Einsatzmöglichkeiten prozeßorientierter Boden-Pflanzen-Modelle für agrarökologische Fragestellungen und als Basismodelle für zukünftige dynamische Landschaftsmodelle

Karl-Otto Wenkel, Müncheberg

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird diskutiert, welchen Beitrag eindimensionale Boden-Pflanzen-Modelle bereits heute für die Lösung ökologischer Fragestellungen leisten können und wo ihre Grenzen liegen. Aus der Sicht der Agrarlandschaftsforschung werden anschließend Anforderungen an dynamische Landschaftsmodelle herausgearbeitet und erste konzeptionelle Überlegungen zur Entwicklung eines dynamischen Landschaftsmodells vorgestellt. Die wesentlichsten Unterschiede zwischen einem Agroökosystem- und einem Landschaftsmodell werden aufgezeigt.

Summary

The present paper discusses possibilities and limits of one-dimensional soil-plant-models to solve actual ecological questions. After this, demands for dynamic landscape models from the viewpoint of landscape research are elaborated and preliminary conceptual considerations to create such models are presented. Finally, the fundamental differences between agroecosystem and landscape models are pointed out.

1 Einleitung

Die Landwirtschaft in den alten und insbesondere in den neuen Bundesländern befindet sich mitten in einem gewaltigen Umstrukturierungsprozeß. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Sie sind sowohl politischer, ökonomischer als auch ökologischer Natur (Systemwandel in den östlichen Bundesländern, Überproduktion, Preisverfall, verstärkt sichtbar werdende ökologische Probleme durch die Intensivierung der Landwirtschaft)

Vor dem Hintergrund des dramatischen sozioökonomischen Wandels der Landwirtschaft, der sich gegenwärtig EG-weit vollzieht, werden sowohl Methoden und Modelle für strategische Betriebsentscheidungen und zur Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes gefordert, als auch in verstärktem Maße Werkzeuge, mit deren Hilfe komplexe ökologisch-ökonomische Wirkungsanalysen und Langzeitprognosen möglich sind.

Mehr denn je müssen wir heute auch in der Agrarforschung unseren Blick weiten und uns mit den ökosystemaren Auswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion auf die Agrarlandschaft insgesamt beschäftigen.

Der Hauptgrund hierfür ist, daß Agroökosysteme im thermodynamischen Sinn offen sind, mit ihren Nachbarsystemen Energie, Materie und Informationen austauschen und deren

Struktur und Funktion nur im Verbund mit benachbarten Ökosystemen verstanden werden kann (*Haber*, 1984)
Wenn wir also nach Lösungen für nachhaltige Landnutzungssysteme suchen, dürfen wir nicht nur die Fruchtfolge bzw den einzelnen Betrieb sehen, sondern müssen uns insgesamt mit dem ökologischen Wirkungsgefüge der Agrarlandschaft befassen.
Da gleichzeitig zwischen Landschaft, Landnutzung und menschlicher Gesellschaft vielfältige Wechselwirkungen bestehen (sozioökonomische Ursachen prägen letztlich den Nutzungsanspruch einer Landschaft) ist ohne die Beschreibung und Bewertung gesellschaftlicher Ursachen von Landnutzungsänderungen und ihrer Rückwirkung auf Bewohner und Nutzer von Landschaften ein umfassendes Verständnis der vernetzten, in Landschaften ablaufenden Prozesse und der Maßnahmen zu ihrer Beeinflussung nicht möglich.
In der vorliegenden Arbeit wird diskutiert, welchen Beitrag die auf dem Workshop "Expert-N" vorgestellten eindimensionalen Boden-Pflanzen-Modelle bereits heute für die Lösung ökologischer Probleme leisten können
Darüber hinaus wird auf den Begriff des Landschaftsmodells eingegangen. Zu lösende Probleme und erste Lösungsvorschläge werden vorgestellt.

2. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen eindimensionaler Boden-Pflanzen-Modelle

Über die Bedeutung von Modellen in der Ökosystemforschung wird nach wie vor sehr kontrovers diskutiert. Langsam scheint sich jedoch die Auffassung durchzusetzen, daß Modelle geeignete Mittel sein können, reale natürliche oder ökonomische Systeme besser zu verstehen sowie die Resultate verschiedener Einflußnahmen auf sie zu vergleichen bzw zu bewerten.
Da man mit Ökosystemen wegen der involvierten Zeitmaßstäbe und der Komplexität keine im klassischen Sinn geplanten Experimente durchführen kann, können mögliche langzeitige Entwicklungstendenzen letztendlich nur mit Hilfe von Simulationsmodellen abgeschätzt werden. Hierin liegt ihr eigentlicher Wert. Ohne solche Werkzeuge ist eine komplexe Agrarlandschaftsforschung praktisch nicht möglich. Modelle entwickeln sich immer mehr zu wichtigen Hilfsmitteln im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß, zunehmend werden sie jedoch auch zur Lösung praktischer Umweltprobleme eingesetzt (Abb. 1)

Modelle als Hilfsmittel im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß
.. zur Forschungsplanung
zur Beschreibung komplexer Zusammenhänge
.. zur Beschreibung der Dynamik komplexer Systeme
zur Bilanzierung von Fluß- und Transfergrößen
.. zur Prüfung von Hypothesen
... zur Parameterevaluierung
.. zur Speicherung erworbenen Wissens
.. zur Kommunikation zwischen Fachwissenschaftlern
zur Integration von Detailkenntnissen
Modelle als Hilfsmittel zur Lösung praktischer Umweltprobleme
.. zur Prognose der Auswirkungen von Nutzungsalternativen
... zur Durchführung von Planungsszenarien
... zur Extrapolation von Erkenntnissen
.. zur Information über komplexe Zusammenhänge und die Konsequenzen von Eingriffen

Abb.1 Modelle wichtige Hilfsmittel sowohl im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß als auch zur Lösung praktischer Umweltprobleme (*Müller & Windhorst,* 1991)

Analysiert man die Situation auf dem Gebiet der Modellentwicklung, so wird deutlich, daß gegenwärtig eindimensionale Prozeßmodelle im Vordergrund stehen. Nur wenige Modelle vermögen bisher, die in Naturräumen ablaufenden Prozesse mehrdimensional zu beschreiben

Trotz dieser Einschränkungen gibt es bereits zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von eindimensionalen Simulationsmodellen für ökologische Fragestellungen

- Abschätzung der Veränderung des Bodenwasserhaushalts und des Bodenstickstoffaustrags bei unterschiedlichen Arten und Formen der Flächenstillegung sowie Wiederaufforstung
- Prognose der langfristigen Veränderung des C-Gehalts der Böden infolge des Übergangs von intensiven zu extensiven Formen der Landbewirtschaftung

- Abschätzung des Risikos von Stickstoffausträgen verschieden intensiv bewirtschafteter Fruchtfolgen unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen

- Prognose möglicher Folgen von Klimaveränderungen auf die Biomasse- und Ertragsentwicklung landwirtschaftlicher Kulturen sowie die Veränderung der Wasser- und Stoffkreisläufe

- Abschätzung der Ertragspotentiale wichtiger Kulturpflanzen unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen als Grundlage für die landwirtschaftliche Regionalplanung

Auch als Hilfsmittel für die Festlegung ökologisch-ökonomisch begründeter Schwellenwerte für den Pflanzenschutz, die Präzisierung von Beregnungssteuerungssystemen sowie das Erkennen der Ursachen bzw. die Abschätzung der Risiken für erhöhte N-Austräge leisten Agroökosystem- bzw Bodenstickstoffmodelle bereits heute wertvolle Dienste (Abb. 2-4)

