Die CERES-Modelle - Übersicht, Weiterentwicklungen, Erfahrungen

Friedrich Hoffmann, Kiel

1. Einleitung

Die vorliegenden CERES-Modelle (*Jones et al.*, 1986; *Ritchie,* 1988) beschreiben Entwicklung, Wachstum, Wasser- und Stickstoff- sowie Temperaturhaushalt von Mais-, Weizen-, Gerste-, Reis- und Hirse-Ökosystemen. Analog zu den CERES-Modellen wird die Serie der GRO-Modelle für Leguminosen entwickelt (*Boote et al.,* 1988; *Hoogenboom et al.,* 1991; *Jones et al.,* 1988), es gibt hier Modelle für Bohnen, Sojabohnen und Erdnüsse. Diese wurden zunächst ohne Stickstoffteil erarbeitet, man unterstellte, daß durch die Rhizobiensymbiose eine optimale N-Versorgung gesichert wird. Seit kurzem wird daran gearbeitet, auch die N-Fixierung durch die Knöllchenbakterien zu modellieren, doch sind die Arbeiten noch nicht abgeschlossen. Analog erfolgt die Erarbeitung der SUBSTOR-Modelle, von denen bisher ein Kartoffelmodell vorliegt. In Arbeit ist ein Modell für Taro (*Goenaga et al.,* 1991). Die Erarbeitung weiterer Modelle ist vorgesehen. Die Arbeit an diesen Modellen wird seit einigen Jahren von dem Programm "International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer" des Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources der Univertät Manoa, Hawai, koordiniert. Zielstellung ist "to accelerate the flow of agrotechnology transfer to and between developing countries on a cost-effective and scientific basis to improve the understanding of cropping systems, provide decision makers with the means to predict crop yields using crop simulation models, and use crop models to develop management strategies at all levels" (*Uehara,* 1985). Diese Zielstellung ist nicht identisch mit der des Kieler Ökosystemprojekts, sie erfordert aber Modelle, die denen im Ökosystemprojekt benötigten recht nahe kommen. Im Gegensatz zu anderen Modellen, die für ähnliche Zwecke erarbeitet wurden, sind in den CERES- und den übrigen vom IBSNAT koordinierten Modellen Entwicklung und Wachstum der Pflanzen sowie Bodenprozesse relativ ausgewogen dargestellt.

Alle IBSNAT-Modelle verwenden einheitliche Bodenwasser-, -stickstoff- und -temperaturmodelle und betrachten das System nur in in seiner vertikalen Strukturierung. Sie sind in FORTRAN 77 programmiert und verwenden für die Ein- und Ausgabe ein standardisiertes Datenformat. In neueren Programmversionen sind die CERES-Modelle darüber hinaus mit umfangreichen Dialogmenüs sowie mit einer Graphikausgabe von In- und Outputdaten ausgestattet.

Zur Zeit wird daran gearbeitet, ein mit Ertragsbildungsmodellen koppelbares Bodenmodell mit der Bezeichnung SALUS (*Ritchie*, 1991) zu entwickeln. Dies erfolgt auf der Grundlage der in den CERES-Modellen benutzten Bodenmodelle. In Arbeit ist ferner eine Kopplung der genannten Modelle mit dem geographischen Informationssystem AEGIS (*Calixte et al.*, 1992).

2. Das Bodenwassermodell

2.1 Das Modell von *Ritchie*

Das Bodenwassermodell verwendet nicht die Fokker-Planck-Gleichung, sondern es ist ein vereinfachtes, von *Ritchie* (1972, 1985) entwickeltes Modell. Das hat folgende Vorteile:
- einfachere Parameterbestimmung,
- Vermeidung numerischer Probleme bei der Lösung der Differentialgleichung und
- größere Rechengeschwindigkeit.

In diesem Modell, das zeitlich in Tagesschritten arbeitet, wird der Boden in eine beliebige Zahl Schichten (in der Regel nicht mehr als 10) von beliebiger Schichtdicke unterteilt. Versickerung soll nur stattfinden, wenn Wassergehalte auftreten, die größer als die Feldkapazität sind. Zwischen dem Wassergehalt bei Feldkapazität und der vollen Porensättigung wird ein Zwischenwert SAT definiert. Wassermengen oberhalb SAT versickern sofort vollständig, von dem Wasser zwischen Feldkapazität und SAT versickert täglich ein bodenspezifischer Anteil, der für alle Schichten als gleich angesetzt wird. Eine Berücksichtigung von Grundwasser ist dadurch zunächst nicht möglich. Neben der Versickerung wird ein diffusiver Wassertransport zwischen den Bodenschichten bei Unterschieden im Wassergehalt oberhalb des permanenten Welkepunkts angesetzt.

