

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
(Hrsg.)

HGF-Projekt:
„Untersuchung zu einem integrativen Konzept nachhaltiger Entwicklung: Bestandsaufnahme, Problemanalyse, Weiterentwicklung“

Abschlußbericht

Band 6

„Bestandsaufnahme zu Potentialen und Grenzen vorhandener Modelle“

A. Sydow, W. Rufeger, H. Rosé, T. Aßelmeyer

GMD Forschungszentrum Informationstechnik GmbH
Institut FIRST / SAS

*Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
FKZ 07OWI 12/8*



FZK, DLR, FZJ, GMD, UFZ

Dezember 1999

Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Nachhaltige Entwicklung.....	3
2.1 Ausgangslage.....	3
2.2 Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung.....	4
2.3 Grundsätze der Nachhaltigkeit.....	5
3. Simulationsmodelle unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit.....	6
3.1 Modellbegriff.....	6
3.2 Warum und wo werden Modelle hinsichtlich des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung eingesetzt?.....	6
3.3 Zielsetzung von Modellen.....	7
3.4 Arten von Modellen.....	7
3.5 Ablauf der Modellbildung und Simulation.....	8
3.6 Kopplung von verschiedenen Simulationsmodellen.....	9
3.7 Historischer Überblick der Entwicklung von Umweltmodellen.....	10
4. Forstmodelle.....	13
4.1 Situation.....	13
4.2 Klassifikation.....	13
4.3 Teilmodelle der Forstmodelle.....	14
4.4 Übersicht über einige Forstmodelle und Forschungsprojekte.....	17
4.5 Beispiele.....	19
4.6 Schlußfolgerungen.....	23
5. Landwirtschaftliche Modelle.....	24
5.1 Landwirtschaftliche Modelltypen.....	24
5.2 Ausgewählte landwirtschaftliche Modelle.....	26
5.3 Modelle zur ökologischen Landwirtschaft.....	29
6. Wasserwirtschaftliche Modelle.....	38
6.1 Grundlagen.....	38
6.2 Die Situation in Deutschland.....	39
6.3 Anforderungen an das Modell.....	42
6.4 Modelle des Wasserhaushalts.....	42
7. Luftbelastungsmodelle.....	46
7.1 Situation.....	46
7.2 Modell RAINS.....	46
7.3 Modell DYAMOS.....	51
8. Integrated Assessment Modelle.....	53
8.1 Einleitung.....	53
8.2 Das Modell IMAGE2.0.....	54
9. Zusammenfassung.....	58
10. Literatur.....	58

1. Einleitung

Gerade in diesem Jahrhundert sind durch die zunehmende Industrialisierung immer mehr Umweltprobleme (z.B. Anstieg der globalen Lufttemperatur, Anwachsen der Wüstenflächen) aufgetreten. Wir mußten daher erkennen, daß die Nutzungsmöglichkeiten der Natur beschränkt sind. Um auch zukünftigen Generationen die gleichen Entwicklungsmöglichkeiten zu ermöglichen, kann eine Ausbeutung der natürlichen Ressourcen nur im Rahmen der Regenerationsfähigkeit der Natur erfolgen. Doch wie kann diese Grenze gefunden werden? Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung, wie es aus den Untersuchungen des Club of Rome 1972 hervorgegangen ist, versucht genau diese Frage zu beantworten. Eine weitere Verfeinerung des Begriffs wurde durch die Brundtland-Kommission vorgenommen. Eine erste Umsetzung des Konzeptes erfolgte auf der Konferenz der UNCED in Rio 1992, auf der 178 Staaten über eine neue Form der Umwelt- und Entwicklungspolitik berieten. Doch was heißt nachhaltig? Nachhaltig im engeren Sinne ist eine Entwicklung dann, wenn sie ökologische, soziale und ökonomische Rahmenbedingungen berücksichtigt und auf einen längeren Zeithorizont, d.h. mittelfristig bis langfristig, angelegt ist.

Systemtheoretisch gesehen, umfassen die ökologischen und sozio-ökonomischen Themengebiete, die in der Nachhaltigkeitsproblematik angesprochen werden, höchst komplexe dynamische Systeme mit vielfältigen Wechselwirkungen auf unterschiedlichen hierarchischen Ebenen. Die bereits gewonnenen naturwissenschaftlichen Erkenntnisse bilden keine ausreichende Grundlage für eine detaillierte Analyse dieser Systeme, wenn man bedenkt, daß schon einfache dynamische Systeme höchst nichtlineare Verhaltensreaktionen zeigen können, die kaum als geschlossene analytische Lösungen darstellbar sind. Da sich viele komplexe Zusammenhänge wenigstens angenähert oder hierarchisiert darstellen lassen und damit die Aufstellung von Simulationsmodellen erlauben, muß der Systementwickler mit den Vorteilen und Einschränkungen von Simulationsmodellen vertraut sein.

Modelle komplexer dynamischer Systeme (wie z.B. von Ökosystemen) können das Verständnis und den Umgang mit diesen Systemen erheblich verbessern, sofern sie mit Umsicht angewendet werden, und stellen ein wichtiges Ordnungsschema für komplexe Systeme dar. Die Entwicklung z.B. eines Systemmodells für ein reales, komplexes System kann zu einem sehr viel besseren Systemverständnis führen, zwingt sie doch den Entwickler dazu, die wichtigsten Aktivitäten des Systems zu benennen und quantifizieren, vorhandene Wechselwirkungen und Rückkopplungen zu erkennen und zu beschreiben, alle Aktivitäten in konsistente Teilgebiete zu unterteilen und umgekehrt Ergebnisse aus verschiedenen Teilgebieten zusammenzuführen.

Zu den weiteren Vorteilen der Verwendung von hierarchisch gegliederten Modellen gehört die Möglichkeit der unabhängigen Bearbeitung verschiedener Teilgebiete, ohne dabei das Gesamtprojekt in nebeneinanderstehende Einzelprojekte zerfallen zu lassen. Dabei können Modelle aber nur ihre Funktion erfüllen, wenn sie während des Arbeitsprozesses in allen Teilprojekten in Anspruch genommen werden bzw. wenn festgelegte Abstimmungsprozeduren eingehalten werden. Hierfür müssen entsprechende organisatorische Bedingungen geschaffen werden.

Ein ganz wesentlicher Vorteil von Modellen ist die Durchführung von Szenarien, die in der Wirklichkeit entweder unmöglich, zu teuer oder zu langwierig wären. Wie will man z.B. den Einfluß einer erhöhten CO₂- Belastung auf das Weltklima untersuchen? Ein reales Experiment ist hier undurchführbar.

Trotzdem muß beachtet werden, daß ein Modell immer nur innerhalb der Reichweite seiner Gültigkeit verwendet werden kann. Daher muß sein Anwendungsbereich klar definiert sein. Diese Forderung läßt sich z.T. sehr schwierig verwirklichen, da bei vielen Modelle das Zusammenwirken aller Größen noch nicht völlig erforscht ist. Vor allem liegen viele Eingangsdaten mit einer gewissen Unschärfe vor, die prinzipiell nicht verändert werden kann.

Aufgrund vielfältiger Unsicherheiten in den zugrundeliegenden Modellansätzen, Parametrisierungen sowie in der Datenbeschaffung dürfen Modellergebnisse nicht unkritisch übernommen werden. Nach der Implementierung eines Modells muß immer eine Phase der sorgfältigen Prüfung durchlaufen werden, in der Strukturgültigkeit, Verhaltensgültigkeit und die Anwendungsgültigkeit des Modells überprüft werden. Modellergebnisse können keine Handlungsstrategien direkt liefern, aber ein wirkungsvolles Instrument für die Entwicklung von Handlungsstrategien bereitstellen.

Entsprechend der Projektbeschreibung sollte in Arbeitspaket 6 untersucht werden, für welche Problemfelder der nachhaltigen Entwicklung Modellierungen sinnvoll sind, welche Modelle sich dafür eignen und welche (Weiter)Entwicklungen angemessen und durchführbar erscheinen. Fragen der Modellprämissen, der Datenproblematik und der Validität der Modellergebnisse verdienen dabei besondere Aufmerksamkeit, ferner sollte die Kompatibilität der Modelle mit der Struktur des in dem Projekt erarbeiteten Gliederungsschemas gewährleistet sein. Da für den sozialen Sektor Modellierungen z. Z. eher als problematisch angesehen werden, wird sich dabei auf den ökologischen und ökonomischen Bereich beschränkt. Hier sind vor allem Modelle von Bedeutung, die es ermöglichen, ökologische und ökonomische Entwicklungen zu analysieren und Szenarien zu unterschiedlichen Nachhaltigkeitsstrategien umzusetzen. Dabei sollte besonders das Problem untersucht werden, wieweit es sinnvoll und möglich ist, Einzelmodelle aus unterschiedlichen Bereichen zu einem Gesamtmodellsystem zu verknüpfen. Im folgenden werden die Ergebnisse dargelegt und zusammengefaßt.

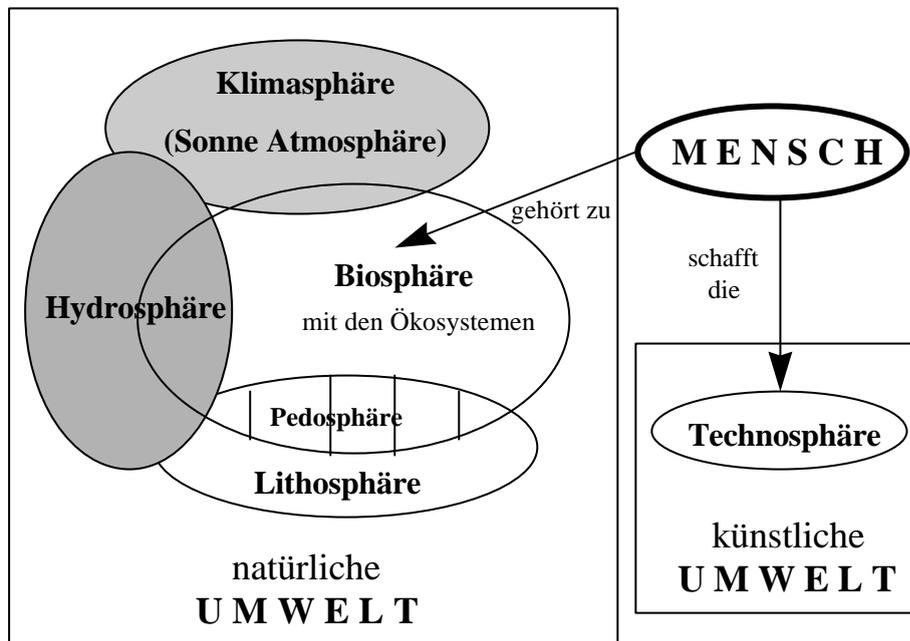
Das Kapitel 2. klärt einerseits einige Begriffe und legt andererseits die Konzepte, Aufgaben und Ziele der nachhaltigen Entwicklung in Verbindung mit mathematischen Modellen dar. Im Kapitel 3. steht eine Übersicht über die Arten, Ziele und Bildung von Modellen im Vordergrund. Ab dem nächsten Kapitel werden dann die einzelnen Gebiete Forst, Landwirtschaft, Wasser und Luft anhand der vorhandenen Modelle zu deren Simulation behandelt. Dabei ist der Übersichtscharakter am wesentlichsten. Den Abschluß bilden die Integrierten Modelle in Kapitel 8., welche das Gesamtsystem eingeteilt in bestimmte Weltregionen beschreiben. Ökonomische Modelle werden in einem anderen Teil des Gesamtberichts behandelt.

2. Nachhaltige Entwicklung

2.1 Ausgangslage

Mit der zunehmenden Industrialisierung der letzten Jahrzehnte sind immer mehr Umweltprobleme entstanden, die sich zukünftig noch verschärfen werden.

- die Erhöhung der mittleren Globalen Lufttemperatur um 0,3 bis 0,6 Grad Celsius
- das Schmelzen der Eisflächen
- der Anstieg des Meeresspiegels um 10 bis 25 Zentimeter in den letzten 100 Jahren
- die zunehmende Wasserknappheit
- das Anwachsen der Wüstenfläche
- die Versauerung der Böden
- die Schädigung der stratosphärischen Ozonschicht
- die Verschmutzung der Luft
- der starke Artenschwund
- die Erosion landwirtschaftlicher Nutzflächen
- der Verbrauch der natürlichen Ressourcen
- die Verschmutzung und Überfischung der Weltmeere

Abbildung 1: Umwelt als Umgebung des Menschen

Quelle: Grützner, R. 1997, S. 2.

Die Umwelt unterteilt sich in einen natürlichen und einen künstlichen Bereich. Der natürliche Bereich besteht aus der Klimasphäre, der Hydrosphäre, der Pedosphäre und der Biosphäre. Der Mensch, der selbst ein Bestandteil der Biosphäre ist, erschafft den künstlichen Bereich, die sogenannte Technosphäre. Die Technosphäre umfaßt alle vom Menschen erschaffenen Produkte, Systeme und Prozesse. Die verschiedenen Unterbereiche des natürlichen und künstlichen Bereichs beeinflussen sich gegenseitig. Umweltprobleme entstehen vor allem durch die vom Menschen geprägte Technosphäre. Abbildung 1 zeigt die Umwelt als Umgebung des Menschen

2.2 Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung

Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung beruht auf Untersuchungen des Club of Rome von 1972 und der danach anhaltenden Diskussion über die Entwicklungspolitik. In der heutigen Zeit nimmt dieses Konzept eine bedeutende Stellung in der Entwicklungs- und Umweltpolitik ein (Kopfmüller 1991, S. 30).