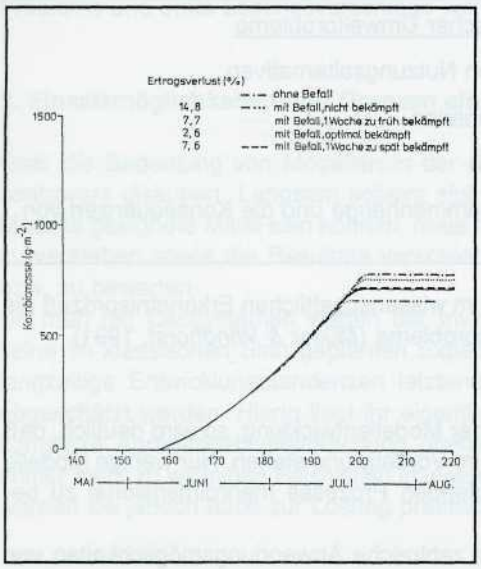

Abb.2: Abschätzung von Ertragsverlusten be untersch ed cher Bekämpfungsstrategie von Mehltau mit Hilfe des Agroökosystemmodells AGROSIM-W

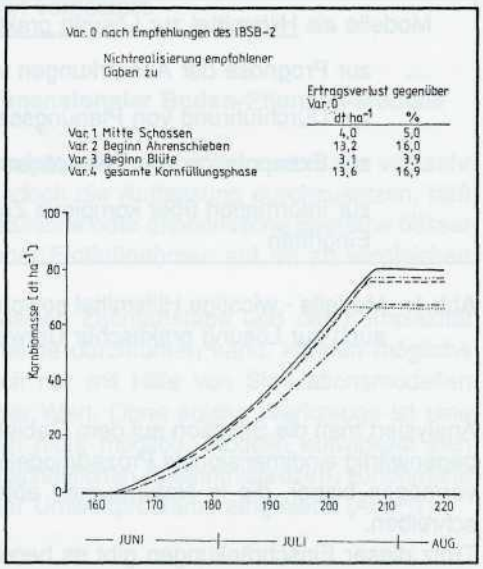

Abb. 3. Abschätzung zu erwartender Ertragsverluste mit Hilfe des Modells TRITSIM bei Nichtrealisierung der durch das Modell IBSB-2 empfohlenen Zusatzregengaben

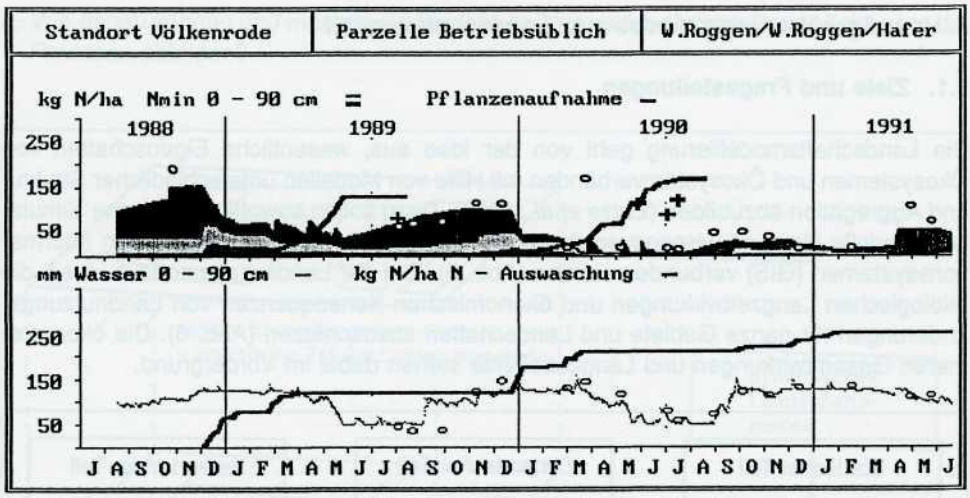

Abb.4. N-Auswaschungsverluste einer Fruchtfolge, berechnet mit dem Modell HERMES (*Kersebaum,* 1992)

So verschieden die Fragen und so unterschiedlich die verfügbare Datenbasis für die Anwendung der Prognosemodelle ist, so verschieden sind die Werkzeuge und Instrumentarien, die zur Beantwortung einer konkreten Frage eingesetzt werden können. Wissensbasierte Systeme wie "Expert-N", die die Auswahl bzw. Konstruktion eines an die Fragestellung und Datenlage angepaßten Simulationsmodells unterstützen, können hierbei eine wesentliche Hilfe sein.