Der obere Rand wird folgendermaßen behandelt. Bei Bewässerung, Niederschlag bzw. Schneeschmelze wird zunächst nach der Kurvenzahlenmethode des Soil Conservation Service ein oberirdischer Abfluß bestimmt und abgezogen, der Rest infiltriert in die oberste Bodenschicht. Basis der Verdunstung ist eine aus Lufttemperatur und Globalstrahlung unter Berücksichtigung des Albedo geschätzte potentielle Verdunstung (*Priestley et al.*, 1972) mit Korrekturen bei Temperaturen über 35 bzw. unter 5 °C. Die Bodenevaporation wird nach *Ritchie* in zwei Stadien formuliert. Im ersten erfolgt potentielle, im zweiten mit der Zeit abnehmende Evaporation, bei Niederschlag kann wieder das erste Stadium erreicht werden usw.

Die Wasseraufnahme durch die Pflanzen kann bei Blattflächenindexwerten größer als 3 maximal gleich der potentiellen Evapotranspiration sein. Bei kleinerem Blattflächenindex geht sie zugunsten der Bodenverdunstung ES zurück. Mit Hilfe der Durchwurzelung und des Wassergehalts der durchwurzelten Bodenschichten wird eine seitens des Bodens aufnehmbare Wassermenge berechnet. Ist sie größer als die potentielle Transpiration EO, dann wird potentiell transpiriert, sonst ist die Transpiration gleich der aufnehmbaren Wassermenge.

Das Tiefen- und Längenwachstum der Wurzeln wird ebenfalls im Wassermodell simuliert. Dazu werden Angaben über die aus der Photosynthese für die Wurzel verfügbaren Assimilate benötigt. Deshalb wird das Wurzelwachstum bei den Pflanzenmodellen besprochen.

2.2 Ergänzungen, Weiterentwicklungen

Das Wassermodell wurde von mir durch folgende Weiterentwicklungen ergänzt:

- eine Routine für die Interzeption unter Verwendung einer Formel von *Braden* (1989),
- ein halbempirisches Schneemodell nach *Rachner & Matthäus* (1981), das mir physikalisch besser begründet erscheint als das sehr einfache Schneemodell im Modell CERES-Wheat.

Weiterhin wurde das Versickerungsmodell soweit verändert, daß die Simulation eines Grundwasserspiegels möglich wird. Dazu ist es erforderlich, schichtspezifische Versickerungskoeffizienten zu verwenden und das Bodenprofil bis zur Grundwasserstauschicht zu berücksichtigen. Die Stauschicht ist durch einen entsprechend niedrigen Versickerungskoeffizienten charakterisiert.

Ferner wurde ein Modell für den nachteiligen Einfluß hohen Wasserspiegels auf das Wachstum und die Ertragsbildung von Mais erarbeitet und an Daten von *Hardjoamidjojo et al.* (1982) getestet. Darin wird der Einfluß auf das Wachstum der Wurzeln, auf die Wasser- und Stickstoffaunahme, auf die Photosynthese und das oberirdische Wachstum abgebildet.

3. Das Boden-N-Modell

3.1 Das Modell von *Godwin et al.* (1984)

In dem originalen Boden-N-Modell werden folgende Prozesse in jeder Bodenschicht betrachtet: Düngung von mineralischen N-Düngern und Harnstoff, Transport von Nitrat, Mineralisation und Immobilisierung des N von frischer pflanzlicher organischer Substanz und Bodenhumus, Nitrifikation, Denitrifikation und Aufnahme durch die Pflanzenwurzeln.

Die Mineraldünger werden in der Bodentiefe, in die sie eingebracht werden, den entsprechenden Pools von NH_4- bzw. NO_3-N zugerechnet. Für die Harnstoffhydrolyse wird eine Reaktion 1. Ordnung mit Berücksichtigung eines Einflusses der Temperatur und des Gehalts an organischem C angesetzt.

Der Nitrattransport wird als rein konvektive Verlagerung mit dem Wasser entsprechend den darin enthaltenen Nitratkonzentrationen behandelt. Eine Verlagerung von Ammonium-N wird nicht berücksichtigt.

