

2 Modellvergleich

Entsprechend der Zielstellung dieser Studie wurden nur deterministische Stickstoffmodelle in den Vergleich einbezogen. Dabei handelt es sich größtenteils um komplexe Modelle, die sich neben der Simulation der N-Dynamik im Boden und in der Pflanze auch mit der Abbildung der einflußnehmenden Prozesse wie Wärme- und Feuchtehaushalt beschäftigen.

Die folgende Aufstellung beinhaltet alle analysierten Modelle mit Namen, Bedeutung des Namens und Autoren. Falls für ein Modell kein expliziter Name vorhanden ist, wird es nach seinem Autor benannt. Es ist jeweils eine wichtige Literaturquelle zu jedem Modell angegeben.

ADDISCOTT	Computer Simulation of Changes in Soil Mineral Nitrogen and Crop Nitrogen Addiscott, T.M. and A.P. Whitmore (1987)
ANIMO	<u>A</u> gricultural <u>N</u> itrogen <u>M</u> odel Berghuis-van Dijk, J.T., P.E. Rijtema, and C.W.J. Roest (1985)
BAMO2	<u>B</u> asis <u>m</u> odell Boden (Version <u>2</u>) Klöcking, B. (1991)
CABON	Modelling of water and nitrogen cycles in the soil Cabon, F. (1991)
CANDY	<u>C</u> arbon <u>N</u> itrogen <u>D</u> ynamics Franko, U. (1989)
CERES	<u>C</u> rop <u>E</u> stimation through <u>R</u> esource and <u>E</u> nvironment <u>S</u> ynthesis Ritchie, J.T. et al. (1991)
CREAMS	A Field Scale Model for <u>C</u> hemicals, <u>R</u> unoff and <u>E</u> rosion from <u>A</u> gricultural <u>M</u> anagement <u>S</u> ystems Knisel, W.G. (1980)
DAISY	Danish Simulation Model for Transformation and Transport of Matter and Energy in the Soil Plant Atmosphere System Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen and H. Svendsen (1990)

DEMETER	Agro-Ökosystemmodell Winterweizen Matthäus, E. et al. (1992)
EPIC	<u>E</u> rosin <u>P</u> roduction <u>I</u> mpact <u>C</u> alculator Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke (1984):
GRANT	Agroecosystem simulation model Grant, R. F. (1991)
HERMES	Simulationsmodell zur Stickstoffdynamik Kersebaum, K.-C. (1989)
LAFOLIE	Lafolie, F. (1991)
LEACHN	<u>L</u> eaching Estimation and <u>N</u> itrogen Model Hutson, J.L. and R.J. Wagenet (1992)
LONFAS	<u>L</u> eaching of <u>N</u> itrate from <u>A</u> gricultural <u>S</u> oils Barraclough, D. (1989)
NLEAP	<u>N</u> itrogen <u>L</u> eaching <u>P</u> rogramm Shaffer, M.J., A.D. Halvorson and F.J. Pierce (1991)
N-SIM	<u>N-S</u> imulationsmodell Engel, Th. (1991)
NTRM	<u>N</u> itrogen <u>T</u> illage <u>R</u> esidue <u>M</u> anagement Shaffer, M.J. and W.E. Larson (1987)
NWHEAT	<u>N</u> itrogen Balance in a Winter <u>W</u> heat- <u>S</u> oil System Groot, J.J.R. (1987)
RENLEM	<u>R</u> egional <u>N</u> itrogen <u>L</u> eaching <u>M</u> odel Kragt, J.F. and W. de Vries (1989)
SOIL/ SOILN	<u>S</u> oil <u>N</u> itrogen Jansson, P.-E. (1991), Johnsson, H. et al. (1987)
SWATNIT	<u>S</u> oil <u>W</u> ater <u>A</u> ctual <u>T</u> ranspiration and <u>N</u> itrogen Model Vereecken, H., M. Vanclooster and M. Swerts (1990)

WHNSIM Water, Heat and Nitrogen Simulation Model
Huwe, B. (1992)

In den folgenden Kapiteln (2.1 bis 2.4) sind die wichtigsten Informationen über Zielstellung, Struktur und die Prozeßformulierungen dieser Modelle in Form eines kurzen Überblicks dargestellt.

Literatur

Addiscott, T.M. and A.P. Whitmore (1987): Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. Journal of Agricultural Science, Cambridge, 109, 141-157.

Barraclough D. (1989): A usable mechanistic model of nitrate leaching. I. The Model. Journal of Soil Science, 40, 543-554.

Berghuijs-van Dijk, J.T., P.E. Rijtema and P.E. Roest (1985): ANIMO. Agricultural Nitrogen Model. Wageningen, December 1985, ICW-nota 1671.

Cabon, F. (1991): Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas. Fertilizer Research, 27, 161-169.

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

Franko, U. (1989): C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanzen im Boden. Dissertation B (Habilitationsschrift), AdL der DDR, Berlin, 140 S.

Grant, R.F. (1991): The distribution of water and nitrogen in the soil-crop system: a simulation study with validation from a winter wheat field trial. Fertilizer Research, 27, 199-213.

Groot, J.J.R. (1987): Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. Simulation Report CABO-TT nr. 13, Wageningen.

Hansen, S., H.E. Jensen, N.E Nielsen and H. Svendsen (1990): DAISY - Soil plant atmosphere system model. NPO-Research Report No. A 10, The National Agency of Environmental Protection, Copenhagen, Denmark, 272 p.

- Hutson, J.L. and R.J. Wagenet (1992):** LEACHM: Leaching Estimation And Chemistry Model: A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3.0. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, Research Series No. 93-3, Cornell University, Ithaca, New York.
- Huwe B. (1992):** WHNSIM: Ein Modell zur Simulation des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher Nutzung. Version 2.0 Programmdokumentation. Universität Bayreuth, Bodenkunde und Bodenphysik, Bayreuth, 108 p.
- Jansson, P.-E. (1991):** Simulation model for soil water and heat conditions, Description of the SOIL model, Swedish University of Agricultural Science, Dep. of Soil Sci., Report 165, Uppsala, 72 p.
- Johnsson, H., L. Bergström and P.-E. Jansson (1987):** Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 18, 333-356.
- Kersebaum, K.Ch. (1989):** Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden. Dissertation, Universität Hannover.
- Klößing, B. (1991):** Ein Modell zur Beschreibung des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushaltes im Boden unter besonderer Berücksichtigung des Winterzeitraumes. Dissertation, TU Dresden, 135 S.
- Knisel, W.G. (1980):** CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture, Conservation research Report, 26, 640 p.
- Kragt, J.F. en W. de Vries (1989):** A simulation model for predicting nitrate leaching on a regional scale, In: *Proceedings of the 5th International Symposium of CIEC* (Welke, E.; Szabolcs, I. eds.), 231-237.
- Lafolie, F. (1991):** Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non equilibrium and optimization of root water potential. *Fertilizer Research*, 27, 215-231.
- Matthäus, E., T. Kartschall, C. Frühauf, S. Grossmann und F. Wechsung (1992):** The agroecosystem model winter wheat DEMETER. Forschungsbericht, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Ritchie, J.T. (1991): Wheat phasic development. In: Hanks, J. and J.T. Ritchie (eds), Modelling plant and soil systems, 31-54.

Shaffer, M.J. and W.E. Larson (eds.) (1987): NTRM, a soil- crop simulation model for nitrogen, tillage and crop-residue management. U.S. Department of Agriculture and Conservation Research, Report 34-1.

Shaffer, M.J., A.D. Halvorson and F.J. Pierce (1991): Nitrate Leaching and Economic Analysis Package (NLEAP): Model Description and Application. In: Follett, R.F., D.R. Keeney and R.M. Cruse (eds.), Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability. Madison, Wisconsin, USA, 13, 285-322.

Vereecken, H, M. Vanclooster and M. Swerts (1990): A model for estimation of nitrogen leaching with regional applicability. In: Merckx R., H. Vereecken and K. Vlassak (eds) Fertilizer and the environment. Proceedings of the International Congress on Fertilizer and the environment, Leuven Academic Press, Leuven, 250-263.

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, 5-104.

2.1 Allgemeine Informationen zu Modellen der Stickstoffdynamik

Bei allen Modellen handelt es sich um sogenannte deterministische, erklärende Modelle. Der Grad der Auflösung der einzelnen Prozesse im Boden und in der Pflanze ist je nach Modellziel unterschiedlich hoch.