Der Begriff an sich wurde ursprünglich in der Forstwirtschaft für die langfristige Sicherung der Substanz des Waldes verwendet. Demnach sollen nicht mehr Bäume in einem Zeitraum gefällt werden als in diesem nachwachsen können. Für den Begriff Sustainable Development finden sich im deutschen Sprachgebrauch verschiedene Formulierungen. Neben Varianten, wie z.B. tragfähig, dauerhaft, zukunftsfähig, umweltverträglich ist nachhaltige Entwicklung der am weitesten verbreitete Begriff.

Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Kommission) hat den Begriff durch ihren Bericht von 1987 „Our common future“ entscheidend geprägt und eine anerkannte Definition des Begriffes ausformuliert:

„Unter nachhaltiger Entwicklung verstehen wir eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten der künftigen Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen. Die Forderung, die Entwicklung dauerhaft zu gestalten, gilt für alle Länder und alle Menschen“ (Brundtland-Kommission 1987, S. 15)

Hauptziel ist hierbei die dauerhafte Befriedigung der menschlichen Bedürfnisse, die sowohl durch die Übernahme von Verantwortung der heutigen Generation für zukünftige Generationen (vgl. Quennet-Thielen 1996, S. 9) als auch durch international verantwortliches Handeln erreicht wird.

Die zukünftigen Generationen sollen die gleichen Entwicklungsmöglichkeiten, das gleiche Potential für Wohlfahrt und die gleiche Lebensqualität wie die jetzige Generation vorfinden. Unter internationale Verantwortung fällt ebenso die Verpflichtung der wohlhabenden Länder gegenüber den armen Ländern, insbesondere die Verpflichtung der Industrieländer gegenüber den Entwicklungsländern, diesen die Gleichheit der Lebens- und Entwicklungschancen zu gewähren (vgl. Quennet-Thielen 1996, S. 9)

Die Konferenz von Rio der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) im Juni 1992 war ein wichtiger Schritt für das Konzept der nachhaltigen Entwicklung. 178 Staaten haben über die eine neue Form der Umwelt- und Entwicklungspolitik beraten und Grundlagen, deren übergeordnetes Leitbild das Konzept der nachhaltigen Entwicklung ist, für eine neue zukunftsweisende Politik beschlossen. Unter anderem wurde die VN-Kommission für Nachhaltige Entwicklung (Commission on Sustainable Development-CSD) gegründet, die die gemeinsame Umsetzung der Beschlüsse von Rio leiten und unterstützen soll.

Ein weiterer wichtiger Schritt für das zukünftige Handeln, ist das Aktionsprogramm Agenda 21 für den Übergang ins 21. Jahrhundert. Es fordert alle Staaten auf, die Handlungsfelder und Programme zu unterstützen und umzusetzen.

2.3 Grundsätze der Nachhaltigkeit

Die Nutzungsmöglichkeiten der Natur sind aufgrund des Bevölkerungswachstums, der Rohstoffvorkommen, der Tragkapazität von Ökosystemen, der Verschmutzung der Natur und ihrer Regenerationsfähigkeit beschränkt. Pearce und Tuner haben in diesem Zusammenhang Leitlinien veröffentlicht, die zu einem bewußteren Umgang mit der Natur führen sollen.

„Principles of Sustainable Development“ nach Paerce und Tuner (1990):

- • For renewable resources harvesting rates should not exceed regeneration rates (sustained yield).

- • Non-renewable resources should be exploited no faster than the rate of creation of renewable substitutes.
- • Waste emissions should not exceed the assimilative capacities of the receiving environment.

Im Deutschen wurden diese Leitlinien als „Managementregeln“ (Umwelt 4/1997, S.137) übernommen:

- • Die Menge an verbrauchten erneuerbaren Naturgütern (z.B. Tierbestände, Wälder) darf auf Dauer nicht größer sein als diejenige, die sich wieder erneuern kann. Kann das Verbrauchte nicht auf Dauer erneuert werden, so stände das entsprechende Naturgut in der Zukunft nicht mehr zur Verfügung.
- • Die Menge an verbrauchten nicht-erneubaren Naturgütern (z.B. fossile Energieträger) darf auf Dauer nicht größer sein als diejenige, die durch Substitution ihrer Funktion erzeugt werden kann (z.B. Ersatz von fossilen Energieträgern durch Sonnenenergie oder durch erneuerbare Energierohstoffe).
- • Die Menge von freigesetzten Stoffen oder der Energieverbrauch dürfen auf Dauer nicht größer sein als die Fähigkeit der Natur, diese aufzunehmen und zu verkraften (Säure im Boden oder Treibhausgase in der Atmosphäre).

3. Simulationsmodelle unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit

3.1 Modellbegriff

Ein Modell beinhaltet eine Reihe von verschiedenen Annahmen, die die Realität widerspiegeln und ein wirkendes System möglichst genau beschreiben. Durch diese Beschreibung mit Hilfe vorhandener Erfahrungen können aus den verschiedenen Beobachtungen diejenigen ausgewählt werden, welche die komplexe Realität auf einfache Weise darstellen und verständlich machen (vgl. Meadows, 1972, S. 14)

3.2 Warum und wo werden Modelle hinsichtlich des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung eingesetzt?

Modelle sind moderne Simulations- und Informationssysteme, mit denen Abläufe simuliert und verschiedenartigste Informationen verarbeiten werden können. Sie eignen sich deshalb für quantitative und qualitative Analysen und Bewertungen von Nachhaltigkeitsproblemen und -strategien. Die Komplexität und die Vielzahl von Parametern werden auf eine transparente Weise dargestellt, so daß Auswirkungen, die das menschliche Handeln auf die Umwelt und auf die Wirtschaft hat, abgeschätzt und bewertet werden können. Mit Hilfe von Simulationsmodellen kann man Szenarien der natürlichen Umwelt und Wirtschaft entwerfen und so Methoden und Maßnahmen für das zukünftige Handeln entwickeln. Sie erleichtern und unterstützen das Res-

sourcesmanagement und dienen zur Überprüfung, ob und wie die Ziele der Umweltpolitik hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung erreicht werden können.

Gründe für die Verwendung von Computersimulationsmodellen nach Bossel (1992, S.13):

- • Bei Modellen kann auf eine einheitliche Methodologie und auf vielseitig verwendbare Software-Programme zurückgegriffen werden, welche unabhängig von der Art des betrachteten Systems anwendbar sind.
- • Die Kosten für die Erstellung von Modellen und für die Simulation sind weitaus niedriger als bei Untersuchungen mit realen oder analogen physikalischen Modellen.
- • Der zeitliche Ablauf des dynamischen Verhaltens kann nach Belieben gerafft, verkürzt oder gedehnt werden.
- • Ausführliche Untersuchungen gefährlicher Systementwicklungen werden möglich.
- Das reale System wird keinem Risiko ausgesetzt.
- • Eingriffe in das reale System und Messungen sind nicht erforderlich.
- • Erfassung von Stoff- und Energieströmen (Stoffstromanalyse)
- • Abschätzung und Bewertung von Wirkungen (Öko- Diskurs)
- • ökologische Gestaltung von Produktions-, Dienstleistungs- und Konsumprozessen

3.3 Zielsetzung von Modellen

Bei Anwendungen von Modellen werden bestimmte Ziele verfolgt:

1. Vorhersagen über die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung (z.B. Arbeitslosenzahl, Brutto-sozialprodukt, Umweltbelastungen und -schäden, Wirkung von Gesetzen, Beschlüssen und anderen politischen Maßnahmen, Bevölkerungsentwicklung)
2. Analyse, Bewertung und Planung nachhaltiger Handlungsweisen
3. Erkenntnisgewinnung in der Wissenschaft, Forschung und Entwicklung
4. Planung, Analyse und Entscheidungshilfe für politische Entscheidungen hinsichtlich der Umwelt- und Wirtschaftspolitik
5. Überprüfung der Vorgehensweise zur Reduzierung von Emissionen und zur Energieeinsparung.
6. Planung, Bewertung, Überwachung und Steuerung technischer Anlagen
7. Ökonomische und ökologische Gestaltungshilfen von Prozessen

3.4 Arten von Modellen

Modelle lassen sich unter dem Gesichtspunkt der Unterscheidung zwischen natürlicher und künstlicher Umwelt (siehe Abbildung 1) in Gruppen einordnen (siehe Tabelle 1). Durch eine en-

ge Kopplung des natürlichen und künstlichen Bereichs der Umwelt entsteht eine dritte Gruppe von Modellen mit der Bezeichnung: integrierte Modelle.

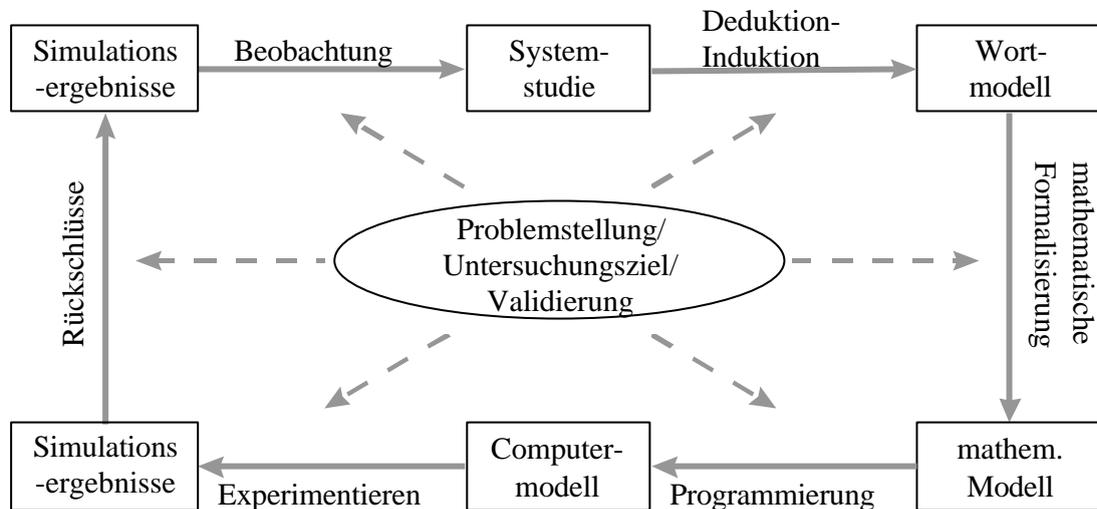
Tabelle 1: Arten von Modellen der verschiedenen Bereiche

Natürliche Umwelt	enge Kopplung natürliche - künstliche Umwelt	künstliche Umwelt
Stoff- und Energiekreislaufmodelle Ökologische Modelle, Populationsentwicklungen, Wachstumsmodelle, Wirkungsketten-Modelle von Regulationsprozessen Wassermodelle (Grund- und Oberflächenwasser) Bodenmodelle Klimamodelle Meteorologische Modelle Ozonmodelle Landschaftsmodelle	integrierte Modelle beider Umweltbereiche ökologisch - ökonomische Modelle ökologische - sozioökonomische Modelle Schadwirkungsmodelle, ökotoxikologische Modelle, biologisch/medizinische Modelle, physiologische Modelle Ressourcenbilanz- und -entwicklungsmodelle Technikfolgenabschätzung	ökonomische Finanzmodelle, Ökobilanzierung Modelle zur Steuerung technischer Prozesse Verkehrs-, Logistikmodelle, Schadstoffausbreitungsmodelle Ressourcenverbrauchs- und bedarfsmodelle, erneuerbare Energien, nachwachsende Rohstoffe Product-Life-Time-Analyse sozio-ökonomische Modelle, soziologische Modelle Raum-, Landschafts-, Planungs- und -Entwicklungsmodelle

Quelle: Grützner, R. 1997, S. 8.

3.5 Ablauf der Modellbildung und Simulation

Im Mittelpunkt der Modellbildung und Simulation stehen die Problemstellung und das davon abhängige Untersuchungsziel. Alle Phasen der Modellbildung und Simulation, angefangen von der Problemstellung und der Auswahl eines Realsystems bis hin zu Rückschlüssen auf das Realmodell durch die Simulationsergebnisse, werden entschieden durch das Untersuchungsziel geprägt. Das Realsystem wird zunächst beobachtet und eine Systemstudie durchgeführt. Die daraus erhaltenen Informationen gehen in die erste Form eines Modells, in ein sogenanntes Wortmodell ein.

Abbildung 2: Prinzipieller Ablauf der Modellbildung und Simulation

Quelle: Grützner, R., Häuslein, A., Page, B. 1994, S 158.

Durch eine mathematische Formalisierung des Wortmodells erhält man ein mathematisches Modell. Dieses mathematische Modell wird mittels geeigneter Programmiersprachen, Software und Hardware in einem Computermodell umgesetzt. Mit dem Computermodell werden Experimente durchgeführt und letztendlich erhält man Simulationsergebnisse. Während des gesamten Kreislaufes sollte das Modell validiert werden. Sollten Mängel in einer der verschiedenen Phasen festgestellt werden, so muß zu einer früheren Phase des Modellzyklusses zurückgekehrt werden und erneut getestet werden. Liefert das Modell zufriedenstellende Simulationsergebnisse, so können Rückschlüsse auf das Realsystem getroffen werden. Abbildung 2 stellt den prinzipiellen Ablauf der Modellbildung und Simulation dar.