Bei der Mineralisierung frischer pflanzlicher organischer Substanz, die wie eine Reaktion 1. Ordnung formuliert wird, werden nur Ernte- und Wurzelrückstände betrachtet, für die mittlere Gehalte an löslichen Kohlenhydraten, Zellulose und Lignin angesetzt werden. Für diese Stoffgruppen werden unterschiedliche Mineralisierungskoeffizienten verwandt. Die Beeinflussung der Mineralisierungsrate durch die Bodentemperatur, den Wassergehalt und das C/N-Verhältnis wird durch Reduktionsfunktionen mit einem Wertebereich zwi-

schen 0 und 1 berücksichtigt. Es wird unterstellt, daß von dem freigesetzten N 20 % wieder in Bodenhumus festgelegt werden und eine gewisse Immobilisation in leicht umsetzbarer organischer Substanz erfolgt. Die Mineralisierung von N aus dem Bodenhumus wird ebenfalls als Reaktion 1. Ordnung formuliert mit entsprechendem Temperatur- und Wassereinfluß, hierfür ist die empirische Berücksichtigung von Unterschieden in der Mineralisierbarkeit des Humus verschiedener Böden über einen einzugebenden Korrekturfaktor DMOD vorgesehen.

Bei der Nitrifikation wird nicht zwischen den beiden Reaktionen NH_4->NO_2 und NO_2->NO_3 unterschieden. Sie wird als Monod-Reaktion in Abhängigkeit vom NH_4-Gehalt unter Berücksichtigung des Einflusses von Temperatur, Wasser, pH-Wert und einem von Tag zu Tag fortgeschriebenen relativen Nitrifikationspotential modelliert, letzteres dient offensichtlich einer approximativen Erfassung des Einflusses von Schwankungen in der Menge an nitrifizierenden Mikroorganismen.

Denitrifikation soll nur bei Wassergehalten oberhalb der Feldkapazität eintreten. Der im Boden vorhandene organische C wird über Regressionsbeziehungen in lösliche Kohlenhydrate umgerechnet, die als das reduzierendes Agens behandelt werden. Der Prozeß wird wieder als Reaktion 1. Ordnung formuliert unter Berücksichtigung eines Einflusses von Wasser und Temperatur.

Für die N-Aufnahme wird ein Bedarf durch die Pflanzen und ein Angebot aus dem Boden formuliert, die Aufnahme ist das Minimum beider Größen. Das Angebot wird aus den Gehalten der verschiedenen durchwurzelten Bodenschichten an NH_4-N, NO_3-N, Wasser sowie der Wurzellängendichte berechnet. Der Bedarf ergibt sich aus der Differenz zwischen optimalem und realem N-Gehalt der Pflanzenorgane einschließlich dem N-Bedarf der am betreffenden Tag zuwachsenden Pflanzenmasse. Die optimalen N-Gehalte von Sproß und Wurzeln errechnen sich als Funktion des Entwicklungsstadiums.

3.2 Ergänzungen, Weiterentwicklungen

Das Boden-N-Modell wurde um ein Submodell zur Berücksichtigung von tierischen organischen Düngern, bes. Gülle, erweitert (*Hoffmann et al.*, 1993). Darin werden folgende Prozesse berücksichtigt: Infiltration der Gülle in den Boden bei der Ausbringung, Ammoniakverdunstung, Mineralisierung von organisch gebundenem N, Einarbeitung in den Boden, Versickerung löslicher organischer Güllebestandteile und Humifizierung. Die Parameterschätzung erfolgte für die Ammoniakverdunstung an Hand von experimentellem Datenmaterial von *Bless* (1990) sowie Angaben von *Rank* (1988) und *Horlacher et al.* (1990), für die übrigen Prozesse an Hand von Literaturdaten (*Johnston et al.*, 1989; *Spallacci*, 1981; *Maidl et al.*, 1989; *Ndayegamiye et al.*, 1989). Als zusätzliche Inputgrößen werden dazu benötigt: Gülleausbringungs- und -einarbeitungstag, Gesamt-N-Menge in der ausgebrachten Gülle, Anteil Ammonium-N, Einarbeitungstiefe und eine Codenummer für die Art des organischen Düngers (Rinder-, Schweine-, Mischgülle, Stallmist).

4. Das Bodentemperaturmodell

Für die Schätzung der Bodentemperatur wird in den originalen CERES-Modellen ein vereinfachtes Modell verwandt, das *Williams et al.* (1984) für das Erosionsmodell EPIC entwickelt hatten. In diesem Modell wird der Einfluß der aktuellen meteorologischen Bedingungen (Strahlung, Temperatur) mit der Bodentiefe unzureichend gedämpft und verzögert, deshalb werden mit zunehmender Tiefe die Fehler der simulierten Werte immer größer. Als Nachteil wird von den CERES-Autoren ferner empfunden, daß vor allem in den oberflächennahen Schichten die für verschiedene pflanzenphysiologische Prozesse bedeutsamen Temperaturextrema nicht bestimmt werden können.