Tabelle 1 enthält die wichtigsten Informationen über die Modelle hinsichtlich der in ihnen realisierten örtlichen und zeitlichen Auflösung, der Programmiersprache und ihren Anforderungen an die Rechner-Hardware. Die in der Tabelle benutzten Kürzel sind im folgenden unter der jeweiligen Spaltenüberschrift erklärt.

Ortbezug

Die untersuchten Modelle führen in der Regel nur eindimensionale Berechnungen durch. Es wird zumeist angenommen, daß die Bodenoberfläche eben ist. Das bedeutet, daß laterale Flüsse vernachlässigbar sind. Sofern flächenhafte Aussagen gemacht werden, beruhen diese auf der Kopplung eindimensionaler Ergebnisse unter Verwendung unterschiedlicher Aggregierungsverfahren.

Punkt	homogene Fläche z.B. Feld
Region	aus mehreren Feldern zusammengesetztes heterogenes Gebiet z.B. Wassereinzugsgebiet

Zeitraum

Der durch die Modelle abgedeckte Simulationzeitraum reicht von kurzen Perioden (z.B. Simulation der N-Verlagerung in den Wintermonaten) bis zu langjährigen Anwendungen. Die Mehrzahl der Anwendungen zielen jedoch auf die Abbildung der Prozesse für eine Vegetationsperiode bzw. ein Vegetationsjahr. Mit den meisten der für längere Zeiträume (Vegetationsjahr) konzipierten Modelle lassen sich auch kürzere Abschnitte (Monate) simulieren. Nur mit dem Modell RENLEM ist das auf Grund der Zeitschrittweite nicht möglich.

Zeitschritt

Der angegebene Zeitschritt (Stunde, Tag, Halbjahr) bezieht sich ausschließlich auf den notwendigen Dateninput (v.a. Wetterdaten). Modellintern können Berechnungen auch mit einer engeren Schrittweite durchgeführt werden. So wird die numerische Lösung der Richardsgleichung zur Berechnung des Wasserflusses oft mit variabler Zeitschrittsteuerung vorgenommen.

Boden

Die Grundannahme der meisten Modelle besteht darin, daß der Boden starr ist. Der Boden kann also hinsichtlich seines Fließ-, Speicher- und Transformationsverhaltens wie ein Festkörper behandelt werden. Das bedeutet, daß alle mit dem Wurzelwachstum, der Bodenbearbeitung und sonstigen Prozessen verbundenen Veränderungen des Bodens und deren Auswirkungen auf die einzelnen Parameter nicht berücksichtigt werden können.

Alle Modelle setzen außerdem ein isotropes Verhalten des Bodens voraus. Das heißt, seine Eigenschaften, wie z. B. die hydraulische Leitfähigkeit, sind in allen Richtungen gleich.

Die meisten Modelle teilen den heterogenen Boden in horizontale, in sich homogene Schichten ein.

Als obere Randbedingung zur Beschreibung der Prozesse in diesem System aus Boden und Pflanze werden bei Brache die Verhältnisse an der Bodenoberfläche und bei Bewuchs die Bedingungen im Bestand gesetzt. Als untere Randbedingung werden zumeist die Verhältnisse in einer definierten Tiefe gewählt. Die Wahl dieser Tiefe ist entweder variabel oder kann durch den Grundwasserspiegel oder die maximale Durchwurzelungstiefe charakterisiert werden.

Schichtanzahl

Die Wahl der Anzahl der simulierten Bodenschichten wird zumeist dem Modellanwender überlassen. Dabei ist häufig aus rechentechnischen Gründen die Anzahl auf einen Maximalwert begrenzt. In einigen Modellen ist nur eine der beiden Größen variabel, entweder die Schichtanzahl oder die Mächtigkeit. Die zweite wird durch die Wahl der ersten bestimmt.

Schichtmächtigkeit

In der Mehrzahl der Modelle wird mit variabler Schichtmächtigkeit in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften gearbeitet. Einige Modelle basieren auf einer für das gesamte Bodenprofil konstanten Schichtdicke. In der Tabelle 1 wird deshalb zur Charakterisierung zwischen folgenden Möglichkeiten unterschieden:

- variabel
- variabel (von Anzahl abhängig)
- konstant, frei wählbar
- konstant, d = Schichtmächtigkeit in cm

Programmiersprache

Der überwiegende Teil der untersuchten Modelle wurde in FORTRAN programmiert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im wissenschaftlichen Bereich v.a. an Hochschulen noch immer überwiegend mit FORTRAN gearbeitet wird. Erst in jüngster Zeit werden auch neuere Sprachen wie C oder das objektorientierte SMALLTALK verwendet.

Zur Programmierung eines benutzerfreundlichen Programms zur Dateneingabe und Datenspeicherung werden entweder Datenbanksysteme wie CLIPPER, DBASE und FOXPRO oder prozedurale Sprachen wie COBOL benutzt.

Neuere Programme enthalten teilweise eine graphische Benutzer-Oberfläche z.B. zur graphischen Ausgabe von Simulationsergebnissen. Diese wurde meist mit Hilfe von C programmiert.

Rechner / Arbeitsspeicher

Die Mehrzahl der Modelle kann auf IBM-kompatiblen Personal-Computern mit 640 kB RAM eingesetzt werden. Bei komplexen Modellen führt dies jedoch oft zu einer unbefriedigenden Rechenzeit, so daß die Nutzung eines PC's mit einem 486er Prozessor und einem Hauptspeicher (RAM) von 4 MB und mehr empfohlen wird. Einige Modelle sind auf mehreren Recherebenen verfügbar (PC, Unix-Workstation, Großrechner).

Tab. 1: Allgemeine Angaben zu den Modellen

MODELL	Ortsbezug	Zeitraum	Zeitschritt	Boden	Schichtanzahl	Schichtmächtigkeit	Programmiersprache	Rechner/Arbeitsspeicher
ADDISCOTT	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	unterschiedliche Angaben		Basic	PC
ANIMO	Punkt Region	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag oder länger	starr isotrop heterogen	maximal=100	variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC bzw. DIGITAL/VAX-Rechner 1.5-2 MB RAM
BAMO/BAMO2	Punkt	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	maximal = 30	variabel	Fortran IV und Fortran 77 Clipper	IBM-kompatibler PC bzw. VAX-Rechner, Großrechner
CABON	Punkt Region	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	unbekannt	unbekannt
CANDY	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	konstant n = 20	konstant d = 10 cm	Turbo Pascal FoxPro	IBM-kompatibler PC 512 kB RAM
CERES	Punkt	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC 640 kB RAM
CREAMS	Punkt Region	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	konstant n = 7 oder n = 2	bei n = 7: d ₁ = 1/36 d ₂ = 5/36 d ₃₋₇ = 1/6 bei n = 2: Oberflächen- u. Wurzelzone	Fortran 77	unterschiedliche Rechnerebenen

MODELL	Ortsbezug	Zeitraum	Zeitschritt	Boden	Schichtanzahl	Schichtmächtigkeit	Programmiersprache	Rechner/Arbeitspeicher
DAISY	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag, 1 Stunde	starr isotrop heterogen	max. 4 Horizontale und 40 Schichten	variabel	Fortran 77 Turbo Pascal	IBM-kompatibler PC 640 kB RAM
DEMETER	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	maximal = 30	variabel	Fortran 77 SONCHES	IBM-kompatibler PC, Workstation
EPIC	Punkt Region	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	konstant n = 10	1. Schicht konst. d = 1 cm übrige variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC 520 kB RAM
GRANT	Punkt	Monate Vegetationsjahr	1 Tag, 1 Stunde	starr isotrop heterogen	variabel	Oberflächenschichten: 5-10 cm Restprofil 25-30 cm	Fortran 77	IBM-kompatibler PC CRAY-2 16 MB RAM
HERMES	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	unbekannt	konstant d = 10 cm	True-Basic C	IBM-kompatibler PC
LAFOLIE	Punkt	Monate Vegetationsjahr	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	Fortran 77	Workstation
LEACHN	Punkt	Monate Vegetationsjahr	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel von Mächtigkeit abhängig	variabel von Anzahl abhängig	Fortran 77	IBM-kompatibler PC
LONFAS	Punkt	Monate Vegetationsjahr	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	konstant d = 1 cm	Fortran 77	IBM-kompatibler PC 640 kB RAM