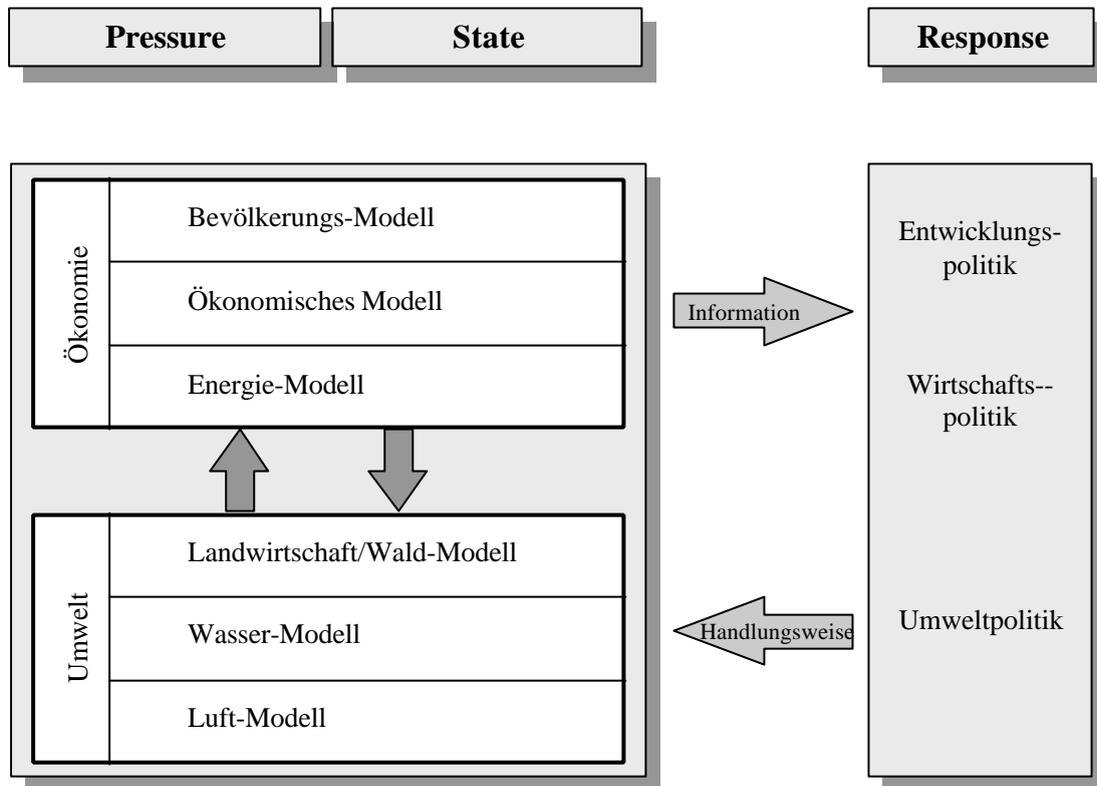
3.6 Kopplung von verschiedenen Simulationsmodellen

Um dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung gerecht zu werden, muß ein Gesamtmodellsystem erstellt werden, das die ökologische und ökonomische Dimension und deren Wechselwirkungen untereinander einbezieht und modellieren kann. Die soziale Dimension der Nachhaltigkeit kann allerdings auch durch ein Gesamtmodellsystem nur schwer modelliert werden. Ein Gesamtmodellsystem (siehe Abbildung 3) kann in Anlehnung an das PSR-Modell der OCED aufgebaut werden.

Es werden die drei Zustände Pressure, State und Response hinsichtlich einer Gruppe von Modellen, die sich durch ihren direkten Bezug zur Ökonomie auszeichnen, und einer zweiten Gruppe, die durch Umweltmodelle geprägt ist, untersucht. Die erste Gruppe umfaßt ein Bevölke-

rungsmodell, ein ökonomisches und ein Energiemodell. Die Gruppe der Umweltmodelle setzt sich zusammen aus einem Boden/Wald-, einem Wasser- und einem Luftmodell.

Abbildung 3: Gesamtmodellsystem



Quelle: Eigene Darstellung

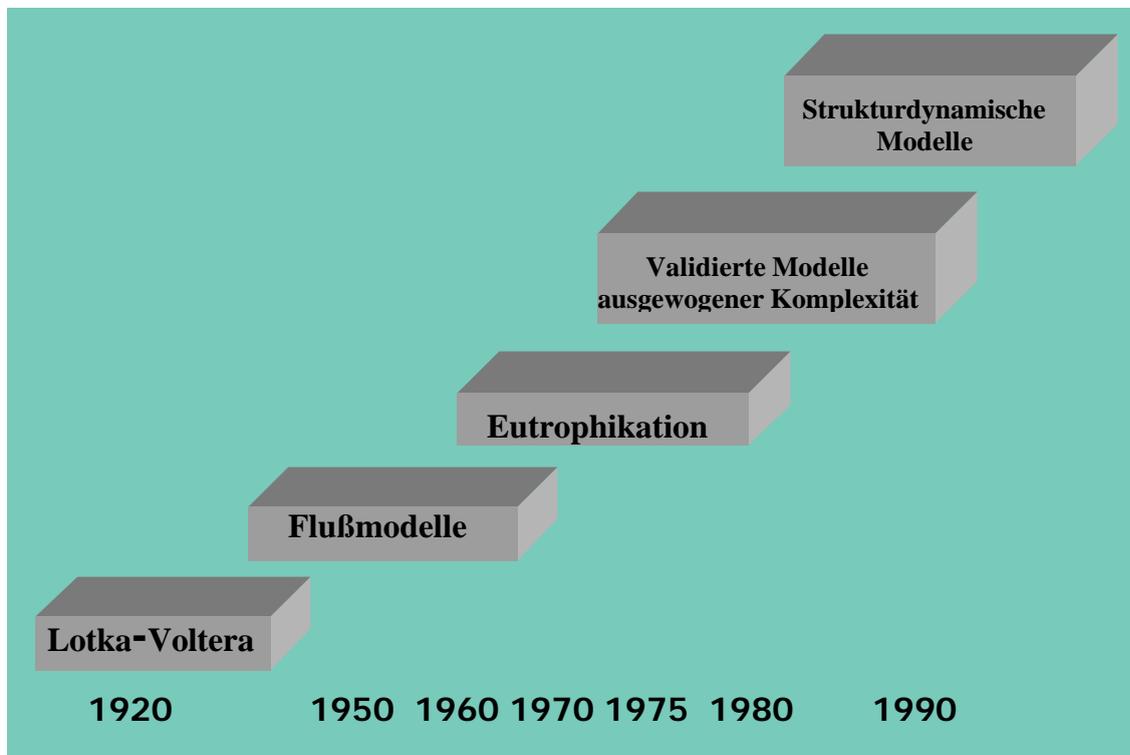
Die Gruppe der ökonomisch und die der ökologisch geprägten Modelle beeinflussen sich gegenseitig. Mit ihrer Hilfe werden ihre Belastungsindikatoren und die hierdurch beeinflussten Zustände von Bevölkerung, Ökonomie, Energie, Boden/Wald, Wasser und Luft beschrieben. Aufgrund der so gewonnenen Informationen setzt der Mensch eine bestimmte Entwicklungs-, Wirtschafts- und Umweltpolitik fest, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Die dem entsprechende Handlungsweise (z.B. Instrumente der Umweltpolitik) wirkt sich direkt auf das Einzelmodelle aus. Es ergibt sich also ein geschlossener Kreislauf. Konkrete Abläufe und Szenarien können mittels der genannten Modelle simuliert werden.

3.7 Historischer Überblick der Entwicklung von Umweltmodellen

Die Geschichte der Entwicklung von Umweltmodellen reicht zurück bis in die frühen zwanziger Jahre. JORGENSEN teilt die seitdem entstandenen Modelle in fünf Generationen (Jorgensen 1994, Jorgensen et.al. 1994). Die erste Generation bilden Räuber-Beute- Modelle vom Lotka-Volterra-Typ. Diese wurden in den fünfziger Jahren als allgemeine Populationsmodelle weiter-

entwickelt. Zusammen mit den in den sechziger Jahren entstandenen komplexen Modellen von Flußläufen charakterisieren sie den Entwicklungsstand der zweiten Generation.

Abbildung 4: Entwicklung von Umweltmodellen



Die dritte Generation von ökologischen Modellen begann um 1970 mit der breiten Anwendung von ersten Eutrophikations- und sehr komplexen Flußmodellen auf dem Gebiet des Umweltmanagements. Die zu dieser Zeit spürbar werdende Leistungssteigerung in der Computertechnologie führte dazu, daß die Modelle dieser Generation eine meist zu komplexe Struktur besaßen und kaum einer kritischen Analyse unterzogen wurden.

Mitte der siebziger Jahre wurde dieses Defizit zusammen mit der Tatsache erkannt, daß die Grenzen der Modellierung in erster Linie nicht durch eine beschränkte Rechenkapazität, sondern vor allem durch fehlende Meßdaten und ein nur unzureichend vorhandenes Verständnis der Dynamik ökologischer Prozesse und Systeme bestimmt werden. Diese richtungsweisende Erkenntnis führte in der Folgezeit zu einer Schärfung des Kritikbewußtseins hinsichtlich der Akzeptanz von ökologischen Modellen. Gefordert wurde nicht mehr nur eine bloße Abbildung der komplexen Umweltsysteme in ebenso komplizierte Simulationsprogramme, sondern nun rückte die eingehende Analyse der ökologischen Systeme selbst in den Mittelpunkt der Betrachtung. Das profunde Wissen über die Zusammenhänge, Komponenten und Reaktionen innerhalb eines ökologischen Systems wurde zur notwendigen Basis in der Entwicklung von Simulationsmodellen.

In dieser Periode etablierten sich zwei grundlegende Prinzipien der Modellierung: Die strikte Einhaltung der Entwicklungsfolge von Modellkonzeption, Parameteridentifikation, Modellverifi-

kation, Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und schließlich der Modellvalidierung als erstes Prinzip, und die Festlegung der Modellkomplexität als Balance zwischen den zur Verfügung stehenden Meßdaten, dem Modellierungsproblem, dem zu modellierenden System und dem darüber vorhandenen Wissen als zweites Prinzip.

Ein weiteres Merkmal dieser Entwicklungsphase war die verstärkte Konzentration auf quantitative Aspekte in der Modellierung und die damit verbundene Steigerung der Qualität der Modelle. In dieser wichtigen Periode von Mitte der siebziger bis Ende der achtziger Jahre entstanden die Modelle der vierten Generation, die sich durch ausgewogene Komplexität und hinreichende Validität von ihren Vorgängern abhoben. Die in dieser Zeit gesammelten Erfahrungen kann man in drei Punkten zusammenfassen:

- Unter Einhaltung der grundlegenden Prinzipien der Modellierung und bei ausreichender Datenbasis ist es möglich, Modelle zu entwickeln, die zur Aufstellung von Prognosen verwendet werden können.
- Modelle mit nur unzureichender Datenbasis sollten nicht zur Prognose verwendet werden. Sie können jedoch einen wertvollen Beitrag zur systematischen Untersuchung der inneren Zusammenhänge des simulierten Systems liefern. Unter diesem Gesichtspunkt sollten sie eine möglichst einfache Struktur besitzen.
- Modelle, die das bestehende ökologische Wissen möglichst weitgehend formalisieren, stellen wichtige Hilfsmittel im weiteren Verständnis des Verhaltens des betrachteten Systems dar und tragen damit zur gezielten Festlegung von Untersuchungsprioritäten bei.

Seit Mitte der achtziger Jahre etabliert sich die fünfte Generation von Modellen, die durch eine dynamische Änderung und Adaptation der Modellstruktur charakterisiert sind. Anlaß zur Entwicklung solcher Modelle war die Erkenntnis, daß eine fest vorgegebene Modellstruktur in keiner Weise der enormen Flexibilität von Umweltsystemen Rechnung tragen kann. Die fünfte Generation von Modellen befaßt sich daher mit der entscheidenden Aufgabe, die Hierarchie der Rückkopplungsmechanismen von Ökosystemen und ihre Fähigkeit der Adaptation und Strukturänderung durch neue Ansätze zu erfassen. Beispiele dafür sind die Anwendung des individuellen Modellierens, die Analyse des chaotischen Verhaltens der Modelle und die Beschreibung von Strukturänderungen als Optimierungsprozesse.

4. Forstmodelle

4.1 Situation

In den 80iger Jahren stand der Wald infolge der Diskussion um den Sauren Regen und das Waldsterben vermehrt im öffentlichem Interesse. Glücklicherweise haben sich die damals veröffentlichten, pessimistischen Prognosen nicht bewahrheitet, trotzdem dauern die Schäden an, und stellen eine Bedrohung des Baumbestandes dar (Bundesministerium für Landwirtschaft).

Die Waldfläche beträgt in Deutschland etwa 30% der Landesfläche. Obwohl der Wald als Wirtschaftsfaktor nur etwa 0,2% des BSP beträgt, kommt ihm doch eine große Bedeutung zu. Der Wald hat viele Funktionen, auf die wir auch in Zukunft nicht verzichten können. Er liefert den kohlendioxidneutralen Rohstoff Holz, reguliert den Wasserhaushalt, liefert das lebenswichtige Trinkwasser, schützt vor Bodenerosion, bietet Lebensraum für Tiere und Pflanzen und Erholungsraum für den Menschen. Und damit sind nicht einmal alle Funktionen aufgezählt.

Der Wald als System wird naturgemäß den terrestrischen Systemen zugeordnet. Die terrestrischen Ökosysteme sind nicht im selben Umfang wie etwa die aquatischen Systeme modelliert. Dies liegt möglicherweise an der Komplexität der Bodenzusammensetzung. (Jorgenson 1994, S.251.). Die Bodenzusammensetzung ist eine zentrale Komponente der terrestrischen Ökosysteme, da alle relevanten Prozesse über das Medium Boden ablaufen, wie z.B. der Nährstoffkreislauf, die Mineralisierung und der Wasserkreislauf der Pflanzen. Die Bodencharakteristik kann sich schon innerhalb weniger Kilometer ändern, oder eine kleine Fläche mit untypischem Boden in dem betrachteten Raumgebiet kann Einfluß in den Wassertransport und damit auf den Nährstofftransport nehmen. Durchschnittswerte müssen hier genügen.

