffusion mögliche Antransport nach

$$(4) \qquad N_{max} = \sum_{i=1}^{ZW} 2 \cdot \pi \cdot r_w \cdot WD_i \cdot D_i \cdot \frac{c_i - c_{min}}{r_i} \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

berechnet, mit der Durchwurzelungstiefe **ZW**, der Wurzellängendichte $\mathbf{WD_i}$ der betreffenden Schicht i und $\mathbf{D_i}$ dem scheinbaren Diffusionskoeffizienten. Dabei ist $\mathbf{r_i = (\pi\ WD_i)^{-0.5}}$ die halbe Distanz zwischen benachbarten Wurzeln bei Annahme einer gleichförmigen Verteilung. Hierdurch wird angenommen, daß der Wurzel Nährstoffe aus einem Bodenzylinder mit dem Radius $\mathbf{r_i}$ zur Verfügung stehen. Der maximale Konzentrationsgradient ergibt sich aus der aktuellen Konzentration in der Bodenlösung und einer angenommenen Minimalkonzentration $\mathbf{c_{min}}$ an der Wurzeloberfläche von 1 µmol/l (*Hagin et al.*, 1984). Liegt die maximale Anlieferung unter dem noch zu deckenden Bedarf, ist die aktuelle Aufnahme je Kompartiment gleich der maximalen Anlieferung, anderenfalls wird die Aufnahme zur Deckung des Pflanzenbedarfs entsprechend dem Anteil der Kompartimentdiffusion am gesamten maximalen Diffusionsantransport über die Durchwurzelungstiefe auf die Schichten verteilt.
Der Diffusionskoeffizient D wird für jeden Zeitschritt in Abhängigkeit vom Wassergehalt nach *Olsen & Kemper* (1968) berechnet. Daraus ergibt sich, daß bei abnehmendem Wassergehalt der für die maximale N-Aufnahme pro cm Wurzel notwendige N_{min}-Gehalt ansteigt. Abb. 5 zeigt diesen Sachverhalt für eine simulierte Wurzelverteilung im Löß Anfang Juni. Obwohl bei abnehmendem Wassergehalt die Lösungskonzentration bei gleichbleibendem N_{min}-Gehalt ansteigt, wird dieser Effekt durch den abnehmenden Diffusionskoeffizienten überkompensiert. So sind vor allem bei geringen Wurzeldichten von etwa 0.3 cm Wurzel/cm^3, wie sie im Unterboden vorkommen, für die maximale N-Aufnahme pro cm Wurzel bei rein diffusivem Transport N_{min}-Gehalte von 40-50 kg N/ha im Bereich des permanenten Welkepunkts notwendig. Bei den hohen Wurzellängendichten im Oberboden sind selbst bei diesen geringen Wassergehalten lediglich N_{min}-Gehalte von 6 kg N/(ha*10cm) erforderlich.

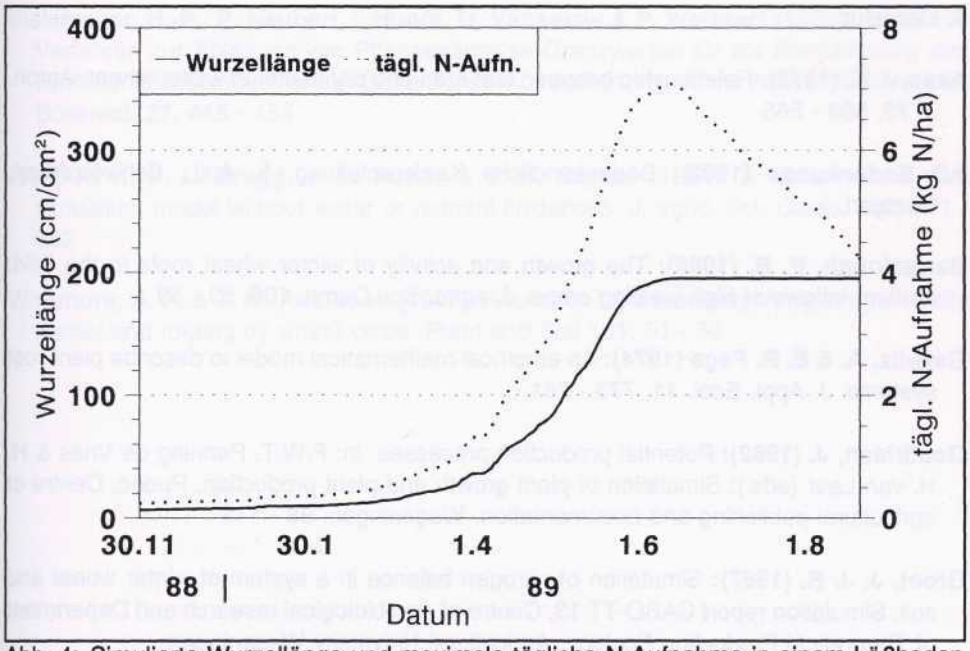

Abb. 4: Simulierte Wurzellänge und maximale tägliche N-Aufnahme in einem Lößboden