Deutliche Einsatzgrenzen haben eindimensionale Agroökosystemmodelle immer dann, wenn detaillierte raum-zeitbezogene Aussagen gefordert werden, wie es z.B. bei der Abschätzung der Wasser- und Stoffflüsse in Wassereinzugsgebieten oder bei der Abschätzung der Veränderung der Artenvielfalt und -zusammensetzung in der Agrarlandschaft infolge veränderter Flächennutzung der Fall ist.

Werden raum-zeitbezogene Aussagen auf unterschiedlicher räumlicher Ebene gefordert, müssen Modelle zur Verfügung stehen, die zusätzlich die lateralen Transportprozesse sowie die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Ökotopen mit einer an die Fragestellung und Datenlage angepaßten Genauigkeit beschreiben.

Die Suche nach einem Instrument, mit dessen Hilfe eine modellgestützte integrative Betrachtung der abiotischen und biotischen Komponenten und Wechselbeziehungen einer Agrarlandschaft möglich ist, führt dann zum Begriff des dynamischen Landschaftsmodells.

3. Vom Agroökosystemmodell zum Landschaftsmodell

3.1 Ziele und Fragestellungen

Die Landschaftsmodellierung geht von der Idee aus, wesentliche Eigenschaften von Ökosystemen und Ökosystemverbänden mit Hilfe von Modellen unterschiedlicher Struktur und Aggregation abzubilden (*Lutze et al.*, 1993) Dazu sollen sowohl dynamische Simulationsmodelle als auch wissensverarbeitende Technologien mit geographischen Informationssystemen (GIS) verbunden werden (Abb. 5). Ziel der Landschaftsmodelle ist es, die ökologischen Langzeitwirkungen und ökonomischen Konsequenzen von Landnutzungsänderungen für ganze Gebiete und Landschaften abzuschätzen (Abb. 6) Die ökosystemaren Gesamtwirkungen und Langzeiteffekte stehen dabei im Vordergrund.

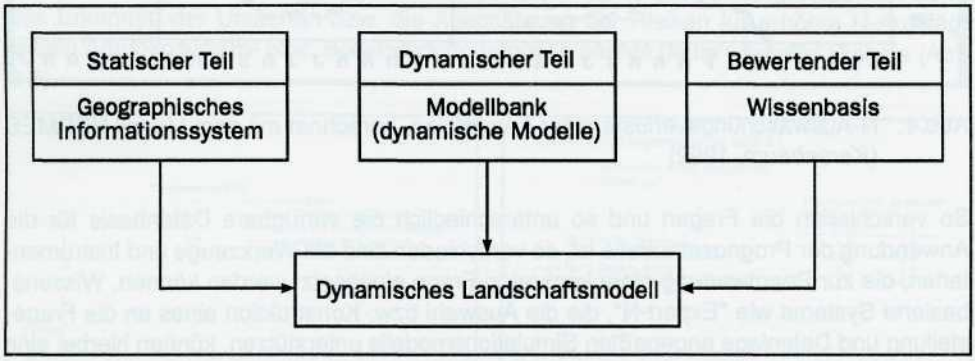

Abb.5: Komponenten eines dynamischen Landschaftsmodells

Wesen der Landschaftsmodellierung ist es **nicht**, ein einziges allgemeingültiges Landschaftsmodell zu entwickeln. Vielmehr sollen vor allem Methoden und Instrumentarien geschaffen werden, die zu Landschaftsmodellen für unterschiedlich große und unterschiedlich strukturierte Landschaftsräume zusammengefügt werden können. Das zu lösende Problem bzw die Fragestellung bestimmt folglich immer die Wahl der Mittel.
Auf dem Gebiet der Landschaftsmodellierung gibt es bislang keine allgemein anerkannte Vorgehensweise. Die existierenden nationalen und internationalen Ansätze sind sehr stark von den vorhandenen Voraussetzungen auf dem Gebiet der Ökosystem- bzw Agroökosystemmodellierung geprägt. Es besteht deshalb ein erheblicher methodischer Forschungsbedarf, der die Vorgehensweise und die Untersuchungsmethoden zwangsläufig beeinflussen muß. Folgende Hauptfragestellungen müssen beantwortet werden

1 Wie und mit welchen Mitteln lassen sich auf unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Ebene ablaufende ökologische Prozesse beschreiben und modellieren?