Im Falle der Waldökosysteme kann die Computersimulation die experimentelle Forschung und Messung vor Ort nicht ersetzen, aber ergänzen. Da sich ein Wald vor allem durch seine Langlebigkeit auszeichnet, können kurzfristige Experimente nur bedingt Ergebnisse liefern. Hier können prozeßorientierte Modelle helfen, Wissenslücken zu schließen.

Es gibt eine große Vielfalt von Forstmodellen. Um einen Überblick zu bekommen, muß eine Einteilung nach bestimmten Kriterien erfolgen.

4.2 Klassifikation

4.2.1. Verwendung

Forstmodelle können bezüglich ihrer Verwendung unterschieden werden: Modelle für das Forstmanagement, Untermodelle für ökologische Modelle, die die Forschung in der Vegetationsökologie unterstützen sollen, Modelle für die Pflanzenpopulationsforschung, Sukzessionsstudien und Studien des Kohlenstoff- und Nährstoffkreislaufs (Sonntag 1998). Desweiteren finden in der Forstwirtschaft Bestandsmodelle mit empirischen Ertragstafeln und mit einem relativ einfa-

chem Wachstumsmodell Verwendung. Forstmanagementmodelle, die speziell für den Forstbetrieb entwickelt worden sind, sollen helfen, einen Überblick über die Zusammensetzung des Bestandes, Pflegemaßnahmen, Durchforstung und die Kosten und Erlöse eines Betriebes zu gewinnen. Die Unterteilung nach dem Verwendungszweck läßt noch nicht auf die genauere Struktur schließen. Eine weitere detailliertere Unterteilung ist daher sinnvoll. Weitere Möglichkeiten der Klassifikation sind:

4.2.2. Art der Skalierung

Unterscheidung nach Blattphotosynthese- oder Kronenraummodellen und Einzelbaummodellen, die an auf der unteren organisatorischen Skala einordnet. Auf oberer organisatorischer Skala werden die sog. Gap-Modelle, Bestandwachstummodelle, regionale und Vegetationstypmodelle eingeordnet.

Die Bestandwachstummodelle lassen sich wiederum in Bestandsmodelle und Einzelbaummodelle einteilen. In den Bestandsmodellen werden die durchschnittlichen Eigenschaften eines Bestandes berechnet, während die einzelbaumorientierten Modelle die Eigenschaften eines Bestandes aus der Dynamik der Einzelbäume berechnen.

4.2.3. Waldtyp

Es können Modelle nach verschiedenen Waldtypen unterschieden werden. Z.B. nach Waldtypen der verschiedenen Klimazonen:

- boreal: dem nördlichen Klima zugehörend, d.h. Wälder in Norden Europas, Asiens und Nordamerikas
- temperiert: Wälder im gemäßigttem Klimagebiet
- tropisch

Unterschieden werden auch bewirtschaftete, nicht bewirtschaftete Wälder, gepflanzte oder natürliche Bestände, sowie gleich- und nichtgleichaltrige Bestände.

4.3 Teilmodelle der Forstmodelle

Der erste Schritt bei der Aufstellung eines Forstmodells besteht in der Bestimmung der Systemgrenze und der Bestimmung der Einflußparameter. Für eine Forstsimulation ist die Atmosphäre die Systemgrenze. Der Boden muß als Teilsystem miteinbezogen werden, da intensive Rückkopplungsmechanismen zwischen Pflanzen und Boden bestehen.

Die Komponenten der Atmosphäre wie Temperatur, Niederschlag oder Stickstoffeintrag und gegebenenfalls Schadstoffbelastung gehen als exogene, d. h. vorgegebene und systembeeinflussende Größen in die Modellbetrachtung mit ein. Als exogene Größen müssen auch die Lichtverhältnisse miteinbezogen werden. Ebenso gehen die geographischen Bedingungen und Bewirt-

schaftungsmaßnahmen (Abholzung, Pflanzung, Düngung etc.) als vorgegebene Größen in die Modellierung mit ein.

Zusammenfassend lassen sich die wichtigsten systemrelevanten Bereiche der Forstmodellierung unterteilen in:

- Wachstum der wichtigsten Vegetationsgruppen (die Modelle sind baumartenspezifisch)
- Boden (Rückkopplung Boden-Pflanze, Nährstoffverfügbarkeit, Mineralisierung)
- Lichtverhältnisse (Photosynthese, Biomasseproduktion)
- Umwelteinflüsse

Die Details hängen von der Problemstellung bzw. von dem Simulationszweck ab.

4.3.1. Wachstum

Grundsätzlich gibt es für die Darstellung des Wachstum der Pflanze zwei verschiedene Möglichkeiten. Die eine ist das einfache Zurückgreifen auf spezifische Wachstumsparameter, die auch für die am häufigsten vorkommenden Baumarten bekannt sind. Diese Modelle werden als empirisch bezeichnet. Die andere Möglichkeit ist die prozeßorientierte Darstellung der Bioprodukten als Ergebnis der Photosynthese.

Die Darstellung der Bioproduktion (Wachstum) konzentriert sich in den prozeßorientierten Modellen auf die Photosyntheseproduktion in Abhängigkeit von Klima- und Bodenverhältnissen. Da die Biomasse die Speichermenge der mit der Photosynthese und der Sonnenenergie aufgebauten organischen Substanz angibt, ist sie damit die zentrale Zustandsgröße für die Entwicklung eines Pflanzenbestandes.

Die meisten Modelle verwenden Untermodelle für die Photosynthese. Aus den oben angegebenen Gründen ist die Modellierung der Photosynthese ein zentraler Bestandteil der dynamischen und prozeßorientierten Forstmodelle und hat entscheidenden Einfluß auf weitere Aussagen eines Modells.

Der Wachstumsvorgang wird durch artenspezifische Faktoren, die die Gestalt und die Dynamik des Wachstums bestimmen, wie auch durch äußere Faktoren (Klima, Boden), die die Geschwindigkeit und die Menge des Zuwachses bestimmen, beeinflußt. Daher beziehen sich Forstmodelle immer auf bestimmte Baumarten und Klimazonen.

4.3.2. Boden

Die Biomasseproduktion hängt auch entscheidend von der Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit ab. Da die Prozesse der Mineralisierung und Wasserspeicherung im Boden ablaufen, ist es unumgänglich, die Bodenfaktoren mit einzubeziehen.

Dem Liebig'schen Gesetz des Minimums folgend wird davon ausgegangen, daß das Wachstum von dem am wenigsten vorhandenem Nährstoff bestimmt wird. Bei terrestrischen Ökosystemen wird meistens der pflanzenverfügbare Stickstoff als minimierende Faktor angenommen. Alle anderen Nährstoffe werden als genügend vorhanden angenommen. Stellvertretend für den Nährstoffkreislauf wird daher meistens der Stickstoffkreislauf verwendet.

Die Simulation des Stoffhaushaltes im Boden besteht aus den folgenden wesentlichen Faktoren:

- Eintrag an organischem Material (z.B. Laubabfall)
- Mineralisierung der organischen Substanz
- Anteil an mineralisch verfügbarem Nährstoff
- Nährstoffaufnahme der Pflanzen

4.3.3. Lichtverhältnisse

Die Photosyntheseleistung einer Pflanze ist nicht nur artspezifisch, sondern hängt naturgemäß von der Sonneneinstrahlung ab. Die Beschattungsverhältnisse müssen auch berücksichtigt werden, da die oberen Blätter eines Bestandes einer höheren Einstrahlungsintensität ausgesetzt sind, als die unteren Blätter. Die Abnahme der Strahlungsintensität innerhalb der Krone wird als kontinuierlich angesehen und hängt von der Pflanzengeometrie ab. Blattform, Blattdichte und Höhe einer Pflanze beeinflussen die Lichtverhältnisse und müssen daher auch artspezifisch angesehen werden.

4.3.4. Umwelteinflüsse

Ein weiterer Verwendungszweck, der die Struktur maßgeblich beeinflusst, ist die Untersuchung der Einflüsse äußerer Störungen. So gibt es Modelle, die speziell zur Untersuchung der Klimaänderung und erhöhten CO₂ Konzentration der Atmosphäre entwickelt worden sind, und Modelle, die Sauren Regen, erhöhte Stickstoffdeposition, Ozonbelastung, erhöhte UV-Belastung u.ä. berücksichtigen.

Von einigen Modellen wird behauptet, sie könnten auch den Einfluß der Umweltverschmutzung auf das Wachstum simulieren (ForGrow, Efimod, Treedyn3). Tatsache ist, daß kein direkter Wirkungsmechanismus zwischen Verschmutzung und Wachstum erkannt ist. In allen Modellen wird der Umwelteinfluß der Verschmutzung als wachstumsreduzierender Faktor in der Photosynthese berücksichtigt, der vom Anwender selber geschätzt und eingegeben werden muß.

4.4 Übersicht über einige Forstmodelle und Forschungsprojekte

4.4.1. ECOCRAFT

Im Rahmen des europäischen Projekts ECOCRAFT (seit Januar 1993) arbeiten 12 Partner aus 9 verschiedenen Ländern. ECOCRAFT ist ein Projekt der Europäischen Union und ein Teil des internationalen Projekts GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystems). In diesem Projekt soll der Einfluß der steigenden Temperatur und des CO₂ Gehalts der Atmosphäre auf das Wachstum der Bäume untersucht werden. Außerdem wird in diesem Rahmen auch die Aussa- gefähigkeit von verschiedenen Modellen untersucht. Untersucht werden 11 Modelle, die nach ihrer Zeitskala in 3 Gruppen geteilt werden.

- **short time scale:**

CANAOK (PC Harley, DD Baldocchi, 1995), MAESTRO (Y-P. Wang, PG Jarvis, 1990). Diese Modelle simulieren die Kroneneinstrahlung und Photosynthese stündlich bis täglich.

- **intermediate time scale:**

BIOMASS (RE McMurtrie, DA Rook, FM Kelliher, 1990), CARDYN (F. Veroustraete, 1994), CASTANEA (Eric Dufrene, Universite de Paris-Sud, Frankreich), GROMIT (Tim Rnadle, Forestry Commission, England), MEBESTMOD (Alfred Stille, Technische Universität Berlin) simulieren Kohlenstoffgehalt der Krone und Wasserkreislauf auf jährlicher Basis. Die Kronenstruktur ist nicht so detailliert dargestellt, wie in den Modellen der ersten Gruppe.

- **long-term time scale:**

G'DAY (RE McMurtrie, HN Comins, 1993), HYBRID (AD Friend, AK Stevens, RG Knox, MGR Cannell, 1996), FINNFOR (Seppo Kellomaki, University of Jensuu, Finnland), SUSTAIN (Roddy Dewar, 1996) simulieren den Nährstoffkreislauf innerhalb des Systems in einer weniger detaillierten Form, als in den Modellen der zweiten Gruppe.

Zum besseren Vergleich der Ergebnisse benutzen alle Ecocraft-Modelle, außer GROMIT und BIOMASS, das gleiche Blattphotosynthesemodell als Untermodell.

4.4.2. LTEEF

LTEEF (Long-term Effects of CO₂ Increase and Climate Change on European Forest) war ebenfalls ein Projekt der Europäischen Union (1994 bis 1996) mit dem Hauptziel, die Effekte einer Klimaveränderung auf das langfristige Wachstum der europäischen Wälder zu untersuchen, insbesondere der steigenden CO₂-Konzentration der Atmosphäre. Dabei wurden 8 verschiedene Bestandeswachstumsmodelle auf einen Testbestand angewandt und die Prognoseergebnisse miteinander verglichen. Seit 1996 läuft das Nachfolgeprojekt LTEEF II.

Das wichtigste Ergebnis dieses Projekts im Hinblick auf die benutzten Modelle war, daß das Blattphotosynthesemodul in den Modellen einen großen Einfluß auf die Prognosen hat. Zum Test wurde in dem Modell TREEDYN3 und TRAGIC ein identisches biochemisches Modell der Blattphotosynthese eingefügt und die Simulationen verglichen. (Sonntag)

4.4.3. Weitere Modelle

In der Tabelle sind weitere Forstmodelle kurz aufgeführt.