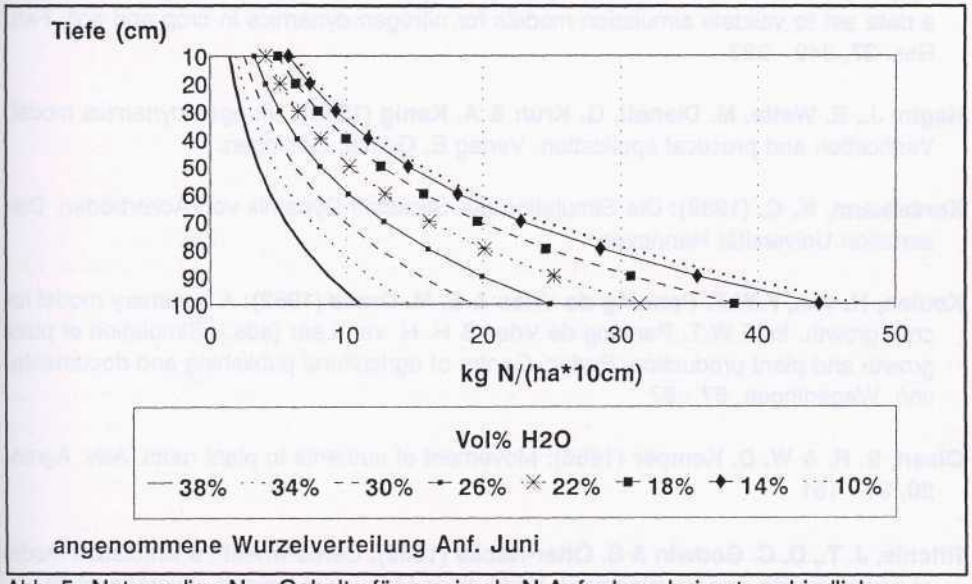

Abb. 5: Notwendige N_{min}-Gehalte für maximale N-Aufnahme bei unterschiedlichen Wassergehalten (nur Diffusionstransport)

5. Literatur

Aase, J. K. (1978): Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat. Agron. J. **70**, 563 - 565

AG Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.

Barraclough, P. B. (1986): The growth and activity of winter wheat roots in the field: nutrient inflows of high yielding crops. J. agric. Sci. Camb. **106**, 53 - 59

Gerwitz, A. & E. R. Page (1974): An empirical mathematical model to describe plant root systems. J. Appl. Ecol. **11**, 773 - 781

Goudriaan, J. (1982): Potential production processes. In: F.W.T. Penning de Vries & H. H. van Laar (eds.): Simulation of plant growth and plant production. Pudoc, Centre of agricultural publishing and documentation, Wageningen, 98 - 113

Groot, J. J. R. (1987): Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. Simulation report CABO-TT **13**, Centre of agrobiological research and Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University Wageningen.

Groot, J. J. R. & E. L. J. Verberne (1991): Response of wheat to nitrogen fertilization, a data set to validate simulation models for nitrogen dynamics in crop and soil. Fert. Res. **27**, 349 - 383

Hagin, J., E. Welte, M. Dianati, G. Kruh & A. Kenig (1984): Nitrogen dynamics model. Verification and practical application. Verlag E. Goltze, Göttingen.

Kersebaum, K. C. (1989): Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden. Dissertation Universität Hannover

Keulen, H. van, F.W.T. Penning de Vries & 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 agricultural publishing and documentation, Wageningen, 87 - 97

Olsen, S. R. & W. D. Kemper (1968): Movement of nutrients to plant roots. Adv. Agron. **20**, 91 - 151

Ritchie, J. T., D. C. Godwin & S. Otter-Nacke (1989): Ceres-wheat - a simulation model of wheat growth and development. Vorläufiges Manuskipt bislang unveröffentlicht.

Vielemeyer, H.-P., P. Neubert, I. Hundt, G. Vanselow & P. Weissert (1983): Ein neues Verfahren zur Ableitung von Pflanzenanalyse-Grenzwerten für die Einschätzung des Ernährungszustandes landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd. **27**, 445 - 453

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

Whitmore, A. P. & T. M. Addiscott (1987): A function for describing nitrogen uptake, dry matter and rooting by wheat crops. Plant and Soil **101**, 51 - 60