MODELL	Ortsbezug	Zeitraum	Zeitschritt	Boden	Schichtanzahl	Schichtmächtigkeit	Programmiersprache	Rechner/Arbeitsspeicher
NLEAP	Punkt Region	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	konstant n = 2	1. d = 30,5 cm 2. Wurzelzone	Fortran 77 Oberfläche in Microsoft C	IBM-kompatibler PC 640 kB
N-SIM	Punkt	Monate Vegetationsjahr	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	Smalltalk/V for Windows Eingabe: COBOL	IBM-kompatibler PC (AT) 3 MB RAM / 5 MB HD Windows 3.X
NTRM	Punkt	Monate Vegetationsjahr	0.1 - 1 Tag	starr isotrop heterogen	maximal 10 Horizonte mit 24 Schichten	variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC CRAY, CYBER, HP A700 512 kB RAM
NWHEAT	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC (AT) 512 kB RAM
RENLEM	Regional	Jahre	Halbjahr	starr isotrop heterogen Sand	konstant n = 2	variabel (Wurzelzone, Unterboden)	Fortran 77	IBM-kompatibler XT, VAX 640 kB RAM
SOIL/SOILN	Punkt	Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	maximal = 22	variabel	Fortran 77	Workstation > 1 MB RAM
SWATNIT	Punkt	Vegetationsjahr Monate	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel von Mächtigkeit abhängig	variabel von Anzahl abhängig	Fortran 77	IBM-kompatibler PC
WHNSIM	Punkt	Monate Vegetationsjahr Jahre	1 Tag	starr isotrop heterogen	variabel	variabel	Fortran 77	IBM-kompatibler PC

2.2 Modellierung von Wasser-, Wärme- und Gashaushalt

Der Feuchte- und Wärmehaushalt des Bodens umfaßt alle Vorgänge, die Menge, Verteilung, Zustand und Bewegung der Feuchte und Wärme im Boden betreffen. Diese Prozesse werden in den untersuchten Bodenmodellen jedoch nicht simultan beschrieben, sondern es wird innerhalb eines Zeitintervalls der Bodenwärmehaushalt und die Bodenwasserdynamik nacheinander simuliert.

In den meisten N-Modellen wird auf die Simulation des Gashaushaltes und seines Einflusses auf die C- und N-Dynamik verzichtet. Eine Berücksichtigung des Sauerstoffgehaltes erfolgt hier indirekt über den Feuchtegehalt des Bodens. Nur in den Modellen ANIMO und GRANT erfolgt eine explizite Abbildung der Sauerstoffdynamik im Boden.

Wassertransport

Zur Beschreibung der Wasserspeicherung und Wasserbewegung im Boden wird aus physikalischer Sicht das Potentialkonzept herangezogen. Dieses besagt, daß sich Wasser von Stellen höheren Potentials (höherer potentieller Energie) zu solchen niedrigeren Potentials bewegt, weil bei diesem Vorgang Energie frei wird. Das Gesamtpotential des Bodens setzt sich aus dem Gravitationspotential, dem Matrixpotential und sonstigen Teilpotentialen (z. B. osmotisches Potential) zusammen. Eine wichtige Kenngröße des Bodens ist das Matrixpotential (Wasserspannung), welches die Stärke der Wasserbindung durch die Bodenmatrix wiedergibt. Die Wasserspannung hängt stark vom Wassergehalt des Bodens ab und übt zudem einen großen Einfluß auf die Wasserleitfähigkeit aus. Deshalb werden für die Simulation der konvektiv-dispersiven Wasserbewegung nach dem Potentialkonzept sowohl Wasserspannungs-Wassergehalts-Kurven (pF-Kurven) als auch Wasserspannungs-Leitfähigkeits-Beziehungen benötigt.

Zahlreiche Modelle arbeiten nach diesem Konzept. Als mathematische Umsetzung wird die sogenannte Richards-Gleichung verwendet, eine nichtlineare partielle Differentialgleichung. Unterschiede in den Modellen ergeben sich aufgrund unterschiedlicher hydraulischer Funktionen und der zur Lösung der Differentialgleichung postulierten Anfangs- und Randbedingungen. Im überwiegenden Teil der Bodenwassermodelle dieses Typs wird die Richards-Gleichung numerisch gelöst. Analytische Lösungen werden kaum integriert, da die dazu notwendigen Näherungen zu einer Verringerung der Abbildungsgenauigkeit führen.

Wesentlich einfacher sind dagegen die sogenannten Kapazitätsmodelle oder auch Schichtmodelle aufgebaut. Sie basieren auf einer Aufteilung des Bodens in Schichten

definierter Dicke und gegebener Wasserkapazitätsgrößen wie z.B. dem Wassergehalt bei Feldkapazität, am Permanenten Welkepunkt oder bei Sättigung. Infiltration in die jeweilige Schicht führt zu einer Erhöhung ihres Wassergehaltes bis zum Erreichen der Feldkapazität. Oberhalb dieses Kapazitätswertes kommt es zur Infiltration in die darunter liegenden Schicht. Durch diese Modellformulierung ist der Parameterbedarf gering. Die Ansprüche an die Rechnerleistung sind ebenfalls niedrig. Dieser Vorteil wird jedoch nur durch eine stark vereinfachte Abbildung des Wasserflusses erreicht. Daher sind solche Ansätze vor allem in anwenderbezogenen N-Simulationsmodellen verbreitet.

Teilweise wird versucht, das Bodenwasser in einen mobilen und einen immobilen Pool zu unterteilen, um die tatsächliche Wasserbewegung im Boden genauer abzubilden.

Neben diesem Matrixfluß werden in einigen Modellen Präferenz- und Bypass-Fluß berücksichtigt. Eine schnellere Wasserbewegung in den größeren Poren ohne Gleichgewichtszustand mit dem Wasser in den kleineren Poren wird als Präferenz-Fluß bezeichnet. Bypass-Fluß ist durch eine schnelle Wasserbewegung in Makroporen und Schrumpfungsrissen gekennzeichnet, ohne einen Einfluß auf das Wasser in der Bodenmatrix auszuüben. Die in einigen der Modelle integrierten Methoden zur Abbildung des Makroporen-Flusses basieren insgesamt auf empirischen Ansätzen.

Laterale Wasserbewegungen werden in den untersuchten Modelle nicht oder nur in Form einfacher Ratenterme berücksichtigt.

Oberflächenwasser

Oberflächenwasser tritt vor allem auf Böden mit langsamer Versickerung bei intensiven Niederschlägen auf. Auf geneigten Schlägen kommt es dann zu einem oberflächlichen Abfluß des Wassers, so daß nur ein Teil des Wasser infiltriert.

Viele Modelle lassen die Bildung von Oberflächenwasser und einen etwaigen Oberflächenabfluß vollkommen außer acht. Teilweise wird die Bildung von Oberflächenwasser bei Überschreiten der Infiltrationskapazität des Bodens simuliert, und dieses als reines Wasserreservoir behandelt. Wenn Oberflächenabfluß simuliert wird, dann meist nach der Kurvennummernmethode des amerikanischen Soil Conservation Service (SCS CN).

Verdunstung

Die Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration (PET) ist eine wesentliche Voraussetzung zur Bestimmung der oberen Randbedingung für das Bodenwassermodell. Im allgemeinen wird zwischen der Bodenevaporation, der Transpiration des Pflanzenbestandes und der Verdunstung des Interzeptionswassers unterschieden. Häufig wird jedoch die Interzeption durch den Pflanzenbestand im Modell nicht berücksichtigt.

Zur Berechnung der potentiellen Evaporation (PE) wird unterschiedlich vorgegangen. Es finden sich physikalisch begründete empirische Ansätze nach Penman-Monteith (*Penman, 1948; Monteith, 1981*), aerodynamische Energie-Bilanz-Methoden und vor allem empirische Ansätze. Häufig erfolgt eine Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (PET) ohne Unterteilung in Evaporations- und Transpirationsanteil. Die Reduzierung der PE bzw. PET zur aktuellen Evaporation (AE) bzw. Evapotranspiration (AET) erfolgt im allgemeinen in Abhängigkeit vom verfügbaren Bodenwasser.