Tabelle 2: Forstmodelle

Modellname	Charakteristik	Entwickler
FORGRO Forest Growth Modell	Simulation des Wasser-, Kohlenstoff- und Nährstoffkreislaufs	Dr. G.M.J. Mohren, 1987 Institute for Forestry and Nature Research, Wageningen, Niederlande
EFIMOD Forest ecology and Management	Wachstumsmodell für Wälder der nördlichen Breitengrade, beinhaltet unter anderem auch die Schneeperiode und Einflüsse verschiedener industrieller Verschmutzungen	O.G. Chertov, A.S. Komarov, A.M. Tsiplianovski European Forest Institute, Joensuu
SILVA M-73	simuliert Wachstum für gleichaltrige und ungleichaltrige Rein- und Mischwälder	Ludwig-Maximilian-Universität, München, 1994
BWIN 3.12 Waldwachstumsmodell für Nordwestdeutschland	Modell zur Bestandesbewertung und -behandlung für die Forstwirtschaft	Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen, 1997
FBSM Simulationsmodell für Forstbetriebe	simuliert Wachstum und forstwirtschaftliche Maßnahmen realer Bestände mit Berücksichti-	Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Schweiz, 1997

	gung des Schadenszustandes	
FORSOL Forest-Soil-Model	Wachstumsmodell, simuliert Streßfaktoren wie Bodenversauerung, Ozonbelastung	J. Van Minnen, R. Meijers, L. Braat, National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven, Niederlande, 1995
SOILVEG, model to evaluate effects of acid atmospheric deposition on soil and forest	Wachstumsmodell unter besonderer Berücksichtigung der sauren Deposition auf Pflanze und Boden	J. J. M. Berdowski, C. Van Heerden, J. J. M. Van Grinsven, J. Van Minnen, W. De Vries, National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven, Niederlande
LIGNUM structure and function of a single tree	ausführliches Wachstumsmodell für einen Einzelbaum, kann auf verschiedene Baumarten angepaßt werden	Finnish Forest Research Institute Helsinki, Finland

4.5 Beispiele

4.5.1 BWIN 3.12

Das Modell wurde für die Bestandesbewertung und Bestandesbehandlung der Forstwirtschaft speziell als Waldwachstumsmodell für Nordwestdeutschland von der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt entwickelt. Es ist ein empirisches Einzelbaummodell, das für die Wachstumssimulation ein Prognose-Modul benutzt, d.h. für alle wichtigen Baumarten in Norddeutschland gibt es eine eigene Parametrisierung, wonach das Wachstum der Baumart in 5-Jahresschritten geschätzt wird. Es gibt also kein Photosynthesemodell, wie in den prozeßorientierten Modellen. Die Einzelbaumdaten werden für einen durchschnittlichen Baum berechnet und dann in Bestandesdaten aggregiert.

a) Modellstruktur

Das Modell besteht aus drei wichtigen Komponenten:

- **1. Datenhaltung**

Hier sind die bestandesspezifischen Rohdaten gespeichert, die in einer Datenbank mitgeliefert werden. Unter Rohdaten sind tatsächlich erhobene Daten zu verstehen. Mit einem Datenergänzungsmodul können die eingegebenen Daten dann zu einem vollständigem Datensatz ergänzt und weitergegeben werden. Ein vollständiger Datensatz besteht aus: Baumart, Alter, Brusthöhen-durchmesser (BHD), Höhe, Kronenansatz, Kronenbreite, Markierung für das Jahr des Aus-

scheidens. In der Datenhaltung werden außerdem die Ergebnisse gespeichert und sind jederzeit als Grafiken oder Listen abrufen.

- **2. Programmroutinen**

Arbeitschritte der Programmroutinen sind: Datenbearbeitung, Datenergänzung, Durchforstungsmaßnahmen, Einzelbaumwachstumsmodell, Ergebnisgenerator, Strukturgenerator und Benutzerhilfe.

- **3. Benutzeroberfläche**

Die Benutzeroberfläche entspricht der Windows-Oberfläche. Über den Datenmanager können folgende Funktionen aufgerufen werden: Koeffizientenwerte (Datenergänzungsfunktion, Modellfunktionen), Definitionen, Voreinstellungen, Benutzerhilfe und die Ertragstafeln.

- b) Besonderheiten von BWIN 3.12**

- Die Parametrisierung der Baumarten ist parameteroffen, d.h. der Benutzer hat die Möglichkeit, die Parameter zu ändern und damit den eigenen Bedürfnissen anzupassen.
- Die übliche Windows-Oberfläche benötigt keine besondere Gewöhnungszeit.
- Es gibt eine Online-Hilfe, die jederzeit abrufbar ist.

4.5.2. TREEDYN3 (Forest Simulation Model)

TREEDYN3 ist ein prozeßorientiertes Einzelbaummodell für Reinbestände, d.h. alle Bäume sind gleichaltrig und von derselben Art. Basierend auf dem Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt eines durchschnittlichen Einzelbaums werden alle wichtigen Bestandescharakteristika berechnet.

- a) Modellstruktur**

Der Bestand wird als eine variable Anzahl von Einzelbäumen berechnet.

- Der Einzelbaum besteht aus: Blättern, Früchten, Feinwurzeln, Assimilat-Zwischenspeicher und Stamm mit Grobwurzeln und Ästen. Diese Komponenten des Einzelbaums werden zusätzlich in der Speicherung von Kohlenstoff und Stickstoff unterschieden.
- Der Stamm, bestehend aus einem inneren Holzkern und äußeren Splintholzmantel (lebende jüngere Jahresringe eines Baumes), wird als konisch und mit einer konstanten Formzahl (Maßzahl zur Charakterisierung der Stammform) beschrieben.
- Die Baumkrone ist von zylindrischer Form und hat einen Durchmesser, der im konstanten Verhältnis zum Basisdurchmesser des Stammes steht.
- Der Kronenraum wird aus räumlich homogen verteilten Einzelkronen aufgebaut.
- Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt des Bodens werden bestimmt durch eine Streuauflage, einen Mineralbodenhorizont und einen Speicher für pflanzenverfügbaren Stickstoff.

- b) Umwelt**

Folgende atmosphärische Größen werden berücksichtigt:

- Lufttemperatur: wird als über den Tag konstant angenommen.
- tägliche Einstrahlung: direkte und diffuse Einstrahlung werden über den Grad der Bewölkung unterschieden. Die Einstrahlungsrichtung wird immer als senkrecht zum Bestand angenommen.
- atmosphärischer Eintrag von Stickstoff: Es wird angenommen, daß der atmosphärische Stickstoff in einen pflanzenverfügbaren Speicher aufgenommen wird.
- Störungen: die Störung besteht vor allem aus der Durchforstung.

c) Interaktionen

- Absorbierte Strahlung:

Nach dem Lambert-Beer Gesetz zur Abschwächung des Lichts wird die absorbierte Strahlung berechnet und angenommen, daß ein bestimmter Prozentsatz zur Photosynthese genutzt werden kann (PAR-Strahlung).

- Humifizierung und Dekomposition

werden von der Bodentemperatur abhängig berechnet.

- Auswaschung

Ein konstanter Anteil des pflanzenverfügbaren Stickstoffs geht pro Zeiteinheit durch Auswaschungsvorgänge verloren und gelangt ins Grundwasser.

- Konkurrenz

Zwischen den Bäumen tritt Konkurrenz auf, wenn sich die Kronenräume einzelner Bäume überlappen.

d) Zuwachs

- Photosynthese

Die Blattphotosynthese wird in hyperbolischer Form von der PAR-Strahlung abhängig angenommen und über den Tag und Kronenraum integriert. Die tägliche Photosyntheseleistung wird für unbewölkte (direkte Strahlung) und bewölkte (diffuse Strahlung) getrennt berechnet und aufsummiert. Dabei wird auch die Stickstoffversorgung berücksichtigt.

- Respiration

Erhaltungs- und Konstruktionsatmung werden unterschieden. Alle Baumkompartimente atmen proportional ihrer Masse zur Erhaltung ihrer Lebensfähigkeit. Die Respiration steigt mit der Temperatur quadratisch. Ein bestimmter Prozentsatz der zum Aufbau von Strukturen eingesetzten Assimilate wird bei der Konstruktion verbraucht (Konstruktionsatmung).

- Allokation

Die Allokation von Stickstoff erfolgt proportional zum Kohlenstoff. Erst werden die aus der Photosynthese und dem Assimilatspeicher zur Verfügung stehenden Assimilate zur Erhaltungsaer- atmung verwendet, dann zum Aufbau der Feinwurzeln, die im Verhältnis zur Blattmasse stehen. Wenn dann noch Assimilate zur Verfügung stehen, werden sie für die Früchte verwendet. Erst zum Schluß, wenn dann noch Assimilate vorhanden sind, werden diese für das Höhen- und Durchmesserwachstum verwendet. Bei jedem dieser hierarchischen Allokationsschritte wird geprüft, ob genügend Stickstoff für den Strukturaufbau vorhanden ist. Wenn nicht, wird die Al- lokation beendet, und der Vorgang wird als stickstofflimitiert bezeichnet.

- Mortalität und Regeneration

Gealtertes Gewebe wird von der Pflanze abgeworfen. Dieser Vorgang wird als Seneszenz be- zeichnet. Der Anteil der absterbenden Komponenten ist proportional zu ihrer Masse pro Zeit- einheit. Alle abgestorbenen Massen werden in die Streuauflage des Bodens überführt. Vor dem Abwurf wird ein bestimmter Teil des Kohlenstoffs und Stickstoffs der abzuwerfenden Teile durch Reallozierung wieder verfügbar gemacht.

Eine Regeneration des Forstbestandes wird nicht berücksichtigt.

e) Besonderheiten

TREEDYN3 besitzt ein ausführliches Photosynthesemodell und ist gut dokumentiert.

4.5.3. EFIMOD (Forest Ecology and Management)

EFIMOD ist ein kombiniertes Modell (Hybridmodell) zwischen einem empirischen artspezifi- schen Einzelbaummodell und einem prozeßorientierten Bodenmodell. Es wurde speziell für die borealen Zonen Europas entwickelt und für 3 wichtige Baumarten parametrisiert. Dabei wird der Baum mit seinem Wurzelgrund als elementare Einheit des Modells betrachtet (Single Tree Ecosystem, STE), da der Raum, den die Wurzeln einnehmen, von der Größe und dem Nähr- stoffbedarf des Baumes abhängt. Nach diesem Modell besteht der simulierte Wald aus einer Gruppe von STE-Einheiten, die in Einjahresschritten berechnet werden.

a) Modellstruktur

Das Modell besteht aus 4 Komponenten:

- das Untermodell zur Berechnung des Wachstums eines Einzelbaumes: für die Wachstumssi- mulation werden artspezifische Prozeßparameter benutzt, die die Produktion und das Wachstum für 3 Baumarten (schottische Kiefer, Norwegische Fichte und Birke) der nördli- chen Klimazone Europas beschreiben. Dabei werden nur die 3 wichtigen Komponenten ei- nes Baumes berücksichtigt, nämlich die gesamte Biomasse, die Blatt- bzw. Nadelmasse und die Masse der Feinwurzeln.
- das Untermodell für die Simulierung der Bodenbeschaffenheit: anders als das Wachstums- modell, ist das Bodenmodell prozeßorientiert und berechnet die Zersetzungsprozesse und

Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit von der Zeit und unter Berücksichtigung der Bodenzusammensetzung. Der Boden kann unterschieden werden in Feuchtegrad und Humusanteil.

- das Single Tree Ecosystem- Modell: kombiniert die erst genannten beide Untermodelle
- Das komplette Modell: kombiniert alle Modelleinheiten und berechnet einige zusätzliche Prozesse, die sich aus der Interaktion der einzelnen SPE-Einheiten ergeben.

Die Ergebnisse werden als Grafiken, in denen die Gesamtbiomasse auf der Zeit aufgetragen sind, ausgegeben.

b) Besonderheiten

Das Besondere an EFIMOD ist das ausführliche Bodenmodell und die Einteilung nach Einzelbaumökologie-Einheiten (STE).

4.6 Schlußfolgerungen

Empirische Wachstumsmodelle genügen den Anforderungen der forstwirtschaftlichen Betriebe, da hier vor allem die Übersicht über den aktuellen Bestand, Ernteaufkommen und Durchforschungsmaßnahmen von Bedeutung sind. Genaue Prozeßbeschreibung ist nicht nötig für die ungefähre Schätzung. Doch um in Zukunft Aussagen über das Verhalten der Wälder auf Umwelteinwirkungen wie erhöhte CO₂ Konzentration und erhöhte Temperatur der Atmosphäre machen zu können, sind prozeßorientierte Modelle mit ausführlichem Photosynthese-Modul unverzichtbar. Die Einwirkungen von CO₂ und eine erhöhte Temperatur sind gut erforscht und in Forstsimulationsmodellen realisiert. Andere Einwirkungen, wie z.B. Schadstoffbelastung aus der Atmosphäre bedürfen noch einer Entwicklung.

Ebenso ist es auch von großer Bedeutung, genauere und flächendeckendere Datenerhebungen zum Waldbestand durchzuführen und zu dokumentieren, um die Trendaussagen zu überprüfen und die Datenlage für weitere Modelle zu verbessern. Die mangelhafte Datenlage auf dem Gebiet der Forstwirtschaft wird von fast allen hier zitierten Wissenschaftlern kritisiert.

Ein weiteres verbesserungswürdiges Gebiet ist die Modellierung des Mischwaldes. Der Mischwald wird in Zukunft für Europa eine größere Rolle spielen, da man inzwischen erkannt hat, daß reine Bestände einer Baumart anfälliger für Schädigungen sind und somit der europäische Wald in seiner ursprünglichen Form, nämlich als Mischwald, ökologisch im besseren Gleichgewicht ist. In einigen Modellen wird die Mischwaldsimulation dadurch gelöst, daß die Baumarten als getrennte Gruppen von Reinbeständen betrachtet und die Ergebnisse dann kombiniert werden. Die Parametereinstellung für Mischwälder erweist sich zur Zeit noch als schwierig, da diese, wie erläutert, artspezifisch sind und das Konkurrenzverhalten um Nährstoffe, Wasser und Licht nicht genügend erforscht ist.