2. Wie müssen Standortmodelle sowie mittelmaßstäbliche und regionale Ökosystem- bzw Landschaftsmodelle strukturiert werden? Welche Strategie zur räumlichen und zeitlichen Diskretisierung ist anzuwenden?

3. Wie genau können und müssen die Modelle bei unterschiedlichem Raum-Zeitbezug die Prozesse abbilden?

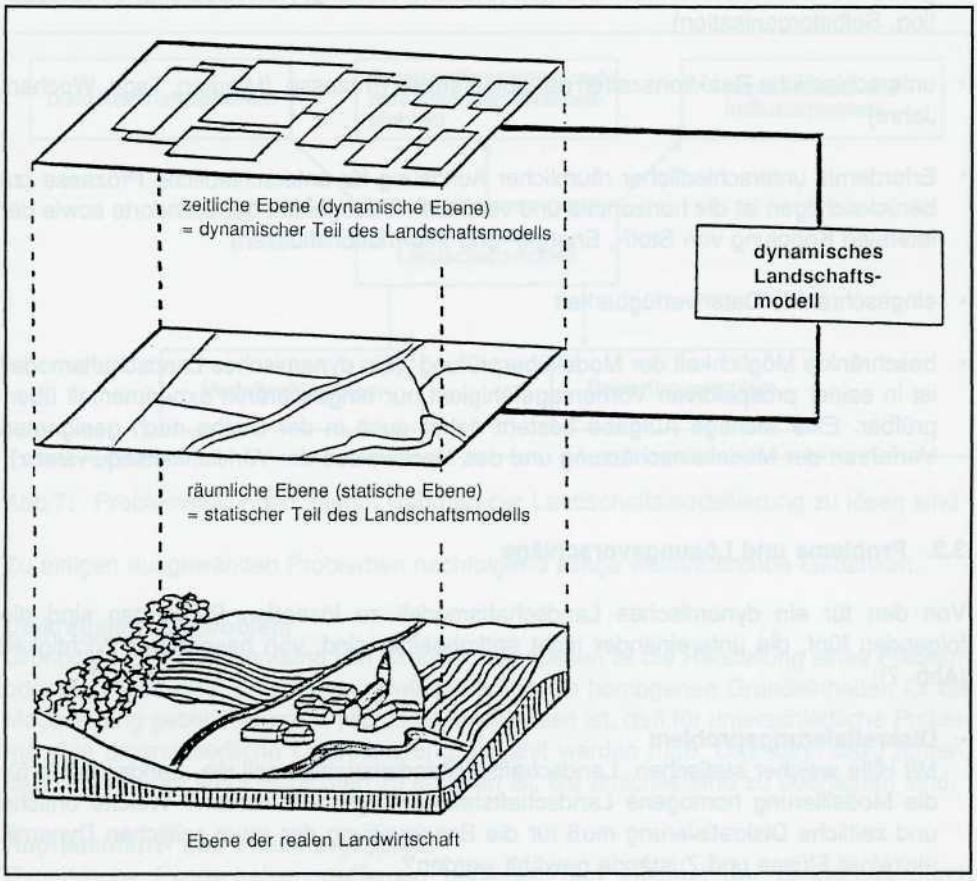

Abb.6: Reale Landschaft und Landschaftsmodell

3.2. Spezifik dynamischer Landschaftsmodelle

Wie jedes Simulationsmodell unterliegt auch ein dynamisches Landschaftsmodell gewissen Gesetzmäßigkeiten der Modellbildung und -überprüfung. Gegenüber bekannten Modellen für biologisch-ökologische Prozesse und Managementprobleme gibt es aber zumindest sechs wesentliche Unterschiede, die die Spezifik dynamischer Landschaftsmodelle ausmachen