Aus diesem Grunde wurde auf der Basis der Diffusionsgleichung ein anderes Bodentemperaturmodell ausgearbeitet (*Hoffmann et al.*, 1993), das diese Fehler nicht mehr aufweist. Als oberer Rand wurde die Temperatur in 5 cm Höhe über der Bodenoberfläche verwandt. Aus Daten von Kiel und Michigan wurden Näherungsformeln für die Bestimmung des Tagesgangs in 5 cm Höhe bei Kenntnis der Minimum- und Maximumtemperaturen in 2 m Höhe bestimmt. Dabei wurden die Globalstrahlung, der Blattflächenindex, die Blattmasse und die Evapotranspiration berücksichtigt. Ferner wurde der Einfluß des Blatts auf den Wärmeübergang in die oberste Bodenschicht näherungsweise einbezogen. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach *McInnes* (1981) wurden Formeln ergänzt, die eine Schätzung mit dem Standard-Input-Datensatz der CERES-Modelle ermöglichen. Für den unteren Rand werden eine empirische und eine aus der analytischen Integration der Diffusionsgleichung sich ergebende Lösung angegeben. Eine Berücksichtigung des konvektiven Terms in der Wärmeleitgleichung erwies sich als überflüssig.

5. Die Pflanzenmodelle

5.1 Die originalen Modelle

Beim Mais-, Weizen- wie auch beim Gerstemodell wird die Entwicklung von der Keimung bis zur Vollreife in 7, beim Kartoffelmodell in 2 Stadien unterteilt. Diese detaillierte Beschreibung der Pflanzenentwicklung ist als ein besonderer Vorteil der CERES- und verwandten Modelle anzusehen. Zwei weitere Stadien dienen der Bestimmung der Verhältnisse ohne Pflanzenbestand und der Phase Aussaat-Keimung.

Bei den Leguminosenmodellen, die von einer Arbeitsgruppe in Florida erarbeitet wurden und auf die hier nicht im Detail eigegangen werden kann, ist die Entwicklung noch weiter unterteilt. So werden bei dem Bohnenmodell 14, beim Sojabohnenmodell 16 Stadien unterschieden.

Die Entwicklung von einem Stadium zum anderen wird vorwiegend über Temperatursummen, z.T. auch durch photoperiodische Einflüsse quantifiziert. Das jeweilige Stadium bestimmt, in welcher Weise die gebildeten Assimilate auf die verschiedenen Pflanzenorgane verteilt werden. Die Bildung der einzelnen Blätter wird über die Berechnung von

Phyllochronen erfaßt, wobei die Größe der einzelnen Blätter abhängig vom Entwicklungsstadium ist. Neben dem Wachstum wird eine stadienabhängige Alterung der Blätter berücksichtigt. Vom Zeitpunkt des Erscheinens der generativen Organe bzw. bei den Kartoffeln vom Beginn der Knolleninitiation an erfolgt eine Umlagerung von organischer Masse und N aus den vegetativen in die generativen Organe. Bei Weizen und Gerste werden im ersten Stadium nach dem Auflaufen die Vernalisation sowie Schäden durch Kälteeinwirkung einbezogen. Es zeigte sich, daß mit dem Gerstemodell auch eine Abbildung von Wachstum und Entwicklung bei Hafer möglich ist.

6 bis 8 sortenspezifische genetische Parameter, die für jede Sorte bestimmt werden müssen, determinieren Unterschiede im Entwicklungsverlauf und im Ertragsbildungspotential. Bei den Leguminosenmodellen werden 20 bis 30 genetische Parameter benötigt.

Die Stoffbildung wird durch eine Gleichung für die Nettoassimilation abgebildet. Photosynthese und Atmung werden nicht gesondert betrachtet. Das mag zunächst als ein gewisser Nachteil erscheinen, doch zeigt sich, daß dadurch bei sommer- und winterannuellen Arten keine Probleme entstehen. Für die Nettoassimilation wird bei der C_4-Pflanze Mais eine lineare, bei den C_3-Pflanzen Weizen und Gerste kurvilineare Abhängigkeiten von der photosynthetisch aktiven Strahlung angegeben. Dabei wird eine exponentielle Abhängigkeit vom Blattflächenindex sowie ein über Reduktionsfunktionen wiedergegebener Einfluß von Temperatur, N- und Wasserversorgung einbezogen. In den Leguminosenmodellen sind diese Zusammenhänge detaillierter wiedergegeben.