5. Landwirtschaftliche Modelle

5.1 Landwirtschaftliche Modelltypen

a) Wasserbilanzierungen

Diese Modelle bilanzieren den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Flächen. Simuliert werden regionale Oberflächen- und Grundwasserflüsse und deren Qualität. Als Inputs werden Bodencharakteristika und hydrologische Kenndaten benötigt. Als Beispiel dient HUMUS, ein Modell, das in Colorado zur Simulation von Wasserflüssen und alternativen Landnutzungen angewendet wurde. BROOK simuliert auf Basis von Niederschlägen die Wasserabläufe von Bächen und Flüssen.

b) Betriebswirtschaftliche Kostenbilanzierungen

Diese Gruppe von Modellen simuliert die Kosten und Einnahmen von Agrarunternehmen. Dabei kann die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt und alternative Landnutzung vorgeschlagen werden. Ein Modellbeispiel ist CARE.

c) Ertragssimulationen

Hier werden in Abhängigkeit der Bodenkenndaten und klimatischer Faktoren Ernteerträge (z.B. Weizen von AGROSIM_WW, Raps von CERES_CANOLA) errechnet.

Das Modell *NTRM* bildet Ertragsveränderungen aufgrund von Klimaveränderungen, Nitratauswaschungen und Bodentemperaturen ab. Es simuliert auch die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlichen Parzellen. Das *NTRM* Modell stellt einen ökologischen Bezug zwischen Klimaveränderungen, landwirtschaftlichen Erträgen und Nitratbelastungen des Grundwassers in Aussicht.

d) Nährstoffkreisläufe

Hier wird der Kreislauf, also die Umsetzung von Nährstoffen zwischen Boden und Pflanze, simuliert, z.B. von Stickstoff und Kohlenstoff (z.B. von *TEM*, *CENTURY*). Von ökologischer Bedeutung können diese Modelle bei der Frage nach Nährstoffauswaschungen aus dem Bodenkörper oder Humusrückgang unter landwirtschaftlicher Bearbeitung sein. Beide Vorgänge können eine langfristige Belastung der nachhaltigen Bodenfruchtbarkeit darstellen, aber auch durch Düngemaßnahmen kontrolliert werden.

Das Modell *TEM* stellt einen Zusammenhang zwischen Klima und Pflanzenenertrag her und wurde näher untersucht, um eventuell eine Aussagemöglichkeit über die Veränderung der Ernteerträge aufgrund klimatischer Veränderungen zu finden. Daß ein solcher Zusammenhang existiert und bereits heute simuliert werden kann, findet in der Fachwelt allerdings Zweifler, die diesen Bereich wissenschaftlich noch nicht ausreichend gesichert finden.

e) Grundwassereinträge

Nitratauswaschungen aus landwirtschaftlichen Flächen stellen ein wachsendes Problem für die Trinkwasserversorgung in Deutschland dar. Vielerorts sind in Deutschland bereits die Nitratgehalte im Grundwasser über den gesetzlichen Grenzwert von 50 µg/l angestiegen. Das bedeutet, daß zusätzliche Aufbereitungsmaßnahmen angewendet werden müssen. Die Nitratauswaschungen von landwirtschaftlich genutzten Feldern eutrophieren Oberflächengewässer, was zu einer Verarmung der Artenvielfalt führt. Ursache ist die intensive Düngung mit organischen oder anorganischem Stickstoff oder Phosphat auf den Feldern. Oft kennen die Bauern nicht die optimale Düngermenge ihrer Felder, oder der Wunsch nach maximalen Ernteerträgen übersteigt die ökologische Vernunft. Das Modell *NLEAP* bildet die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlichen Böden in das Grundwasser ab. Als Input dienen Boden-, Klima- und Bearbeitungsdaten, woraufhin Versickerungsmenge und Nitratbelastungen ausgegeben werden.

Auch die Einträge von Pestiziden in das Grundwasser stellen eine Gefahr für die Grundwasserressourcen dar. In einer steigenden Zahl von Gebieten wird der europäische Summengrenzwert für Biozide von 1 µg/l bereits überschritten. Während zwischen 1960 und 1980 der Einsatz von Dünger- und Pflanzenschutzmitteln sich etwa verdreifachte, ist er seit Ende der 80er Jahre rückläufig. Neben dem Modell *PATRIOT* stellt das Modell *PELMO* den Abbau und Transport von Pestiziden in das Grundwasser dar. Als Input werden klimatologische Daten und Bodenparameter benötigt, womit die Tiefen- und Konzentrationsverteilung der Pestizide im Boden sowie der Grundwassereintrag ausgegeben werden.

f) Schadstofftransport

Das Modell *CEMOS* ist ein umfassender Ansatz, die Ausbreitung von umweltrelevanten Schadstoffen in den verschiedenen Umweltkompartimenten zu beschreiben. Dabei werden auch die Stoffübergänge zwischen den Medien (Boden, Wasser, Luft, Mensch, Pflanze, Tier) berücksichtigt. Das Modell besteht aus Untermodellen, wobei sich eines auf die Simulation von Schadstofftransporten im Boden bezieht (*Cemos/Soil*). Damit könnte eine Gefährdung durch Altlastenfälle beschrieben werden oder auch die Aufnahme und Trockendeposition von Luftschadstoffen durch den Boden. Das Modell bezieht sich nicht in erster Linie auf landwirtschaftliche Problemstellungen.

g) Erosion

Eine schonende Bodenbearbeitung, die dem Standort und der Kultur angepaßt ist, kann dazu beitragen, Unkraut und Schadorganismen zu verringern. Dabei müssen vor Ort die Bodeneigenschaften, die Bodenfeuchte und die Vorfrucht berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, wie sich die Bodenbearbeitung auf die Mineralisierung auswirkt und ob der Boden durch Wind und Wasser erodiert. Manche Boden-Klima-Regionen sind nicht für diese Bearbeitungsmethode geeignet. Durch eine pfluglose Bearbeitung kann die Erosion gehemmt werden, doch gleichzeitig hemmt sie auch das Wachstum der Pflanzen. So muß im Einzelfall der Landwirt den Bodenschutz gegen den Pflanzenschutz abwägen (BML, Referat 313 1998).

Durch Erosion werden jährlich schätzungsweise 10-12 Tonnen pro Hektar und Jahr abgetragen. Dies entspricht in etwa der von der deutschen Landwirtschaft produzierten Biomasse von 190 Mio. Tonnen. Für die Bildung von 2-3 cm Boden durch Verwitterung werden mehrere 100 Jahre veranschlagt. Daraus wird deutlich, daß Bodenerosion langfristig irreversibel die Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit zukünftiger Generationen gefährdet. Der Verlust an Boden wurde dadurch verstärkt, daß kleine Felder zu größeren Einheiten zusammengefaßt wurden. Windbrecher, wie Hecken oder Wälder, wurden zur einfacheren Feldbearbeitung entfernt (Flurbereinigung). Die Bodenerosion wird durch eine ungünstige Fruchtwahl unterstützt. Bei Mais tritt eine Rillenerosion bei Starkregen auf, wenn keine Unterfrucht gesät wird. Mit flächendeckender Winderosion ist im Herbst bis Frühjahr zu rechnen, wenn der Acker unbedeckt ist und keine Zwischenfrucht angebaut wurde.

Erosion wird in Deutschland nicht als vorwiegendes Problem betrachtet, das ist eher in den USA der Fall, wo bereits einige Modellierungsversuche zur Erfassung von Erosion gestartet wurden. Aber auch für Deutschland ist das Thema, wie oben genannte Zahlen belegen, relevant, nur fällt hier besonders eine regionale oder gar nationale Simulation schwer, weil die Vorgänge der Erosion sehr stark an lokale Faktoren (Hangneigung, Bewirtschaftung, Fruchtanbau etc.) gekoppelt sind. Wie dieses Problem angegangen werden könnte, bedarf weiterer Überlegungen.

Im folgenden werden die einzelnen Modelle näher vorgestellt.

5.2 Ausgewählte landwirtschaftliche Modelle

5.2.1 Nitrogen Tillage Residue Management Model (NTRM)

Hintergrund:

Das Modell wurde Ende der 80er entwickelt. Es stellt die klimatischen Auswirkungen auf Pflanzen dar und simuliert die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Eingegeben werden Bodeneigenschaften, tägliche Wetterdaten und die Form der Bewirtschaftung. Pflanzenwachstum, Nitratauswaschung und Erosion werden dargestellt. Das Modell wurde vom Agricultural Research Service in Fort Collins (Colorado, USA) entwickelt.

Aufbau:

Das Programm besitzt keine Benutzeroberfläche, sondern führt die Berechnungen von formatierten Dateien aus. Ein ausführliches Benutzerhandbuch ist vorhanden.

Die Inputdaten sind beispielhaft für South Dakota 1986, Beadle Natural Severe Erosion, eingegeben. Es ist möglich, neue Datensätze von CD-Rom Datenbanken einzulesen. Die Datei ntrm1.de gibt eingespeicherte Graphiken aus, die die Nitratauswaschung über das Jahr darstellen.

Bewertung:

Das Programm erwies sich nach bisheriger Erfahrung als besser geeignet für die Vorhersage langfristiger Umwelteffekte als für kurze Zeitperioden. Bislang wurde NTRM lediglich auf einzelnen Feldern angewendet. Nach Aussage von Patricia Bartling, Range Scientist an der Colorado State University, wäre jedoch eine Anwendung auf größere Räume möglich, wenn diese einzeln berechnet und aggregiert würden.

Ähnlich inhaltlich ausgerichtet ist NLEAP, das ebenfalls Nitrat zum Thema hat und den Austrag durch Sickerwässer beschreibt.

5.2.2. Nitrate Leaching and Economic Analysis Package (NLEAP)

Hintergrund:

Das Programm beschreibt die Auswaschung von Nitrat aus dem Boden in Abhängigkeit von klimatischen Veränderungen, der Bewirtschaftung und den Bodentypen. Es wurde im Jahr 1996 (letzte Informationsüberarbeitung der Internet-Seiten: September 1997), wie das NTRM, vom Agricultural Research Service in Fort Collins in Zusammenarbeit mit weiteren Unternehmen und Universitäten in Colorado entworfen. Die Programmiersprache ist FORTRAN und C. Für die Berechnungen braucht das Modell etwa 3 Sekunden.

Aufbau:

Als Inputgrößen werden Bodenkennwerte, klimatische Rahmendaten und Bearbeitungsweisen benötigt. Boden- und Klimadaten können aus Datenbanken geladen werden, aber Bewirtschaftungscharakteristika müssen von den Anwendern bereit gestellt werden. Es berücksichtigt die Quellen und Senken des Stickstoffkreislaufes im Boden und berechnet den Netto-N-Austrag. In den monatlichen oder jährlichen Prognosen unterliegen die Wassereinträge einer allgemeinen Abschätzung von Durchschnittswerten. Mit Hilfe der EbE- Simulation können sehr viel genauere klimatische Bedingungen vorgegeben werden.

Das Modell kann auch regionale Raumskalen beschreiben, indem geographische Informationssysteme eingesetzt werden. Diese Datenbanken sind für einzelne Bundesstaaten der USA bereits erstellt, aber da das Format bekannt ist, könnten sie für deutsche Bedingungen umgeschrieben werden. Die Ergebnisse werden in Form von Tabellen, Graphiken und Text ausgegeben. Zeitlich bewegen sich die Vorhersagen zwischen monatlichen, jährlichen und sogenannten event-by-event Prognosen. Monatliche und event-by-event Analysen können insbesondere dazu dienen, alternative Bewirtschaftungsprognosen aufzustellen.

Bewertung:

Das Modell wurde gegen praktische Feldversuche mittels Lysimeter, Field Plots und Meßdaten von acht Staaten der USA kalibriert. Angewendet werden kann es laut Autoren, um die Biomasseproduktion zu bestimmen und um kritische Punkte von Nitratauswaschungen zu identifizieren. Das Modell kann noch nicht auf alle Bodentypen angewendet werden. Organische Böden stellen noch eine große Herausforderung für die Forschung dar.

Als weitere Entwicklung des Modells soll eine metrische Version des Model aufgebaut werden, die international Anwendung finden kann. Außerdem sollen einige inhaltliche Schwächen des Programms verbessert werden. Es besteht der Plan, das Model auf C++ umzuprogrammieren, so daß eine Konvertierung auf UNIX möglich ist.

5.2.3. Pesticide Leaching Model (PELMO)*Hintergrund:*

Das Modell wurde 1993 vom Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie in Zusammenarbeit mit anderen Instituten entworfen (Ansprechpartner: Michael Klein). Es beschreibt das Verbleiben von Pestiziden in landwirtschaftlichen Böden. Das Modell stellt eine Verbesserung des 1984 aufgebauten PRZM (Pesticide Zone Root Model) dar. Angewendet wurde es bislang hauptsächlich auf deutschen Böden. Es wird vom Umweltbundesamt für die Zulassung von Pestiziden verwendet. Zur Anwendung benötigt das Programm einen IBM-kompatiblen Computer.

Aufbau:

Das Modell besteht aus zwei Komponenten: dem hydraulischen und dem chemischen Transport. Pflanzenabsorption, Abfluß und Erosion werden in die Berechnungen einbezogen. Tägliche Klimadaten werden eingelesen (ASCII-Datei), um die Temperaturverteilung im Bodenprofil zu beschreiben. Weitere Inputgrößen sind Angaben über die Pestizide und spezifische Kenndaten des Bodentyps. Das Programm berechnet in Abhängigkeit von der Zeit (bis zu 20 Jahre) die Tiefenverteilung der Pestizidkonzentrationen im Boden und im Sickerwasser.

Das Demo-Program besitzt eine sehr übersichtliche benutzerfreundliche Arbeitsoberfläche. Alle Input- und Outputdateien sind im Benutzerhandbuch verständlich beschrieben.

Bewertung:

Als Nachteil des Modells könnten sich die detaillierten Inputfaktoren erweisen, der eine Anwendung auf größere nationale Flächen bei der Informationseingabe sehr aufwendig macht. Vorteilhaft ist die bereits erfolgte Anwendung des Modells.