- außerordentlich große Komplexität (es ist zu entscheiden, wieviel "Elemente" und wieviel "Struktur" in das Modell einbezogen werden soll, d.h.wie aggregiert wird)

- große Vielfalt von Steuermechanismen (Ursache-Wirkung, Rückkopplung, Selbstadaption, Selbstorganisation)

- unterschiedliche Reaktionszeiten der ablaufenden Prozesse (Minuten, Tage, Wochen, Jahre)

- Erfordernis unterschiedlicher räumlicher Auflösung für unterschiedliche Prozesse (zu berücksichtigen ist die horizontale und vertikale Heterogenität der Standorte sowie der lateralen Kopplung von Stoff-, Energie- und Informationsflüssen)

- eingeschränkte Datenverfügbarkeit

- beschränkte Möglichkeit der Modellüberprüfung (Ein dynamisches Landschaftsmodell ist in seiner prospektiven Vorhersagefähigkeit nur eingeschränkt experimentell überprüfbar Eine wichtige Aufgabe besteht daher auch in der Suche nach geeigneten Verfahren der Modelleinschätzung und des Nachweises der Wirklichkeitsäquivalenz)

3.3. Probleme und Lösungsvorschläge

Von den für ein dynamisches Landschaftsmodell zu lösenden Problemen sind die folgenden fünf, die untereinander nicht entkoppelbar sind, von besonderer Wichtigkeit (Abb. 7)

- **Diskretisierungsproblem**
  Mit Hilfe welcher statischen Landschaftszustandsvariablen soll die Landschaft in für die Modellierung homogene Landschaftsteile untergliedert werden? Welche örtliche und zeitliche Diskretisierung muß für die Beschreibung der raum-zeitlichen Dynamik einzelner Flüsse und Zustände gewählt werden?

- **Datenverfügbarkeits- und Parameteridentifikationsproblem**
  Wie kann eine für die Anwendung von Simulationsmodellen erforderliche raumdeckende Bereitstellung der Modellparameter und Zustandsvariablen (z.B. Niederschlagsdaten) erreicht werden?

- **Repräsentanz- und Indikatorproblem**
  Welche dynamischen Landschaftszustandsvariablen oder "ökologischen Indikatoren" sollen zur Abbildung des Zustandes der Landschaft herangezogen werden?

- **Modellwahlproblem**
  Welche dynamischen Modelle können zur Abbildung der Dynamik in und zwischen Landschaftsteilen benutzt werden?

- **Bewertungsproblem**
  Nach welchen Kriterien sollen die Landschaftszustandsvariablen und das Ergebnis von Szenarionrechnungen bewertet werden?

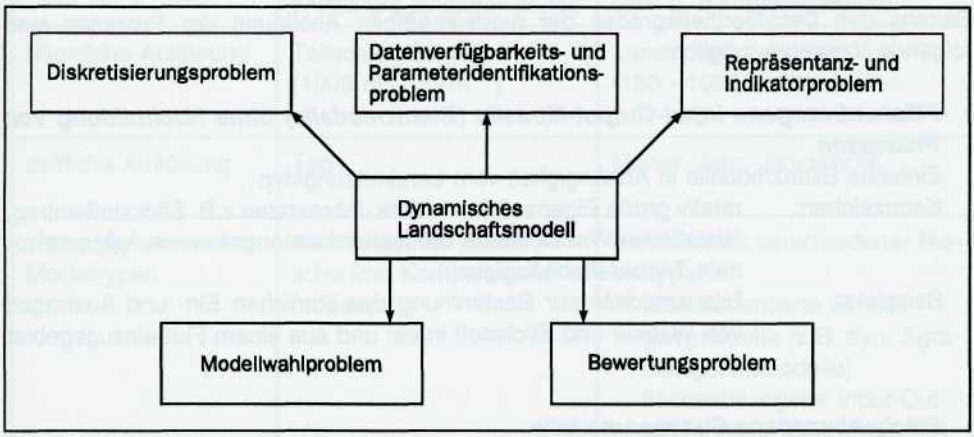

Abb.7· Problemstellungen, die im Rahmen der Landschaftsmodellierung zu lösen sind

Zu einigen ausgewählten Problemen nachfolgend einige weiterführende Gedanken.