Schnee

Die Schneedecke hat durch ihre Eigenschaft als thermischer Isolator und Wasserspeicher großen Einfluß auf die Bodenprozesse im Winter. Die Schneedecke ist durch örtlich und zeitlich stark variierende Eigenschaften gekennzeichnet.

Deshalb ist eine deterministische Modellierung schwierig, und es wird in vielen Stickstoff-Modellen darauf verzichtet. Sollen die Modelle jedoch in kälteren Regionen zum Einsatz kommen (z. B. DAISY, SOIL), so wird eine Berücksichtigung der Schneeeauflage des Bodens unabdingbar. Die Modellierung erfolgt im allgemeinen in physikalisch fundierter empirischer Form. Dabei wird die Simulation der Schneedecke zumeist auf die Abbildung ihrer wärmeisolierenden und feuchtespeichernden Funktion reduziert.

Grundwasser

Eine dauernde Wasseranreicherung über schwer wasserdurchlässigen Schichten wird als Grundwasser bezeichnet. Dieses frei bewegliche Wasser kann unter dem Einfluß eines hydraulischen Gradienten seitlich fließen bzw. in den Oberboden aufsteigen.

In den untersuchten N-Modellen werden die hydraulischen Bedingungen im Grundwasserleiter zumeist als untere Randbedingung für die betrachtete Bodensäule berücksichtigt. Da es sich um eindimensionale Modelle handelt, kann die laterale

Grundwasserbewegung nur in Form von Senk- bzw. Quelltermen innerhalb der Feuchtehaushaltsgleichung berücksichtigt werden. Der durch die Evapotranspiration verursachte Wasseraufstieg aus dem Grundwasser kann nur durch Modelle abgebildet werden, die auf der Richards-Gleichung basieren. In vielen Modellen wird jedoch das Grundwasser nicht in die Simulation einbezogen.

Bodenfrost

Ein wichtiges Phänomen innerhalb des Feuchte- und Wärmehaushaltes des Bodens ist der Phasenübergang der Bodenlösung bei Bodenfrost. Häufig werden diese Prozesse jedoch innerhalb der Stickstoff-Simulation vernachlässigt. Ursache dafür ist hauptsächlich das Einsatzgebiet der jeweiligen Modelle, das die Berücksichtigung solcher Prozesse nicht erforderlich macht. Zum anderen erfordert die naturwissenschaftlich begründete Abbildung durch ein gekoppeltes partielles Differentialgleichungssystem einen hohen Aufwand an Parametern und Rechnerleistung. Deshalb finden sich neben diesen Ansätzen einfache Algorithmen zur Berücksichtigung von Eisschichten innerhalb des Bodenwasserflusses.

Bodenwärmedynamik

Die Simulation der Bodenwärmedynamik beruht im allgemeinen auf der - zumeist numerischen - Lösung der Wärmeleitungsgleichung. In der überwiegenden Mehrheit der untersuchten Modelle werden dafür die thermischen Parameter nach *de Vries* (1963) berechnet. Unterschiede zwischen diesen Modellen ergeben sich vor allem durch die Art der Berechnung der thermischen Parameter und der Bestimmung der Anfangs- und Randbedingungen. Häufig wird der Wärmefluß durch Konvektion mit dem Bodenwasser innerhalb der Wärmehaushaltsgleichung vernachlässigt. Eine geringe Zahl von Modellen berechnet die Bodentemperatur mittels eines linearen Dämpfungsansatzes oder anderer empirischer Ansätze.

Tab. 2: Modellalgorithmen zur Beschreibung der Feuchte- und Wärmedynamik

MODELL	Matrixfluß	Makroporen-Fluß	Oberflächen-wasser	Evaporation	Transpiration	Interzep-tion	Schnee	Grund-wasser	Boden-frost	Boden-temperatur
ADDISCOTT	mobile und immobile Phase	ja	nein	PE nach Penman (1948) $AE = f(PE, \theta)$	$f(\text{PET}, \text{BedeK-grad}, \theta)$	nein	nein	nein	nein	nein
ANIMO	nutzt ein externes Bodenfeuchtemodell								nein	Dämpfungs-fkt.
BAMO2	Kapazitätsmodell	nein	ja	PET und AET nach Koitzsch (1990) $f(\text{Bedeckungsgrad}, \text{PET}, \theta)$		nein	ja	nein	ja	Wärmeleitungs-gleichung
CABON	Kapazitätsmodell	nein	nein	PET (input) $\text{AET} = f(\text{PET}, \theta)$, linear		nein	nein	nein	nein	nein
CANDY	Kapazitätsmodell	nein	nein	PET und AET nach Koitzsch (1990) $f(\text{Bedeckungsgrad}, \text{PET}, \theta)$		ja	ja	nein	nein	Wärmeleitungs-gleichung
CERES	Kapazitätsmodell	nein	ja, mit Abfluß (SCS CN)	Ritchie (1972)	Ritchie (1972)	nein	ja	nein	ja	empirischer Ansatz nach Williams (1984)
CREAMS	Kapazitätsmodell	nein	ja mit Abfluß (SCS CN)	Ritchie (1972)	Ritchie (1972)	nein	ja	nein	nein	nein
DAISY	Richards-Gleichung	nein	nein	PET nach Makkink (1957) $\text{AE} = f(\text{PET}, \text{LAI}, q_g)$	radialer Fluß zur Wurzel $f(\text{PET}, \theta)$	ja	ja	ja	ja	Wärmeleitungs-gleichung

MODELL	Matrixfluß	Makroporen-Fluß	Oberflächen-wasser	Evaporation	Transpiration	Interzep-tion	Schnee	Grund-wasser	Boden-frost	Boden-temperatur
DEMETER	Kapazitätsmodell	nein	nein	PE nach Penman (1948) $AE=f(\text{PET}, \text{LAI}, \theta)$ nach van Keulen & Seligman (1987)	PT nach Penman (1948) $AT=f(\text{PET}, \text{LAI}, \text{Wurzelaktivität}, \theta)$ nach van Keulen & Seligman (1987)	nein	ja	nein	nein	Wärmeleitungs-gleichung
EPIC	Kapazitätsmodell	ja	ja, mit Abfluß (SCS CN)	Ritchie (1972) PE; $AE=f(\text{PET}, \text{LAI})$	Ritchie (1972) PT; $AT=f(\text{AE}, \text{LAI}, \theta, \text{FK})$, linear	nein	ja	nein	ja	empirischer Ansatz nach Williams (1984)
GRANT	Richards-Gleichung	nein	nein	Monteith (1965)	Monteith (1965)	nein	nein	nein	nein	Wärmeleitungs-gleichung
HERMES	Kapazitätsmodell	nein	nein	PET nach Haude (1955), Heger (1978); $AE=f(\text{PET}, \text{LAI}, \theta)$ nach van Keulen & Seligman (1987)	$PT=\text{PET}-PE$ $AT=f(\text{PT}, \text{Wurzelaktivität}, \theta)$ nach van Keulen & Seligman (1987)	nein	nein	nein	nein	nein
LAFOLIE	Richards-Gleichung	nein	nein	PET nach Ababou (1981) $PE=f(\text{PET}, \text{LAI})$	aus Differenz von PET und PE	nein	nein	ja	nein	Wärmeleitungs-gleichung
LEACHN	Richards-Gleichung	nein	ja	Childs & Hanks (1975)	ja	nein	nein	ja	nein	Wärmeleitungs-gleichung
LONFAS	Richards-Gleichung	ja	nein	input	input	nein	nein	ja	nein	nein