5.2.4. Chemical Exposure Model System (CemoS/Soil)

Hintergrund:

Das Untermodell CemoS/Soil gehört zu dem Modell CemoS/Level2, das die Ausbreitung von Gefahrstoffen in Umweltkompartimenten simuliert. Dazu gehören Modulprogramme zu den Bereichen Wasser, Boden, Luft, Suspensionen, Pflanzen und Fische. Das Modell wurde von dem Institut für Angewandte Systemwissenschaften der Universität Osnabrück von 1993 bis 1995 entwickelt (Prof. Matthies und Dr. S. Trapp). Es ist ein Buch über das Modell in englischer Sprache veröffentlicht worden (Dynamik von Schadstoffen - Umweltmodellierung mit CemoS. Eine Einführung, Springer 1997). Das Buch enthält auch eine Programmdiskette.

Das Modell CemoS/Soil beschreibt dynamisch den Transport von Chemikalien in einer Bodensäule.

Aufbau:

Als Input-Variablen werden Bodenkennwerte, Klimadaten, Anfangskonzentrationen der Chemikalien sowie Stoffübergangskoeffizienten verwendet. Simuliert werden die Konzentrationen innerhalb 1 bis 10 Jahre, die von umweltgefährdenden Schadstoffen aus punktförmigen oder diffusen Quellen ausgestoßen werden. Das Modell arbeitet mit dem sogenannten Model Interchange Format (MIF), von dem alle Daten und Parameter eingelesen werden. Fehlende Parameter werden von dem Programm selbstständig geschätzt und anschließend auf ihre Plausibilität hin überprüft. Als weitere Entwicklung des Modells ist geplant, geographische Informationssysteme anzukoppeln und ein Modul zur Abschätzung von besonderen Risiken einzubauen (Informationsstand 1997).

Bewertung:

Das Gesamtmodell CemoS/Level2 könnte interessant sein, um die Ausbreitung von Schadstoffen innerhalb und zwischen den verschiedenen Umweltmedien darzustellen.

5.3 Modelle zur ökologischen Landwirtschaft

5.3.1. Situation

Im Teilbereich des ökologischen Landbaus beschränkt sich die Betrachtung auf Modelle, die auf Deutschland zugeschnitten sind. Als Anbaupflanze wurde der Winterweizen gewählt, da es eine der wichtigsten Getreidearten ist, die in Deutschland angebaut wird. Der Hauptunterschied zwischen der konventionellen Anbauweise und der ökologischen Landwirtschaft liegt im Umgang des Landwirts mit Dünger und Pflanzenschutzmitteln. Dabei stehen Maßnahmen im Mittelpunkt der Betrachtung, die einem Befall durch Schadorganismen vorbeugen. Es wurden 127 Modelle

der ZADI-Liste (Zentralstelle für Agrardokumentation und -information) in Bezug auf ihre Eignung gesichtet.

In den letzten Jahren sind viele Flächen weniger intensiv genutzt worden, weil die Nachfrage insgesamt zurückgegangen ist. Diese Entwicklung ermöglicht eine Reduktion der Umweltbelastung. Damit die Landwirtschaftsbetriebe wettbewerbsfähig bleiben, müssen die Landwirte vor allem die Dünge- und Pflanzenschutzmittel effizienter einsetzen (BML, Referat 624 1998, S. 26f). Dafür muß der Bedarf der Pflanzen bekannt sein. Auf der Grundlage von langjährigen Analysen können Simulationsmodelle erstellt werden, die den Landwirten beim Einsatz der Produktionsmittel unterstützen. Weiter können die Fruchtfolgen erweitert werden, z. B. durch den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen.

5.3.2. Modelltypen zur ökologischen Landwirtschaft

5.3.2.1. Standortauswahl

Um den Befall von Schadorganismen vorzubeugen, muß für jede Kulturart ein Standort ausgewählt werden, der den Ansprüchen der Pflanze genügt. Bodengüte und Klima müssen angemessen sein, damit die Pflanzen optimal wachsen können und die Widerstands- und Konkurrenzkraft der Pflanzen nicht geschwächt werden (BML, Referat 313 1998). Hierbei können alle Modelle von Bedeutung sein, die wichtige Prozesse für die Landwirtschaft berechnen. Dazu gehören unter anderem Wasserhaushalt, Stoffbewegung, Stickstoffdynamik, Pflanzenwachstum und Bodenwärmehaushalt. Das Modell SIMULAT erfüllt zum Beispiel diese Aufgabe. Es sagt die räumlichen und zeitlichen Veränderungen des Wassergehalts, der Wasserspannung, der Bodentemperatur und der Stoffkonzentration voraus. Die wichtigsten Eingabeparameter sind dabei die Bodeneigenschaften, Klimadaten, Parameter des Pflanzenwachstumsmodells und Parameter des Stickstoff- und des Pflanzenschutzmittel-Modells (Großmann K., Koehler C. K. 1994). Auf Pflanzenwachstumsmodelle wird später noch genauer eingegangen.

5.3.2.2. Fruchtfolgeauswahl

Zu enge Fruchtfolgen können dazu führen, daß Schadorganismen sich im nächsten Anbau anreichern. Bei Zuckerrüben und Kartoffeln zum Beispiel sind Anbaupausen empfehlenswert, um den Befall durch Nematoden zu vermeiden (BML, Referat 313 1998). Das Modell Rotacalc kann die Weizenbauer bei der Fruchtfolgestaltung unterstützen, indem es die standortspezifischen Eigenschaften berücksichtigt. Auch das zuvor beschriebene Modell SIMULAT kann zur Berechnung der Fruchtfolge verwendet werden (Großmann K., Koehler C. K. 1994). Obwohl die Nachfrage und die agrarpolitischen Bedingungen die Fruchtfolge stark mitbestimmen, sollten vermehrt Zwischenfrüchte angebaut und die Stilllegungsflächen eingeordnet werden. Diese Maß-

nahme erlaubt aber meist nicht den völligen Verzicht auf Pflanzenschutzmittel (BML, Referat 313 1998).

5.3.2.3. Sortenauswahl

Durch Pflanzenzüchtung werden Pflanzen gegenüber einigen Viren und Pilzen resistent und gegenüber Unkräutern konkurrenzfähig gemacht. Getreide werden weniger anfällig gegenüber Mehltau, Rosterkrankungen oder Nematodenbefall und brauchen daher weniger Fungizid. Allerdings ist die Resistenz einer Sorte keine stabile Größe. Schadorganismen können schon innerhalb weniger Jahren die Resistenz einer Sorte überwinden, indem sie sich natürlich selektieren und modifizieren. Einzelne Sorten sollen deshalb nicht für längere Zeit im Anbau dominieren (BML, Referat 313 1998). Nach den Richtlinien für den ökologischen Landbau müssen Saat- und Kartoffelpflanzgut, soweit verfügbar, aus biologisch-dynamischem Anbau stammen, und es sollen möglichst keine Hybridsaatgut verwendet werden. Gentechnisch verändertes Saat- und Pflanzgut ist ausgeschlossen (demeter 1998). Als Entscheidungshilfe kann bei der Sortenauswahl beispielsweise das Modell Genis dienen. Genis zeigt als Ergebnis eine Liste der einsetzbaren Sorten in der Reihenfolge ihrer jeweiligen Vorzüge (Großmann K., Koehler C. K. 1994). Inwieweit die Sorten die Forderungen der Richtlinien erfüllen, muß noch näher untersucht werden.

5.3.2.4. Nährstoffkreislauf

Sowohl ein Überschuß als auch ein Mangel an Nährstoffen und ein unausgewogenes Verhältnis zwischen den Einzelnährstoffen schwächen die Kulturpflanzen. Sie werden anfälliger gegenüber Krankheiten und Schädlingen, und die Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern verringert sich. Daher ist die bedarfsgerechte Düngung unverzichtbar (BML, Referat 313 1998).

Für den ökologischen Landbau darf die eingesetzte Gesamtstickstoffmenge max. 1,4 DE/ ha betragen. Mit organischen Handelsdüngern darf auf einer Fläche nicht mehr Stickstoff eingebracht werden, als über Kompost, Stalldünger oder Gründüngung zugeführt wird, maximal jedoch 0,5 DE/ha. Eine Ausnahme gilt bei Dauerkulturen. Ganz ausgeschlossen sind synthetische Stickstoffdünger, Chilesalpeter, leichtlösliche Phosphate, reine Kalisalze und solche mit mehr als 3% Chlor (demeter 1998).

5.3.2.5. Ertragssimulation

Eine frühe Saat von Wintergetreide fördert zwar den Befall durch Pilze, Viren und Unkräuter, doch bringt sie andererseits meistens Pflanzen hervor, die den Winter besser überstehen und gegen andere Schadorganismen widerstandsfähiger sind. Weiter kann der Landwirt durch die frühere Ernte mühelos Zwischenfrüchte anbauen. Durch eine späte Aussaat des Wintergetreides und eine möglichst frühe Aussaat des Sommergetreides können einige Schadorganismen wirksam vermindert werden, so z.B. die Fritfliege und der Gelbverzwergungsvirus der Gerste. Unter dieser Maßnahme leidet aber leider der Bestand (BML, Referat 313 1998). Die Auswirkungen

der unterschiedlichen Aussaattermine auf den Bestand kann mit Ertragssimulationsmodellen wie EBBS berechnet werden. Außerdem kann der Einsatz an Dünger und Pflanzenschutzmitteln kontrolliert werden. Das Modell prognostiziert die Ernteerträge auf der Grundlage von Bodenmerkmalen der Felder und Witterungsdaten der Region (Schulzke 1998). Als ein weiteres Ertragssimulationsmodell ist AGROSIM-WinterWheat interessant. Mit möglichst kleinen Mengen von Eingabedaten simuliert das Programm die Entwicklung der Pflanzen, den Wasser- und Stickstoffhaushalt (W. Mirschel, K.-O. Wenkel 1998).

5.3.2.6. Pflanzenpflege und Pflanzenschutz

Bei einer ökologischen Anbauweise sind chemisch-synthetische Mittel zur Bekämpfung von Unkräutern, Schädlingen und anderen Krankheiten nicht zulässig (demeter 1998). Daher sind Befallssimulation und Verlustprognose von Schadorganismen an Kulturpflanzen hilfreich, da diese Programme den optimalen Bekämpfungstermin vorhersagen. So können die zugelassenen Maßnahmen und Wirkstoffe wirkungsvoller eingesetzt werden. Das Modell MEVA simuliert den Befall von Mehltau an Winterweizen. Eingegeben werden vom 1. April bis zum 31. Juli die tägliche Niederschlagssumme, Maximal- und Minimaltemperatur. Mit Hilfe von Standardbefalls- und Standardverlustfunktionen wird der Ertragverlust prognostiziert. Anhand der Daten der Wettervorhersage wird versucht, den Zeitpunkt des Bekämpfungstermins vorherzubestimmen (Großmann K., Koehler C. K. 1994).

5.3.2.7.

5.3.2.8. Betriebsplanung

Um einen alternativ arbeitenden Betrieb wirtschaftlich zu optimieren, können Modelle wie GENLP und Ecoplan von Bedeutung sein. Die Programme enthalten eine Stammdatenbank zum ökologischen Landbau, die sich auf die Verhältnisse Baden-Württembergs bezieht. Als Ergebnis zeigen die Programme zum Beispiel den Gesamtdeckungsbeitrag und die Salden der Bilanzen Arbeit, Futter, Stickstoff und Verarbeitung (Großmann K., Koehler C. K. 1994).

5.3.3. Modellbeschreibungen

5.3.3.1. EBBS - Ertragsbildung- und Bewertungssystem für Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen

Das Modell simuliert die jahresspezifische Ertragsschwankung des Getreides zum Schoßtermin, indem es regional die Jahreswitterung und die Bodenmerkmale berücksichtigt. EBBS hilft bei der Bestandführung und beim Einsatz von Pflanzenschutz und Düngung. Die Zahlen für die Ertragsanalysen lieferten folgende drei Datenbanken:

- die Erträge der drei Wintergetreidearten von 35 Versuchsstationen und 680 Parzellenversuchen von 1971 bis 1983 aus der Zentralstelle für Sortenwesen, jetzt Bundessortenamt
- der jährliche Witterungsverlauf im gleichen Zeitraum aus dem Datenspeicher des meteorologischen Dienstes in Potsdam
- die Bodenwerte aus den Bodenkarten der mittelmäßigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) für Ostdeutschland (Schmidt und Diemann 1981).

Das Modell ermöglicht eine Ertragsprognose auf der Grundlage eines definierten Anbauverfahrens. Abweichungen vom definierten Verfahren müssen angegeben werden und ergeben nach der Auswertung den Modellertrag. Die Treffsicherheit des Modellertrages liegt bei plus minus 2,5 dt/ha.

Das definierte Anbauverfahren:

- hohe Bodenfruchtbarkeit, kein Mangel an Nährstoffen
- Getreideanteil in der Fruchtfolge ca. 50%
- Saatbettvorbereitung, Termine und Menge der Aussaat sind normativgerecht
- Herbizideinsatz nach Notwendigkeit
- traditionelle Stickstoffdüngung, geteilte Gabe im Verhältnis 60 - 70% zu 10 - 40% bei 90 - 120 kg N/ha.