Diskretisierungsproblem
Grundlage für die Anwendung von Simulationsmodellen ist die Herstellung eines Flächen- oder Raumbezuges. Es müssen gewissermaßen die homogenen Grundeinheiten für die Modellierung gebildet werden. Nicht ausgeschlossen ist, daß für unterschiedliche Probleme eine unterschiedliche Diskretisierung gewählt werden muß. Das kann dazu führen, daß in mehreren Modellschichten zu arbeiten ist, die anschließend zu überlagern sind.

Repräsentanz- und Indikatorproblem
Dynamische Landschaftsmodellierung bedeutet, den Zustand der Landschaft durch "modellierungsfähige" (formalisierbare) Zustandsvariablen der Landschaft oder durch "ökologische Indikatoren" zu beschreiben Diese Indikatoren müssen mehreren Anforderungen genügen, z.B. einen direkten Bezug zur Bewirtschaftung haben, grenzwertfähig und leicht erhebbar sein (*Pfadenhauer et al.*, 1991).
Die Auswahl dieser Variablen und der Nachweis ihrer Repräsentanz für den Status der Landschaft stellt das eigentlich inhaltliche Problem der Landschaftsmodellierung dar Das trifft weniger auf die Nachbildung und Bilanzierung von Wasser-, Stoff- und Energieflüssen, als vielmehr auf die Abbildung der Auswirkungen der Landnutzung auf die Landschaftselemente und die biotische Umwelt zu.

Modellwahlproblem

Bei der Auswahl bzw Eignungsüberprüfung von dynamischen Modellen sind sowohl Aspekte der Strukturierung der Landschaft in homogene Grundeinheiten der Modellierung, des Detailliertheitsgrades der modellmäßigen Nachbildung als auch der Modelltaktung zu berücksichtigen.

Seitens des Detailliertheitsgrades der modellmäßigen Abbildung der Prozesse sind folgende Varianten möglich:

- ***Flächenbezogene Input-Output-Modelle (Bilanzmodelle) ohne Nachbildung von Prozessen***

  Einfache Bilanzmodelle in Abhängigkeit vom Landnutzungstyp

  Kennzeichen: relativ große Eigenzeit (konstante Jahresraten z.B. Stickstoffeintrag, klimatische Wasserbilanz, Jahresverdunstungssumme, keine saisonale Triebkraftabhängigkeit)

  Beispiele Bilanzmodelle zur Bestimmung des jährlichen Ein- und Austrages von Wasser und Stickstoff in ein und aus einem Flußeinzugsgebiet

- ***Flächenbezogene Summenmodelle***

  Einfache dynamische Simulationsmodelle für ausgewählte Landschaftszustandsvariablen

  Kennzeichen: geringe Eigenzeit aber komplexe Abhängigkeit von Triebkräften (Wetter)

  Beispiele· aus Wachstums- bzw Bodenwassermodellen abgeleitete Wasser- sowie Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik

- ***Flächenbezogene Prozeßmodelle***

  Kausalorientierte Simulationsmodelle für Agroökosysteme oder Landschaftsteile

  Kennzeichen geringe Eigenzeit, nachgebildet werden nicht nur Zustandsvariable, die nach außen wirksam werden, sondern auch spezifische interne Zustandsgrößen

  Beispiele Agroökosystemmodelle zur Beschreibung des dynamischen Verlaufs der Pflanzenentwicklung sowie des Bodenwasser- und Bodenstickstoffgehalts

Es kann davon ausgegangen werden, daß mit zunehmender Strukturierung und Prozeßorientierung die potentielle Genauigkeit eines Landschaftsmodells steigt. Solche Modelle sind dann aber wenn überhaupt nicht mehr in einer vertretbar kurzen Zeit zu erarbeiten, zu parametrisieren und zu überprüfen.