Beim Wurzelwachstum ist das Massen-, das Tiefen- und das Längenwachstum zu unterscheiden. Das Massenwachstum ergibt sich aus dem Assimilatverteilungsmodus des jeweiligen Stadiums. Das Tiefenwachstum erfolgt als Funktion der Temperatur und der Wasserversorgung, bis die maximale Wurzeltiefe erreicht worden ist. Die maximale Wurzeltiefe ergibt sich aus einem Durchwurzelbarkeitsfaktor, der empirisch für jede Bodenschicht vorzugeben ist. Bei der Bestimmung der Wurzellängendichte in einer Schicht wird die neugebildete Wurzelmasse in Wurzellänge umgerechnet und unter Berücksichtigung der Wasserversorgung und der Durchwurzelbarkeit auf die verschiedenen Bodenschichten verteilt. Dabei wird eine maximale Wurzellängendichte von 5 cm/cm^3 vorgegeben, die nicht überschritten werden kann, außerdem wird ein gewisser Verlust durch Absterben angesetzt.

5.2 Ergänzung für den Einfluß der CO_2-Konzentration

Um Rechnungen über die Wirkung eines erhöhten CO_2-Gehalts auf das Wachstum und die Ertragsbildung abbilden zu können, wurde, ausgehend von Photosynthesemessungen von *Gaastra* (1959), in das Weizenmodell ein Ansatz auf der Basis der Michaelis-Menten-Gleichung eingefügt. In Tab. 1 sind Ergebnisse von Simulationsrechnungen wiedergegeben mit einem Szenario, das mittleren schleswig-holsteinischen Verhältnissen entspricht.

Tab.1: Einfluß von erhöhtem CO_2-Gehalt und um 2° erhöhter Temperatur auf den Ertrag und die N-Aufnahme von Winterweizen

CO_2-Gehalt, µL L^{-1}	300	375	450	600
Normaltemperatur				
Korn, dt/ha	63.3	69.4	73.3	79.7
Stroh, dt/ha	60.8	65.3	69.1	72.3
N-Aufnahme, kg/ha	170.6	172.5	176.7	179.0
Temperatur + 2°				
Korn, dt/ha	56.0	62.0	66.4	72.4
Stroh, dt/ha	61.8	65.9	67.5	68.5
N-Aufnahme, kg/ha	175.8	177.3	178.6	180.8

Die Simulationsergebnisse zeigen eine Zunahme des Kornertrags bei Verdopplung des CO_2-Gehalts der Luft um rund 30 %, während eine Zunahme um 75 µL L^{-1} bereits eine Steigerung um 10 % bringt. Der Strohertrag steigt ebenfalls, wenn auch in geringerem Maße. Noch kleiner ist die Steigerung bei der N-Aufnahme, d.h. der Eiweißgehalt des Korns nimmt ab.

Eine Erhöhung der Temperatur um 2° senkt den Kornertrag um rund 10 %. Da gleichzeitig die N-Aufnahme sich vergrößert, wird dabei der Eiweißgehalt des Korns deutlich gesteigert. Der Strohertrag wird demgegenüber durch die Temperaturerhöhung nicht wesentlich verändert. Diese Wirkung ist in erster Linie die Folge einer verkürzten Kornfüllungsperiode. Die Ergebnisse (vgl. auch *Hoffmann,* 1991) entsprechen in der Literatur mitgeteilten Befunden (*Gifford,* 1988).

6. Erfahrungen bei der Arbeit mit den Modellen und Schlußfolgerungen

Die Arbeiten konzentrierten sich auf das Maismodell, da im Schwerpunktforschungsraum des ökologischen Forschungsprojekts der Universität Kiel sich ein Schlag befindet, auf dem Silomais-Monokulturanbau mit Gülledüngung erfolgt. Dies sowie die Bedeutung der Gülledüngung für die Umweltkontamination machten die Ausarbeitung des oben erwähnten Modellteils für die organische Düngung erforderlich (*Hoffmann et al.,* 1993).