MODELL	Matrixfluß	Makroporenfluß	Oberflächenwasser	Evaporation	Transpiration	Interzeption	Schnee	Grundwasser	Bodenfrost	Bodentemperatur
NLEAP	Kapazitätsmodell	nein	ja, mit Abfluß (SCS CN)	PET aus der Kesselverdunstung	AT=f(PET) oder f(θ) oberhalb PWP)	nein	nein	nein	nein	nein
N-SIM	Kapazitätsmodell	nein	ja, mit Abfluß (SCS CN)	Ritchie (1972)	Ritchie (1972)	nein	ja	nein	ja	empirischer Ansatz nach Williams (1984)
NTRM	Richards-Gleichung	nein	ja mit Abfluß	PE nach Penman (1967)	f(PE,LAI,Wurzelaktivität, θ)	unbekannt	unbekannt	ja	unbekannt	unbekannt
NWHEAT	Kapazitätsmodell	nein	nein	PE nach Penman (1948) AE=f(PE,LAI, θ) nach van Keulen & Seligman (1987)	PT nach Penman (1948) AT=f(PT,LAI, Wurzelaktivität, θ) nach van Keulen & Seligman (1987)	nein	nein	nein	nein	Dämpfungsfkt.
RENLEM	Annahme mittlerer Bedingungen									
SOIL/SOILN	Richards-Gleichung	ja	ja mit Abfluß = f(θ_{surt})	a) PE, AE mittels Energiebilanzgleichung b) PE nach Monteith (1965)	PT nach Monteith (1965) AT=f(PT,T, θ , Wurzel-dichte)	ja	ja	ja	ja	Wärmeleitungs-gleichung
SWATNIT	Richards-Gleichung	ja	ja, mit Abfluß (SCS CN)	PET, AE nach Ritchie (1972)	AT nach Hoogland (1981)	ja	nein	ja	nein	Wärmeleitungs-gleichung

MODELL	Matrixfluß	Makroporen-Fluß	Oberflächen-wasser	Evaporation	Transpiration	Interzep-tion	Schnee	Grund-wasser	Boden-frost	Boden-temperatur
WHNSIM	Richards-Gleichung	nein	ja	PE= f(PET) AE=f(PE) PET nach Priestley & Taylor (1972)	PT=f(PET) PET nach Priestley & Taylor (1972)	ja	ja	ja	nein	Wärmeleitungs-gleichung

- | | | | | | | | |
|-----|-----------------------------|-----|--------------------------------|-----|---------------------------|------------------------|-------------------|
| AE | aktuelle Evaporation | AT | aktuelle Transpiration | PE | potentielle Evaporation | T | Temperatur |
| AET | aktuelle Evapotranspiration | LAI | Blattflächenindex | PT | potentielle Transpiration | θ | Bodenfeuchte |
| | | PET | potentielle Evapotranspiration | PWP | permanenter Welkepunkt | θ_{surf} | Oberflächenwasser |

Literatur

- Ababou, R. (1981):** Modelisation des transferts hydriques dans le sol en irrigation localisee. These Universite de Grenoble.
- Childs and Hanks (1975):** Model of soil salinity effects on crop growth. Soil Science Society of America Proceedings, 39, 617-622.
- Haude, W. (1955):** Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, 11.
- Heger, K. (1978):** Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 26, 21-40.
- Keulen, H. van and N.G. Seligman (1987):** Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Pudoc, Centre of Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Koitzsch, R. und R. Günther (1990):** Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 34/12, 803-810.
- Monteith, J.L. (1981):** Evaporation and surface temperature. Quart. J. R. Met. Soc., 107, 1-27
- Penman, H.L. (1948):** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society, London, A193, 120-146.
- Ritchie, J.T. (1972):** Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research, 8, 1204-1213.
- 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, 1984.

2.3 Simulation der Stickstoffdynamik

Stickstoff und Kohlenstoff liegen im Boden zum überwiegenden Teil in organischer Bindungsform vor. Der für die Pflanzen verfügbare mineralische Stickstoff wird durch biochemischen Abbau aus der organischen Bodensubstanz gebildet. Es wird deshalb bei der Modellierung zwischen den Prozessen der Bildung, des Abbaus und der Transformation der organischen Bodensubstanz sowie der Dynamik der anorganischen Bindungsformen unterschieden.

Stickstofffraktionen

Die organische Bodensubstanz wird von der im Boden lebenden und abgestorbenen organischen Substanz gebildet, wobei erstere Kleinlebewesen (das Endaphon) und letztere den Humus darstellt. Unter Humus versteht man die Gesamtheit der abgestorbene Pflanzen- und Tiersubstanz, die einem stetigen Ab-, Um- und Aufbauprozess unterworfen ist. Die Bodenorganismen nehmen eine zentrale Stellung im biologischen C- und N-Kreislauf ein, da sie zum einen durch den Abbau der organischen Bodensubstanz (Mineralisierung und Humifizierung) N freisetzen und zum anderen durch den N-Einbau in körpereigenes Eiweiß und ihre kurze Lebensdauer selbst eine wichtige N-Senke bzw. N-Quelle darstellen.

Neben der organischen Substanz des Bodens werden durch die N-Modelle weitere Stickstoffquellen wie die organische und mineralische Düngung, Ernte- und Pflanzenrückstände, Wurzelausscheidungen und der N-Eintrag durch Trocken- und Naßdeposition berücksichtigt.

Zur Beschreibung des Abbaus der organischen Substanz wird diese in Fraktionen unterteilt, die durch ihr C/N-Verhältnis und ihre Abbaurate charakterisiert werden. Im allgemeinen erfolgt eine Differenzierung zwischen mehreren Humuspools, mehreren Fraktionen frischer organischer Substanz und in einigen Modellen auch zwischen mehreren Fraktionen der mikrobiellen Biomasse. Eine weitere Fraktionierung nach den einzelnen Bestandteilen der abgestorbenen organischen Substanz (Stoffgruppen wie Kohlenhydrate, Zellulose und Lignin) wird seltener vorgenommen.

Es existieren jedoch auch einfache Ansätze, die nur einen organischen Stickstoff-Pool im Boden berücksichtigen.

Bei der Modellierung der Dynamik der durch den Umsatz der organischen Substanz mobilisierten bzw. immobilisierten Menge an anorganischem Stickstoff ergeben sich Unterschiede hauptsächlich durch die Differenzierung zwischen Ammonium und Nitrat. In etwa der Hälfte der untersuchten Modelle wird vorausgesetzt, daß die Nitrifizierung

so schnell abläuft, daß praktisch kein Ammonium in der Bodenlösung vorliegt. Deshalb werden in diesen Modellen alle Prozesse bezüglich der Ammonium-Dynamik nicht berücksichtigt.

Mineralisierung/Immobilisierung

Die mikrobielle Biomasse spielt bei der Mineralisierung eine entscheidende Rolle. Obwohl die mikrobielle Biomasse nur eine relativ kleine und labile Fraktion im Komplex der organischen Substanz darstellt, bestimmt ihre Umwandlungsrate den N-Kreislauf in entscheidendem Ausmaß. Deshalb wird in mehreren Modellen die Mineralisierung von C und N über den Aufbau und Abbau der mikrobiellen Biomasse simuliert, wobei N-Freisetzung und N-Immobilisierung als Folgeerscheinung des Kohlenstoff-Abbaus betrachtet werden. Solche Modelle erfordern eine Vielzahl von boden- und standortspezifischen Parametern, die oft nicht gemessen werden können und schwierig abzuleiten sind. Ein großflächiger Einsatz solcher Modelle in der Praxis scheidet daher aus.

Die Simulation der Mineralisierung bzw. Humifizierung der einzelnen Fraktionen erfolgt generell mit reaktionskinetischen Ansätzen. Es werden zumeist Ansätze 1. Ordnung (exponentieller Verlauf der N-Freisetzung), Ansätze vom Michaelis-Menten-Typ, aber auch kinetische Ansätze 0. Ordnung (linearer Verlauf) benutzt.

In allen Modellen wird die Abhängigkeit der Transformationsprozesse von der Bodenfeuchte und -wärme berücksichtigt. Dies geschieht im allgemeinen durch Multiplikation der prozeßbezogenen optimalen Umsatzrate mit Reduktionsfunktionen. Die Temperaturabhängigkeit wird meist als Arrheniusfunktion beschrieben. Die Berücksichtigung der Bodenfeuchte erfolgt oft über eine zusammengesetzte lineare Gleichung (z.B. Trapezfunktionen) oder über ein Polynom 2. Grades.

Die Modellierung des Einflusses der Bodenreaktion (pH-Wert) oder des Tongehaltes des Bodens auf die Mineralisierung erfolgt seltener, aber in ähnlicher Weise.

Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen ergeben sich in erster Linie aus der Anzahl der betrachteten Fraktionen. So simulieren nur wenige Modelle explizit die Dynamik der mikrobiellen Biomasse. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß einige Autoren zuerst die Bodenatmung (C-Transformationen) und davon abhängig die N-Dynamik simulieren. In anderen Modellen wird nur der Stickstoffumsatz beschrieben. Immobilisierungsprozesse werden bei dieser Vorgehensweise durch das C/N-Verhältnis der umgesetzten Substanz gesteuert.