Da ein Landschaftsmodell praxisrelevante Aussagen liefern soll, sind wir auch hier mit einem Hauptproblem der Modellierung konfrontiert:

"Wo kann vereinfacht werden?" (*Joergensen,* 1992)

Die wichtigsten Unterschiede zwischen Agroökosystem- und dynamischen Landschaftsmodellen sind in Abb. 8 zusammenfassend dargestellt.

	Agroökosystemmodelle (vorrangig eindimensional)	**dyn. Landschaftsmodelle** (ein- u mehrdimensional)
räumliche Auflösung	Teilschlag/Schlag ($1000\ m^2$ - $1\ km^2$)	Landschaft (100 - $1000\ km^2$)
zeitliche Auflösung	Tag	Monat, Jahr, Jahrzehnte
vorrangig verwendete Modelltypen	deterministisch-numerische und Kompartimentmodelle	Kombination verschiedener Modelltypen - kausalorientierte Simulationsmodelle (z.B. dyn. Agroökosystemmodelle) - flächenbezogene Input-Output-Modelle (Bilanzmodelle) - flächenbezogene Summenmodelle (vereinfachte dynamische Simulationsmodelle)

Abb.8: Hauptunterschiede zwischen Agroökosystem- und Landschaftsmodellen

Kerner, Spandau & Köppel (1991) schätzen im Abschlußbericht zum MAB-Projekt 6 "Ökosystemforschung Berchtesgaden" den Wert eines dynamischen Landschaftsmodells wie folgt ein

Ein derartig hochentwickeltes methodisches Instrument wäre ein hervorragendes "Spielzeug" in der Hand des Wissenschaftlers ebenso wie für Planer, Betroffene und Entscheidungsträger Mit ihm könnten raum-zeitliche Entwicklungen, Szenarien, Alternativen und "Planspiele" *interaktiv,* beliebig schnell oder im Zeitlupentempo, im gesamtregionalen System oder in Testgebieten - nachvollzogen, dargestellt, gelenkt und im wiederholten Versuch (und Irrtum) *optimiert werden.*

4. Literatur

Haber, W., 1984
Über die menschliche Nutzung von Ökosystemen - unter besonderer Berücksichtigung von Agrarökosystemen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie (Stuttgart-Hohenheim 1984), Bd. XIV, Göttingen 1986, S. 13-24

Joergensen, S.E., 1992
Models as Instruments for Combining Ecological Theory and Environmental Practice. Paper at the "8th International Conference on the State-of-the-Art in Ecological Modelling, Kiel (im Druck)

Kerner, H.F., Spandau, L., Köppel, J.G., 1991
Methoden zur angewandten Ökosystemforschung. Abschlußbericht zum MAB-Projekt 6 "Ökosystemforschung Berchtesgaden", MAB-Mitteilungen 35.2, Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie, Bonn

Kersebaum, K.-Ch., McVoy, Chr., Filius, A., Streck, Th., Richter, J., 1992
Stoffdynamik stillgelegter landwirtschaftlicher Flächen Risikoabschätzung im Vergleich zur intensiven Nutzung Unveröffentlicher Abschlußbericht zum F/E-Vorhaben 10702004/03 des UBA Berlin, Institut für Geographie und Geoökologie der Universität Braunschweig

Lutze, G., Schultz, A., Wenkel, K.-O., 1993
Vom Populationsmodell zum Landschaftsmodell - neue Herausforderungen und Wege zur Nutzung von Modellen in der Agrarlandschaftsforschung Zeitschrift für Agrarinformatik, 1(1993)1, S. 19-25

Müller, F., Windhorst, W., 1991
Die Modellbildungsstrategie des F/E-Vorhabens "Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette" Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B 22, S. 75-93

Pfadenhauer, J., Gauzert, Ch., Anderlik-Wesiger, G., Müller, E., Dein, A., 1991
Indikatoren für Umweltverträglichkeit und landschaftspflegerische Leistungen der Landwirtschaft einzelbetrieblicher Ansatz. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 20, S. 393-401