Das Modell wurde an den Meßdaten des genannten Maisschlags aus den Jahren 1989 - 1991 getestet. Dabei wurden einige Fehler im Maismodell korrigiert und Anpassungen vorgenommen. Neben der Schätzung der genetischen Parameter, die für die angebauten Sorten nicht bekannt waren, betraf dies vor allem den Faktor DMOD für die Mineralisierung des Humusstickstoffs. Dieser soll nach Angaben der Modellautoren in Abhängigkeit

vom Bodentyp den Wert 1 nicht überschreiten. Es zeigte sich aber, daß bei intensiv bewirtschafteten Böden in guter Kultur der Faktor DMOD über 1 ansteigen und in Fällen wie der mit Gülle gedüngten Maismonokultur sich bis auf 3 erhöhen kann. Intensive Bewirtschaftung führt somit zu einer Akkumulation von leichter umsetzbaren organischen Stickstoffverbindungen. Bei niedriger bzw. unterlassener N-Düngung reagiert das Wachstum im Modell erwartungsgemäß recht sensitiv auf Veränderungen des DMOD-Werts. Das konnte auch an den von *Ritchie* zusammen mit dem Modell übergebenen Beispieldaten beobachtet werden.

Insgesamt sind für den Stickstoffumsatz im Boden weitere Untersuchungen und Modellverbesserungen wünschenswert, insbesondere für die Mineralisierung, die dabei auftretenden Primingeffekte, die Denitrifikation und Nitratammonifizierung.

Nach den Anpassungsarbeiten wurden mit dem Modell Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei stand im Mittelpunkt die Frage der Wirkung intensiver organischer Düngung auf Mineralisierung, Nitratauswaschung und Akkumulation von organisch gebundenem Stickstoff. Die Ergebnisse sind in den Arbeiten von *Hoffmann* (1992) sowie *Hoffmann & Ritchie* (1993) dargestellt.

Ein Beispiel dieser Ergebnisse ist in Abb. 1 wiedergegeben. Das Szenario war: Auf Lößlehm wird eine Güllegabe entsprechend 200 kg N/ha am 5. August, am 25. November oder am 15. März zu nachfolgendem Mais ausgebracht, und zwar unter den Witterungsbedingungen von 25 verschiedenen Jahren in Schleswig-Holstein. Der hygienische Grenzwert von 50 mg NO_3/L bzw. 11 mg N/L im Sickerwasser in 2 m Tiefe wird bei

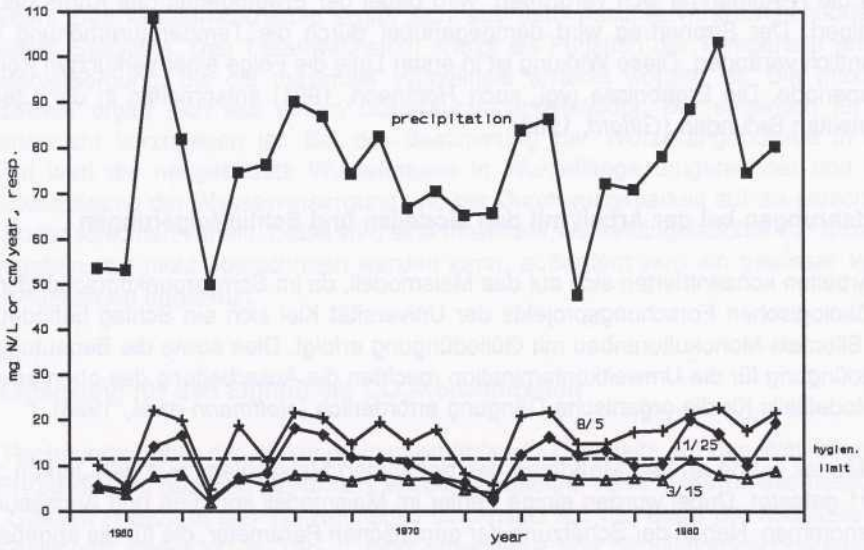

Abb. 1: Gülleausbringungstermin und Nitrat-N-Konzentration im Sickerwasser, Lößlehm

Düngung im August ohne folgende Zwischenfrucht fast in allen Jahren überschritten, bei Düngung im November etwa in jedem zweiten Jahr. Nur Ausbringung Mitte März, also kurze Zeit vor der Bestellung, garantierte eine Einhaltung dieses Grenzwertes. Bei entsprechenden Rechnungen mit Sandboden war die Situation wesentlich schlechter, auch bei Ausbringung Mitte März war eine Gabe von 200 kg N/ha zu hoch.