Nitrifizierung/Denitrifizierung

Die Simulation der biochemischen Prozesse Nitrifizierung und Denitrifizierung innerhalb der Dynamik der anorganischen N-Fractionen erfolgt ähnlich wie der Umsatz der organischen N-Fractionen durch reaktionskinetische Ansätze bei Berücksichtigung des Einflusses abiotischer Umweltfaktoren.

Die Nitrifizierung wird häufig durch Reaktionskinetiken vom Typ Michaelis-Menten aber auch durch Kinetiken 1. oder 0. Ordnung abgebildet.

Die Beschreibung der Denitrifizierung erfolgt in den meisten Modellen analog. Manche Modelle unterteilen den Boden in sauerstoffarme und sauerstoffreiche Zonen und simulieren die Diffusion von Sauerstoff und denitrifizierten Gasen zwischen den Bodenaggregaten. Dabei wird oft auch die Kohlenstoffverfügbarkeit und die Enzymaktivität berücksichtigt. Andere Modelle berechnen die Denitrifikation über die Populationsdynamik der heterotrophen Mikroorganismen.

Modellierung des Nährstofftransportes

Die Bewegung der gelösten N-Fractionen im Boden ist eng an den Wassertransport gekoppelt und kann als Kombination der drei Prozesse Konvektion, Diffusion und hydrodynamische Dispersion beschrieben werden.

Konvektion bezeichnet den Transport aufgrund von Massenfluß mit dem Bodenwasser. Dieser hängt vom hydraulischen Gradienten und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens ab. Bei einer ungleichmäßigen Verteilung der Ionen in der Bodenlösung erfolgt außerdem ein Fluß von Stellen hoher Konzentration zu Stellen niedriger Konzentration (Diffusion). Der Wasserfluß im Boden führt zu einer Vermischung der Bodenlösung, die eine Angleichung unterschiedlicher Konzentrationen bewirkt. Dieser Prozeß wird hydrodynamische Dispersion genannt und übertrifft bei großen Flüssen den dispersiven Effekt der Diffusion deutlich.

Wasserfluß in Makroporen und Schrumpfungsrissen hat unterschiedliche Auswirkungen auf den Nitrattransport. Im Niederschlagswasser gelöstes Nitrat wird sehr schnell verlagert, während das Nitrat der Bodenlösung in den Bodenaggregaten zurückgehalten wird.

Die Verlagerung des mineralischen Stickstoffs - und in einigen Modellen auch des gelösten organischen Stickstoffs - wird entweder durch die numerische Lösung der Konvektions-Dispersionsgleichung oder durch einen einfachen Konvektionsansatz beschrieben. Letztere Vorgehensweise wird vor allem gewählt, wenn die Feuchtedynamik mittels eines Kapazitätsmodells simuliert wird. Neben diesen hauptsächlich genutzten Ansätzen findet man Theorien zur Beschreibung des Lösungstransportes, die auf der Unterteilung der Bodenlösung in eine mobile und eine immobile Phase beruhen. Bei diesen Modellen muß neben dem Transport in der mobilen Phase der diffusive Ausgleich der Konzentrationen zwischen den Pools berücksichtigt werden.

Das Nitrat gilt grundsätzlich als vollständig gelöst. Bei der Simulation des Transportes von Ionen, die wie das Ammonium mit der Bodenmatrix reagieren, muß deren Konzentration in der Festphase berücksichtigt werden.

Ammonium-Adsorption und -Verflüchtigung

Diese physikochemischen Prozesse werden nur in Modellen berücksichtigt, die zwischen Nitrat und Ammonium unterscheiden.

Zumeist werden zur Abbildung der Adsorption und Desorption des Ammoniums lineare Adsorptionsisotherme genutzt. Seltener wird mit nichtlinearen Adsorptionsisothermen gearbeitet.

Eine explizite Abbildung der Ammoniak-Verflüchtigung wird im allgemeinen nicht durchgeführt. Nur in den Modellen LEACHN und NLEAP wird sie durch eine Kinetik 1. Ordnung beschrieben. Einige Modelle berücksichtigen die Verflüchtigung, indem sie einen bestimmten Prozentsatz des Stickstoffs in der organischen oder mineralischen Düngung als Verlust ansehen. Die Größe dieses Anteils wird zumeist von der Ausbringungsmethode und der Düngerform abhängig gemacht.

Außer im Modell NTRM wird die Fixierung des Ammoniums in keinem der untersuchten Modelle berücksichtigt.

Tab. 3: Vergleich der Modellierung der Bodenstickstoffdynamik

MODELL	N-Quellen	organische N-Fraktionen	anorg. N-Fraktionen	Mineralisierung	Immobilisierung	Ammonium-Adsorption	Nitrifizierung	Denitrifizierung	N-Transport
ADDISCOTT	Mineraldünger org. Dünger	ein Pool	NH ₄ NO ₃	Kin. 0.Ordnung f(T, θ)	implizit in Mineralisierung	nein	Kin. 0. Ordn.	nein	Konvektion mobile/immobile Phase NO ₃
ANIMO	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Exudate Deposition	beliebig viele Fraktionen frischer N _{org} , löslicher N _{org} , Exudate und Humus	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N _{org} , T, θ, pH, C/N)	implizit in Mineralisierung	lineare Adsorptionsisotherme	Kin. 1. Ordn. f(NH ₄ , O ₂ , T, θ, pH)	Kin. 0.Ordn. f(NO ₃ , T, θ, pH, O ₂)	Konvektion lösl. N _{org} , NH ₄ , NO ₃
BAMO2	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N _{org} Humus in beliebig vielen Fraktionen	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N _{org} , T, θ, C/N)	implizit in Mineralisierung	nein	Kin. 1. Ordn. f(NH ₄ , T, θ, pH)	nein	Konvektion NH ₄ , NO ₃
CABON	Mineraldünger	ein allgemeiner Pool	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N _{org} , T, θ)	Kin. 1. Ordn.	lineare Adsorptionsisotherme	Kin. 1. Ordn. f(T, θ)	nein	Konvektion NO ₃
CANDY	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N _{org} in mehreren Pools Boden-N _{org} in 3 Pools	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(OS, T, θ, C/N)	implizit in Mineralisierung	nein	Michaelis-Menten-Kin. f(T, θ, O ₂ , NH ₄)	Kin. 1. Ordn. f(T, θ, NO ₃ , C)	Konvektion NO ₃
CERES	Mineraldünger Pfl.Rückstände Exudate	Humus frischer N, aufgeteilt auf drei Pools	NH ₄ NO ₃ Harnstoff	Kin. 1.Ordnung f(N, T, θ, C/N)	implizit in Mineralisierung	nein	Michaelis-Menten-Kin. f(T, θ, pH, NH ₄)	Kin. 1. Ordn. f(T, θ, NO ₃ , C)	Konvektion NO ₃

MODELL	N-Quellen	organische N-Fractionen	anorg. N-Fractionen	Mineralisierung	Immobilisierung	Ammonium-Adsorption	Nitrifizierung	Denitrifizierung	N-Transport
CREAMS	Mineraldünger org. Dünger Pfl.rückstände	ein allgemeiner Pool	NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N, θ, T)	nein	nein	nein	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , T, θ)	Konvektion mit run-off, Sediment
DAISY	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N _{org} in 2 Pools 2 Pools MBM Boden-N _{org} in 3 Pools	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(C-, N-Pools, T, θ, Ton)	entsprechend BM-Wachstum	nichtlineare Adsorptions- isotherme	Kin. 1. Ordn. f(NH ₄ , T, θ)	Kapazitäts- konzept f(CO ₂ , NO ₃ , T, θ)	Konvektions- Dispersionsgl. NH ₄ , NO ₃
DEMETER	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Exudate Deposition	frischer N _{org} Humus in mehreren Fraktionen	NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N-Pools, T, θ, C/N)	implizit in Mi- neralisierung	nein	nein	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , C, T, θ)	Konvektion
EPIC	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	labiler N-Pool Humus - aktive Frakt. - stabil. Frakt.	NO ₃	labiler Pool: f(C/N, θ, T, N in Pfl.rückstän- den) Kin. 0.Ordn. Humus: Kin. 1.Ordnung f(N _{org} , T, θ)	empir. Gl. f(NO ₃ , N in Pfl.rückstän- de)	nein	nein	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , T, θ, C, Bodeneigen- schaften)	Konvektion mit Sediment, runoff
GRANT	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände	Pfl.rückstän- de: 4 Pools Dünger: 2 Pools 2 Pools MBM Humide Humus	NO ₃ NH ₄	Kin. 1.Ordnung f(T, θ, C, N)	Michaelis- Menten-Kin.	lineare Adsorptions- isotherme	ja	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , T, θ, O)	Konvektions- Dispersionsgl. NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻

MODELL	N-Quellen	organische N-Fractionen	anorg. N-Fractionen	Mineralisierung	Immobilisierung	Ammonium-Adsorption	Nitrifizierung	Denitrifizierung	N-Transport
HERMES	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N _{org} Humus	NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(T, θ)	implizit in Mineralisierung	nein	nein	Michaelis-Menten-Kin. f(NO ₃ , T, θ)	Konvektions- Dispersionsgl.
LAFOLIE	Mineraldünger	ein allgemeiner Pool	NO ₃ NH ₄	Kin. 1.Ordnung f(OS, T, θ)	nein	Adsorptionsisotherme nach Freundlich	Kin. 1. Ordn. f(NH ₄ , T, θ)	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , T, θ)	Konvektions- Dispersionsgl. NO ₃ , NH ₄
LEACHN	Mineraldünger org. Dünger Pfl.rückstände	Pflanzenreste Kot Humus	NO ₃ NH ₄ Harnstoff	Kin. 1.Ordnung	ja	lineare Freundlichisotherme	modifizierte-Kin. 1. Ordn.	Michaelis-Menten-Kin.	Konvektions- Dispersionsgl. NH ₄ , NO ₃
LONFAS	Mineraldünger	nein	NO ₃	nein	nein	nein	nein	nein	Konvektions- Dispersionsgl.
NLEAP	Mineraldünger org. Dünger Pfl.rückstände N ₂ -Fixierung	3 Pools: org. Substanz Pfl.rückstände org. Dünger	NO ₃ NH ₄	Kin. 1.Ordnung org.Substanz f(T, θ, OM); Pfl.rückstände, org. Dünger f(C/N)	nein	nein	Kin. 1. Ordn. f(T, θ, NH ₄)	Kin. 1. Ordn. f(NO ₃ , T, θ)	Konvektion NO ₃
N-SHM	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Exudate Deposition	Humus, frischer N _{org} (3 Pools)	NH ₄ NO ₃ Harnstoff	Kin. 1.Ordnung f(N, T, θ, C/N)	implizit in Mineralisierung	nein	Michaelis-Menten-Kin. f(T, θ, pH, NH ₄)	Kin. 1. Ordn. f(T, θ, NO ₃ , C)	Konvektion NO ₃
NTRM	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	unbekannt	NH ₄ NO ₃	Kin. 1.Ordnung f(N _{org} , T, θ)	implizit in Mineralisierung	Na ⁺ -NH ₄ ⁺ -Austausch	konstante Rate	Kin. 1. Ordn.	Konvektion nur NO ₃

MODELL	N-Quellen	organische N-Fraktionen	anorg. N-Fraktionen	Mineralisierung	Immobilisierung	Ammonium-Adsorption	Nitrifizierung	Denitrifizierung	N-Transport
NWHEAT	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N_{org} Humus	NO_3	Kin. 1.Ordnung $f(T, \theta, C/N)$	implizit in Mineralisierung	nein	nein	nein	Konvektion
RENLEM	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	frischer N_{org} in 2 Pools	NO_3	konstante Rate $f(\text{frischer } N_{org})$	nein	nein	nein	Kin. 1. Ordn. $f(NO_3, C, T, \theta, pH)$	Konvektion
SOIL/ SOILN	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände Deposition	Pflanzenreste Kot Humus	NH_4 NO_3	Kin. 1.Ordnung $f(T, \theta, C/N)$	implizit in Mineralisierung	nein	Kin. 1. Ordn. $f(T, \theta, NH_4, NO_3)$	Michaelis-Menten-Kin. $f(T, \theta, NO_3)$	Konvektion NO_3
SWATNIT	Mineraldünger org. Dünger Pfl.Rückstände	Pflanzenreste Kot Humus	NO_3 NH_4 Harnstoff	Kin. 1.Ordnung	ja	lineare Freundlich- Isotherme	Kin. 1. Ordn.	Kin. 1. Ordn.	Konvektions- Dispersionsgl. NH_4, NO_3
WHNSIM	Mineraldünger org. Dünger Deposition	3 Pools: sehr leicht, leicht, schwer zersetzbare org. Substanz	NO_3	Kin. 1.Ordnung $f(T, \theta, OS)$	Kin. 1. Ordn. $f(\theta, NO_3)$	nein	nein	Kin. 0. Ordn. $f(\theta, T, pH, NO_3, OS, C)$ Kin. 1.Ordn. $f(\theta, T, NO_3, OS, C)$	Konvektions- Dispersionsgl.

MBM
OS
 N_{org}

mikrobielle Biomasse
organische Substanz
organische Stickstofffraktion

T
 θ
BM

Bodentemperatur
Bodenfeuchte
Biomasse

C/N
Ton

Verhältnis von Kohlenstoffgehalt zu Stickstoffgehalt
Tongehalt des Bodens

2.4 Modellierung des Pflanzenbestandes

Weltweit werden heute rund 160 Kulturpflanzenarten in größerem Umfang angebaut. Ihre Einteilung in Familien und Ordnungen zeigt die Verschiedenheit ihrer Herkunft. Diese heterogene Ausgangssituation muß bei der Modellierung berücksichtigt werden. Ein generell für alle Kulturarten zutreffendes Wachstumsmodell ist nicht existent und auch nicht zu erwarten. Vielmehr werden Gemeinsamkeiten und Zusammenhänge analysiert und parametrisiert.

Vor diesem Hintergrund können hinsichtlich ihrer Struktur und der genutzten Algorithmen zwei grundsätzliche Ansätze zur Berücksichtigung des Pflanzenbestandes in N-Modellen unterschieden werden.

Im ersten Ansatz wird die Pflanze lediglich als Quelle bzw. Senke für die Modellierung des Bodenwasser- und Bodenstickstoffhaushaltes betrachtet.

Dafür wird der Stickstoffentzug mittels Entzugsfunktionen (Michaelis-Menten-Typ, logistische Ansätze, ...) in Abhängigkeit vom kumulativen Bedarf und der Vegetationsdauer berechnet. Die aktuelle Durchwurzelungstiefe wird entweder mit einem analogen Ansatz bestimmt oder durch Interpolation aus einzugebenden Terminwerten ermittelt. Transport- und Transformationsprozesse innerhalb des Systems Pflanze bleiben weitgehend unberücksichtigt. Diese Modelle kann man nach *Penning de Vries et al.* (1989) auch als beschreibende Modelle bezeichnen.

Der zweite Ansatz versucht, die Prozesse der Pflanzenphysiologie in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen (Witterung, Boden, Management) abzubilden. Bei diesen Modellen handelt es sich um sogenannte erklärende Modelle (*Penning de Vries et al.*, 1989). Die dieser Gruppe zuzuordnenden Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Detailliertheit. Insgesamt haben sich im Rahmen der Agroökosystemmodellierung vereinfachende Modelle (summary models) durchgesetzt, die bei der Abbildung der Pflanzenprozesse nicht mehr bis auf die zelluläre Ebene herabgehen. Es werden nur die für das Pflanzenwachstum entscheidenden Prozesse wie Photosynthese, Atmung und phänologische Entwicklung simuliert. Anhand dieser Prozesse wird die Aufteilung des Biomassezuwachses auf die einzelnen Pflanzenorgane simuliert. Als entscheidenden Einflußgrößen werden dabei neben der phänologischen Entwicklung meistens Umwelteinflüsse wie Strahlung, Temperatur sowie Nährstoff- und Wasseranlieferung durch den Boden berücksichtigt.

Bei dieser Herangehensweise wird die Pflanze mindestens in folgende drei Kompartimente unterteilt:

- die unterirdische Biomasse
- die oberirdische vegetative Biomasse (Sproß, Blätter)
- die generative Biomasse bzw. Speicherorgane.

Je nach Modell und Modellziel erfolgt teilweise eine weitere Untergliederung z.B. in Blätter, Halme und Ähren.