Für eine Anpassung des Weizenmodells wurden mir von *Hanus & Fahnert* (1990) freundlicherweise Daten aus einem Stickstoffsteigerungsversuch in Hohenschulen bei Kiel zur Verfügung gestellt. Neben der auch hier erforderlichen Schätzung der genetischen Parameter mußten gewisse Korrekturen an dem Photosyntheseparameter sowie den kritischen N-Gehalten in der Pflanze vorgenommen werden entsprechend unseren Erfahrungen, daß bis zur Milchreife noch eine intensive N-Aufnahme stattfinden kann. Die beim Maismodell gemachten Erfahrungen bezüglich des Mineralisierungsfaktors DMOD bestätigten sich auch beim Weizenmodell.

Entsprechend dem gestellten Ziel, die Modelle mit dem in Kiel von *Reiche* (1991) entwikkelten WASMOD/STOMOD-Modellsystem zu koppeln und mit Hilfe des GIS flächenmäßig zu nutzen, wurden aus den Weizen-, Gerste- und Kartoffelmodell die umfangreichen Menüoberflächen entfernt, um eine vereinfachte, für diese Kopplung geeignete Programmform dieser Modelle zu erhalten, so wie sie die Programmversion des Maismodells von 1986 darstellt (vgl. *Jones et al.,* 1986). Dabei wurden gleichzeitig alle Ergänzungen und Korrekturen bei den Bodenprozessen, die in das Maisprogramm eingearbeitet worden waren, in die anderen Modelle übertragen.

Die Modelle sind detailliert genug, um andere Ökosystemkomponenten anzukoppeln bzw. einzubeziehen wie z. B. Konsumenten (Schaderreger), Konkurrenten (Unkräuter), weitere Nährelemente, Pestizide usw. Wie die Arbeiten von *Batchelor et al.* (1992), *Pinnschmidt et al.* (1991) und anderen Autoren zeigen, gibt es hier bereits brauchbare Modellansätze, um Verluste von Blättern und anderen Pflanzenorganen und deren Wirkung auf das weitere Wachstum der Pflanzen abzubilden.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, daß sich die CERES-Modelle als eine recht gute Basis für Agroökosystemmodelle erweisen. Für die zahlreichen Teilprozesse wurden Modellformulierungen verwandt, die weitgehend durch fachliches Wissen untermauert sind. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil dieser Modelle ist, daß sie in mathematischer Hinsicht einfach gehalten sind, dadurch auch für den Nichtmathematiker ausreichend verständlich bleiben und mathematische Probleme vermeiden. Sie umfassen alle wichtigen Elemente und Prozesse, die in Agroökosystemen von Bedeutung sind. Die standardisierten Inputgrößen sind einfach zu beschaffen bzw. zu schätzen. Eine Ergänzung von noch fehlenden Teilen wie auch ein eventueller Austausch von Algorithmen ist, wie sich bei der Arbeit mit den Modellen gezeigt hat, nach Einarbeitung in die Programme mit überschaubarem Aufwand möglich.

7. Literatur

Batchelor, W.D., J.W. Jones, K.J. Boote, H.O. Pinnschmidt (1992): assessing pest and disease damage with DSSAT. Agrotechnol. Transfer No. 16, 1992, 1 - 8.

Bless, H.G. (1990): Ammoniak-Emissionen nach der Ausbringung von Flüssigmist. Studie im Auftrag des Ministers für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei und der Landwirtschaftskammer von Schleswig-Holstein.

Boote, K.J., J.W. Jones, G. Hoogenboom, G.G. Wilkerson, S.S. Jagtap (1988): Peanut crop growth simulation model. User's Guide. Florida Egric. Exp. Stat. J. Nr. 8420.

Braden, H. (1989): Das agrarmeteorologische Modell AMBETI unter besonderer Berücksichtigung der Weiterentwicklungen. In: Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen, Teilprojekt A4 "Agrarmeteorologie", Forschungsbericht zum SFB 179 der DFG, TU Braunschweig.

Calixte, J.P., F.H, Beinroth, J.W. Jones, H. Lal (1992): Linking DSSAT to a Geographic Information System AEGIS. Agrotechnology Transfer N. 15, S.1 - 7.

Gaastra, P. (1959): Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. Med. Landbouwhogeschool Wageningen 59, S. 1 - 68.

Gifford, R.M. (1988): Direct effects of higher carbon dioxide concentrations on vegetation. In: Pearman, G.I. (Ed): Greenhouse - planning for climatic change. CSIRO Melbourne, Australien, S. 506 - 519.

Godwin, D.C., C.A. Jones, J.T. Ritchie, P.L.G. Vlek, L.G. Youngdahl (1984): The water and nitrogen components of the CERES models. Proc. Internat. Symp. on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, Patancheru, Indien, ICRISAT Center.

Goenaga, R., U. Singh, F.H. Beinroth, H. Prasad (1991): SUBSTOR-Aroid: A model in the making. Agrotechnology Transfer Nr. 14, S. 1 - 4.

Hanus, H., Fahnert (1990): Persönl. Mitteilung.

Hoffmann, F. (1991): Preliminary simulation results on the influence of increased CO_2 content and of increased temperature on the yield of winter wheat. Draft Kiel.

Hoffmann, F. (1992): Organische Düngung und Nitratauswaschung - Simulationsergebnisse. Mitt. Deutsch. Bodenkundl. Ges. 68, S. 71 - 74.

Hoffmann, F., R. Beinhauer, F. Dadoun (1993): Soil temperature model for CERES and similar crop models. Z. Acker- und Pflanzenbau 170, 56 - 65.

Hoffmann, F., J.T. Ritchie (1993): Model for slurry and manure in CERES and similar models. Z. Acker- u. Pflanzenbau, im Druck.

Hoogenboom, G., J.W. White, J.W. Jones, K. J. Boote (1991): Dry bean grop growth simulation model. User's guide. Florida Agric. Exp. Stat. J. nr. N-00379.

Horlacher,D., H. Marschner (1990): Schätzrahmen zur Beurteilung von Ammoniakverlusten nach der Ausbringung von Rinderflüssigmist. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 153, S. 107 - 115.

Johnston, A.E., S.P. McGrath, P.R. Poulton, P.W. Lane (1989): Accumulation and loss of nitrogen from manure, sludge and compost: Long-term experiments at Rothamsted and Woburn. In: J.Aa. Hansen, K. Henriksen (eds): Nitrogen in organic wastes applied to soils. Academic Press London etc., S. 126 - 139.

Jones, C.A., J.R. Kiniry, P.T. Dyke, D.B. Farmer, D.C. Godwin, S.H. Parker, T.J. Ritchie, D.A. Spanel (1986): CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press.

Jones, J.W., K.J. Boote, S.S. Jagtap, G. Hoogenboom, G.G. Wilkerson (1988): Soybean crop growth simulation model. User's Guide. Florida Agric. Exp. Stat. J. Nr. 8304.

Maidl, F.X., G. Fischbeck (1989): Effects of long-term application of slurry on soil nitrogen mineralisation. J. Agron. Crop Sci. 162, 310 - 319.

McInnes, K.J. (1981): Thermal conductivities of soils from dryland wheat regions of eastern Washington. M.S. Thesis Washington State University, Pullman.

Ndayegamiye, A., D. Cote (1989): Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. Canad. J. Soil Sci. 69, S. 39 - 47.

Pinnschmidt, H.O., P.SD. Teng, W.D. Batchelor (1991): Simulation of damage effects of multiple pests and diseases in rice. Poster at the Internat. Symp. on Systems Approaches for Agric. Development 2. - 6. 12. 1991 Bangkok.

Priestley, C.M.B., R.J. Taylor (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100, S. 81 - 92.

Rachner, M., H. Matthäus (1981): Darstellung eines Verfahrens zur Berechnung der Schneedeckenentwicklung. Z. Meteorol. 31, S. 117 - 123.

Rank, M. (1988): Untersuchungen zur Ammoniakverflüchtigung nach Gülledüngung. Diss. Techn. Univ. München, Fak. f. Landwirtschaft.

Reiche, E.W. (1991): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Modellsystems zur Beschreibung und flächenhaften Bilanzierung der Wasser- und Stickstoffdynamik in Böden. Kieler Geograph. Schriften Bd. 79, S. 1 - 150.

Ritchie, J.T. (1972): Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Res. 8, 1204-1213.

Ritchie, J.T. (1985): A user-oriented model of the soil water balance in wheat. In: Fry,E., T.K. Atkins (eds): Wheat growth and modeling. Plenum Publ. Corporation, NATO-ASI series, S. 93 - 105.

Ritchie, J.T. (1988): CERES Wheat. Book draft Michigan State University.

Ritchie, J.T. (1991): persönl. Mitteilung.

Spallacci, P. (1981): Nitrogen accumulation in different soils after repeated applications of pig slurry. In: J.C. Brogan (Edt): Nitrogen losses and surface runoff. Martinus Nijhoff/Junk Publ. The Hague, Boston, London, S. 377 - 383.

Uehara, G. (1985): IBSNAT progress report 1982-1985. Univ. of Hawai at Manoa, Honolulu.

Williams, J.R., C.A. Jones, P.T. Dyke (1984): A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27, 129-144.