Die Entwicklung der einzelnen Pflanzenorgane hängt von der vorhandenen Menge an Assimilaten und vom Bedarf der einzelnen Teile ab. Dieser Bedarf wird zumeist aus genetischen Faktoren, der phänologischen Entwicklung oder aus definierten Verhältnissen der Kompartimente zueinander berechnet. Mangel an Licht, Wasser oder Nährstoffen führt in einigen Modellen zu einer Hemmung des Pflanzenwachstums.

Die Berechnung der phänologischen Stadien erfolgt in den meisten Modellen mit Hilfe physiologisch wirksamer Temperatursummen. Beeinflussende Parameter sind dabei neben genetischen Faktoren die Strahlungs- und Feuchtigkeitsbedingungen des Standortes.

In fast allen Modellen wird mit einem Assimilatpool gerechnet, der für die Erhaltungsaerobic und das Wachstum zur Verfügung steht.

Unterschiede bestehen hauptsächlich in der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Einzelprozesse. Ein weiterer Unterschied besteht in der zeitlichen Abfolge der Prozesse im Modell, durch die unterschiedliche physiologische Vorstellungen ausgedrückt werden.

Eine große Schwäche fast aller Modelle ist, daß der Einfluß von Schädlingen, Krankheiten oder die Konkurrenz durch Wildkräuter unberücksichtigt bleibt.

Tab.4: Vergleich der Pflanzenmodelle

MODELL	Kulturpflanze	Pflanzernteile	Ontogenese	Assimilatbildung	Assimilatverteilung	Biomassezuwachs Wurzelenwicklung	N-Entzug
ADDISCOTT	Winterweizen	nein	nein	nein	nein	S-Kurven $\Delta BM = f(\text{pot. Ertrag}, \Sigma T)$ $z_r = f(z_r^{\max}, \Sigma T)$	$f(\text{Bedarf}, \text{Angebot}, \theta, z_r)$ Bedarf: S-Kurve $f(\text{max. Bedarf}, \Sigma T)$
ANIMO	Getreide Grünland	nein	nein	nein	nein	keine BM-Berechnung z_r als Standardwerte	$f(\text{max. N-Gehalt in der Pflanze} = f(\text{Entwickl.}, \text{AT}, \text{Angebot})$
BAMO2	beliebig	nein	nein	nein	nein	keine BM-Berechnung z_r aus lin. Interpolation zw. Terminwerten(input)	S-Kurve $f(\text{max. Bedarf}, \text{Vegetationsdauer}, z_r)$
CABON	beliebig	nein	Zeit seit Saat / Gesamtzeit	nein	nein	keine BM-Berechnung	$f(\text{Bedarf})$ Michaelis-Menten-Kin.
CANDY	beliebig	nein	nein	nein	nein	keine BM-Berechnung z_r aus lin. Interpolation zw. Terminwerten(input)	S-Kurve $f(\text{max. Bedarf}, \text{Vegetationsdauer}, z_r)$
CERES	Weizen, Mais, Soja, Hirse, Gerste, Reis	Wurzel, Halm, Blatt, Korn	Temperatur- summe	$f(\text{PAR}, \text{LAI}, \text{T}, \theta, \text{N})$	$f(\text{Ontogenese}, \theta, \text{N})$	$\Delta BM = f(\text{Ontogenese})$	$f(\text{Angebot}, \text{Bedarf})$
CREAMS	beliebig	nein	Zeit seit Saat / Gesamtzeit	nein	nein	$\Delta BM = f(\text{pot. Ertrag}, \text{pot. und akt. Wasseraufnahme})$	1. Möglichkeit: $f(\text{N-Konz.}, \text{BM})$ 2. Möglichkeit: S-Kurve $f(\theta, \text{pot. N-Aufnahme})$

MODELL	Kulturpflanze	Pflanzenzelle	Ontogenese	Assimilatbildung	Assimilatverteilung	Biomassezuwachs Wurzelentwicklung	N-Entzug
DAISY	Weizen, Gerste, Grünland, Rüben, Kartoffeln	oberirdische BM, Wurzel-BM, Speicherorgane	Temperatursumme	$f(\text{PAR, LAI, } T_L, C)$	$f(\Sigma T, T_L)$ 1. Erhaltungs-, 2. Wachstumsatmung, Wachstum	$\Delta\text{BM}=f(\text{Assimilation, Umwandlungseffizienz})$ $z_r = \text{lineare Rate}$ $z_r = f(z_r^{\text{max}}, T)$	Konvektion, Diffusion $f(\text{Bedarf, Angebot, } z_r)$ Bedarf= $f(N \text{ in BM, Ontogenese})$
DEMETER	Winterweizen, Wintergerste	oberird. vegetative BM, oberird. generative BM, Wurzel-BM	$f(T_L, N, \theta)$	$f(\text{PAR, grüne BM, } T_{\text{ph}}, N, \theta, \text{Schädlinge})$	1. Erhaltungs-, 2. Wachstumsatmung 3. Wachstum und Kornfüllung	$\Delta\text{BM}=f(\text{Ontogenese, BM, Wachstumsrate, berücksichtigt Reduzierung und Umverteilung})$	$f(\text{Bedarf, Angebot})$ Bedarf= $f(N \text{ in BM})$
EPIC	ca. 20 Arten	oberirdisch: vegetative BM generative BM Wurzel	Temperatursumme	nein	40% (Saat) bzw. 20% (Reife) für Wurzel: $f(\theta, T)$ generative BM: $f(\text{Harvest Index, } N, T_L, \theta)$	$\Delta\text{BM}=f(\text{PAR, Tageslänge, LAI, pot. Zunahme})$	Konvektion, Diffusion $f(\text{Angebot, Bedarf})$ Bedarf: $f(\text{optimale N-Konz.})$
GRANT	Mais Sojabohne	Wurzel Sproß	Temperatursumme	$f(N\text{-Pool; C-Pool})$ C-Pool: $f(\text{CO}_2, \text{PAR, LAI})$ N-Pool: $f(\theta, T, N \text{ in Boden und Pflanze})$	$f(\text{Ontogenese})$	$\Delta\text{BM}=f(N \text{ in Pflanze, lösl. Kohlenhydrate, Ontogenese})$	Konvektion, Diffusion $f(\text{Angebot, Bedarf})$ aktive Aufnahme

MODELL	Kulturlpflanze	Pflanzenteile	Ontogenese	Assimilatbildung	Assimilatverteilung	Biomassezuwachs Wurzelerwicklung	N-Entzug
HERMES	Winterweizen	oberird. BM, Wurzel	Temperatursumme	f(PAR, LAI, T, θ)	f(Ontogenese) Erhaltungssat- mung=f(BM, T, Effizienz) 30 % für Wachstumsatmung	$\Delta BM=f(N$ in Pflanze, Assimilate) Z_r : S-Kurve, f($Z_r^{max}, \Sigma T$)	Konvektion, Diffusion f(Bedarf, Angebot) Bedarf=f(n in BM)
LAFOLIE	beliebig	nein	nein	nein	nein	keine BM-Berechnung	1.Möglichkeit: f(θ, N -Konz. im Boden) 2.Möglichkeit: Michaelis-Menten-Kin. f(Bedarf, Wurzelichte, Angebot)
LEACHN	beliebig	nein	Zeit seit Saat / Gesamtzeit	nein	nein	keine BM-Berechnung	f(Angebot, Bedarf)
LONFAS	kein Pflanzenmodell						
NLEAP	beliebig	nein	nein	nein	nein	keine BM-Berechnung	S-Kurve f(Angebot, Bedarf, Pflanzenart)
N-SIM	Sommer- und Winterweizen	Wurzel, Halm, Blatt, Korn	Temperatursumme	f(PAR, LAI, T, θ , N)	f(Ontogenese, θ, N)	$\Delta BM=f$ (Ontogenese)	f(Angebot, Bedarf)
NTRIM							
NWHEAT	Winterweizen	Blätter, Halm, Wurzel, Körner, Reservon	Temperatursumme	f(PAR, LAI, N, θ)	f(Ontogenese)	$\Delta BM=f$ (Assimilate, Proteingehalt, Umwandlungseffizienz) Z_r =lineare Rate=f(θ, T)	f(Bedarf, Angebot, Z_r , θ , oberird. BM) Konvektion und Diffusion
RENLEM	kein Pflanzenmodell						