Damit ist das standardisierte Anbauverfahren relativ wenig intensiviert und kann somit für die Simulation von ökologischem Landbau herangezogen werden. Folgende Inputs werden für das Modell benötigt:

- Bodenform: Bodenart, Bodentyp
- Witterung in der Zeit vom Aufgang der Saat bis zum Schoßbeginn
 - Tagesdurchschnittstemperatur in °C
 - Täglicher Niederschlag in mm
 - Sonnenscheindauer in h

Modellstruktur und Modellparameter

Der Ertrag an Getreide baut sich in drei Phasen auf, die durch verschiedene Komponenten beschrieben werden:

1. Bestandesdichte (Ähren/m²)

Die Bestandesdichte wird in der Schoßperiode festgelegt und hängt von Aussattermin und Aussaatstärke ab. Weiter wird sie von den Ernährungsbedingungen und der Qualität der Vegetationszeit bis zum Sprossen gesteuert.

2. Kornzahl pro Ähre (KZ/Ä/m²)

Die Kornzahl pro Ähre wird erst nach der Blüte festgelegt. Sie ist abhängig vom Standraum der Pflanze, dem Grad der Bestockung, der Nährstoff- und Wasserversorgung.

3. Tausendkorngewicht (TKM)

Das Tausendkorngewicht ist zeitlich die letzte Komponente, die bestimmt wird. Sie setzt sich aus Bestandesdichte und Kornzahl pro Ähre zusammen. In lockeren Beständen werden die Körner größer als in dichteren Beständen.

4. Kompartimentbezogener Witterungswert (WW_C)

Der WW_C muß jährlich für jede Boden-Klima-Region ermittelt werden. Die Werte werden in folgende Entwicklungsabschnitte unterteilt:

- Saataufgang bis Wintereintritt (WW_{C2})
- Vegetationsruhe im Winter (WW_{C3})
- Vegetationsbeginn bis Sproßbeginn (WW_{C4})
- Schoßbeginn bis Fahnenblatt (nur bei Weizen - WW_{C5})

5. Bodenformenleistungsfaktor (F_{Bf})

F_{BF} ist eine Maßzahl für die Bodenqualität eines Standort. Da jede Getreideart andere Ansprüche an den Boden hat, ist der Faktor je nach Winterroggen, -gerste und Winterweizen verschieden.

6. Klimafaktor (F_{Rg})

Der Klimafaktor definiert für jede Boden-Klima-Region den Klimacharakter. Auch dieser Faktor ist getreideartspezifisch, da die Witterung in ihrer Wirkung auf die Pflanzen variiert.

7. Bodenwasserwert (a)

Der Bodenwasserwert ist ein Korrekturfaktor für den Niederschlag, der die unterschiedliche Menge des pflanzenverfügbaren Wassers in verschiedenen Substraten berücksichtigt. Der Wert wird über ein Nomogramm ermittelt und ist abhängig von der Bodenart.

8. Verfahrensindex (V_i)

Werden Intensivierungsmaßnahmen wie höhere Düngemenge oder Beregnung eingesetzt, wird ihre Wirkung auf den Ertrag mit dem Verfahrensindex bewertet.

Von 1983 - 1989 ist das Modell unter Praxisbedingungen erfolgreich für 15 Boden-Klima-Regionen auf 29 Standorten der MMK für Ostdeutschland getestet worden. Im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes (1994 - 98) wird das Modell für ganz Deutschland angepaßt und nutzbar. Das Modell ist auf Personalcomputern lauffähig.

5.3.3.2. Übersicht

Tab. 3: Landwirtschaftsmodelle f. Wintergetreide, Kartoffel, Zuckerrüben u. Winterraps

Charakteristik	Modelle
Winterroggen	
Wachstum und Entwicklung	EBBS - Ertragsbildung- und Bewertungssystem für Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen
	AGROSIM-WR Agroökosystemmodell für Winterroggen
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Halmbruchkrankheit	WWHALMBR / WRHALMBR Berechnung der Befallsstärke der Halmbruchkrankheit in Winterweizen und Winterroggen
Winterweizen	
Sortenwahl	Genis
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Düngerbedarf	Hermes

Wachstum und Entwicklung	EBBS - Ertragsbildung- und Bewertungssystem für Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen
	AGROSIM-WinterWheat Agroökosystemmodell Winterweizen
Fruchtfolgegestaltung	Rotacalc
Echter-Mehltau-Erkrankung	MEVA Programm zur Befallsimulation und Verlustprognose von Mehltau am Weizen
	WWERY / WGERY Berechnung der Befallsstärke des Mehltaus an Winterweizen und Wintergerste
Pilzerkrankung	SEP - Sporenerkennungsprogramm
Halmbruchkrankheit	WWHALMBR / WRHALMBR Berechnung der Befallsstärke der Halmbruchkrankheit in Winterweizen und Winterroggen
Blattlaus-Bekämpfung	Laura Programm zur Entscheidungsunterstützung zur Blattlausbekämpfung im Winterweizen
Herbizidauswahl	Herby Unterstützung von Entscheidungen bei der Herbizid-Auswahl im Winterweizen
	HERBASEL Expertensystem zur Auswahl von Herbiziden und Unkrautbekämpfungsstrategien
Wintergerste	
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Wachstum und Entwicklung	EBBS - Ertragsbildung- und Bewertungssystem für Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen
Gerstenmehltau-Erkrankung	MEVA Programm zur Befallsimulation und Verlustprognose von Mehltau am Weizen
	WWERY / WGERY Berechnung der Befallsstärke des Mehltaus an Winterweizen und Wintergerste
Unkräuter und Unkrautbekämpfung	Sep Programm zur Entscheidungsunterstützung bei der Unkrautbekämpfung in Wintergerste

Kartoffel	
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Krautfäule-Erkrankung	PHYMONIT Berechnung des Befallsverlaufs von Phytophthora in Kartoffeln
	PHYSTART Prognose des Epidemiestarts von Phytophthora in Kartoffeln
Kartoffelkäfer-Bekämpfung	KK Berechnung der Populationsdynamik des Kartoffelkäfers
Zuckerrüben	
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Kostenanalyse	KORA - Kostenanalyse im Zuckerrübenanbau
Winterraps	
Boden- und Bestandsführung	COBB - Computergesteuertes System der Boden- und Bestandsführung
Pilzsporenerkennung	SEP - Sporenerkennungsprogramm
Unkräuter und Unkrautbekämpfung	RAPUS- Modell zur Unkrautbekämpfung im Winter- raps

5.3.4. Zusammenfassung

Da die meisten Landwirtschaftsmodelle auf die konventionelle Anbauweise zugeschnitten sind, bleiben nur wenige Modelle übrig, die für den alternativen Landbau ebenfalls geeignet sind. Entscheidend bei der Bewertung ist das definierte Intensivierungsniveau der Modelle: welche Fruchtfolgen, Art und Menge der Düngung, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln oder sogar Beregnungsmaßnahmen. Wenn das definierte Niveau eines Modells niedrig ist und durch Eingaben zusätzlich variierbar, dann ist es für die betrachtete Aufgabenstellung brauchbar.

Um die Umwelt nicht mit Nitrat, Ammoniak, Pestiziden oder Fungiziden zu belasten, sollen vor allem vorsorgende Maßnahmen ausgeschöpft werden. Die Auswahl der richtigen Anbaupflanze oder Fruchtfolge ist daher die wichtigste Entscheidung zum Pflanzenschutz.

Wenn die Anbauarten bereits feststehen, können durch ein Stickstoffmodell oder ein zusammenfassendes Ertragssimulationsmodell alternative Betriebe effizienter geführt und konventio-

nelle Betriebe kontrollierter extensiviert werden. Weiter unterstützen Befallssimulation und Verlustprognose die Landwirte beim Kampf gegen die Schadorganismen. Dieser Aspekt ist beim ökologischen Landbau besonders wichtig, da diese Anbauweise die Verwendung aggressiver Pflanzenschutzmittel ausschließt.

6. Wasserwirtschaftliche Modelle

6.1 Grundlagen

6.1.1. Der globale hydrologische Kreislauf

Der Hydrologische Kreislauf nach Wisler und Brater (1959) unterscheidet zwischen Wasserflüssen und Wasserspeicherung.

Das gespeicherte Wasser befindet sich in den Ozeanen, Oberflächengewässern, im Grundwasser, im Boden als Bodenfeuchte und zuletzt in sehr kleinen Mengen auf Oberflächen (Mulden, Gebäuden, Pflanzen, usw.). Von dort verdunstet es kontinuierlich und wird zum Teil in der Atmosphäre als Wasserdampf gespeichert oder fällt als Niederschlag (in seinen verschiedensten Formen) aus. Dieser Niederschlag wird zum Teil zurückgehalten (Interzeption), ein geringer Teil verdunstet, bevor er den Boden erreicht, und ein Teil fließt auf der Erdoberfläche in Vorfluter, Flüsse, Seen oder Meere ab (Landflächenabfluß) oder infiltriert den Boden. Das in die Gewässer geflossene Wasser fließt bis zur Mündung ins Meer oder in Seen weiter. Auf diesem Weg verdunstet ein Teil, und ein sehr geringer Teil kann außerdem in das Grundwasser versickern (im Falle tiefliegender Grundwasserstände).

Das infiltrierte Wasser kann oberflächennah als Interflow in die Gewässer fließen, in den Kapillaren gespeichert werden oder in die Grundwasserspeicher perkolieren¹. Das in den Kapillaren gespeicherte Wasser verdunstet direkt oder wird von Pflanzen aufgenommen, um anschließend transpiriert zu werden. Das Grundwasser fließt mit einer beträchtlichen Zeitverzögerung in die Gewässer oder perkoliert in größere Tiefen².

1 perkolieren: Versickern des in den Boden einfiltrierten Wassers in das Grundwasser

2 Von dort kann es nach längerer Zeit durch Quellen, artesischen Brunnen oder Geysire wieder auf die Erdoberfläche treten.

6.1.2. Teilprozesse in der Landphase

Die Teilprozesse in der Atmosphäre beschränken sich nur auf die Verdunstung und Evaporation, so daß ihre Beschreibung keine allzu große Schwierigkeiten bereitet. Anders sieht es in der Landphase aus, wo im Boden (einschließlich Pflanzen und Gebäude) Wechselwirkungen mit dem Wasser zahlreicher sind. Nach der Fließrichtung kann man die Prozesse in zwei Hauptgruppen einteilen:

- Prozesse in überwiegend vertikaler Richtung
- Prozesse in überwiegend horizontaler Richtung

Zu den ersteren sind die Prozesse Interzeption, Schneedeckenauf- und -abbau, Evapotranspiration, Infiltration in die ungesättigte Zone, Versickerung in die gesättigte Zone (Perkolation) und kapillarer Aufstieg zu rechnen. Zu den überwiegend horizontalen Wasserbewegungen zählen der Landflächenabfluß, der Zwischenabfluß (Interflow) und der Grundwasser- und Gerinneabflusses.

Daraus ergibt sich für die Modellierung die Notwendigkeit, diese Prozesse einzeln zu betrachten und im Modell miteinander zu verbinden. Die relative Lage der Prozesse zueinander und die Richtung der Wasserflüsse bestimmen die Sequenz der Abarbeitung bei der Modellierung.

6.2 Die Situation in Deutschland

Die erste Untersuchung der hydrologischen Prozesse in der BRD wurde 1965 im Rahmen eines UNESCO Projekts unternommen. Dabei entstand der "Hydrologische Atlas der BRD" (Holzbecher 1996), in dem eine Mengenwasserbilanz aufgestellt wurde. Die Wasserbeschaffenheit wurde aufgrund fehlender Grundlagen nicht berücksichtigt.

Zwar wird in dieser Arbeit nur das alte Gebiet der Bundesrepublik betrachtet, der hydrologische Atlas gibt aber trotzdem einen guten Überblick über die in Deutschland ablaufende hydrologischen Prozesse.

Die **Wassereinnahmen** kommen aus dem Niederschlag und von ober- und unterirdischen Zuflüssen aus den Nachbarstaaten. Der unterirdische Zufluß (Grundwasserzustrom) ist sehr gering gegenüber dem oberirdischen und ist in den Alpentälern und in den Einzugsgebieten der Flüsse zu erwarten.

Die **Wasserausgaben** kommen durch die Verdunstung sowie durch den Abfluß zum Meer und in die Nachbarstaaten zustande. Nennenswerte Grundwasserabflüsse kann es nur in Norddeutschland geben, da in Süddeutschland das unterirdische Abfließen nach Österreich durch einen kristallinen Querriegel bei Passau verhindert wird. Das Grundwasser sucht sich den Weg in den Norden über den Rhein und in kleinerem Ausmaß zum Elbegebiet hin. Die Geestrandmoore werden teilweise durch auftretendes Grundwasser erklärt, und am Niederrhein deuten die Schwankungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers auf einen möglichen Übertritt in das niederländische Maasgebiet hin.

Die Grundwasserabflüsse sind zwar, genau wie die Zuflüsse, sehr gering, ihre Bedeutung ist aber nicht zu vernachlässigen, da ein großer Teil des Gesamtabflusses durch das Grundwasser geht.

Ober- und unterirdischer Abfluß stehen in ständigem Austausch in Abhängigkeit von den Wasserständen des Grundwasser und der Flüsse, sowie von Geologie und Oberflächengestaltung (Geomorphologie, Vegetation,...).

Die Verdunstung ist die wichtigste Ausgabegröße, da mehr als die Hälfte der Wassereinnahmen aus dem Niederschlag verdunsten (Verdunstung einschließlich Interzeption, Transpiration, Verdunstung von freien Wasserflächen, Verdunstung durch Wasserverbrauch von Industrie, Gewerbe und Haushalten).

Der natürliche Wasserhaushalt wird durch die verschiedenen Nutzungsarten stark beeinflusst. Obwohl die Vegetation bzw. die Landwirtschaft große Wassermengen verbrauchen, entstehen dadurch nur geringe Schwierigkeiten, da die Vegetation den Wasserhaushalt flächenhaft gleichmäßig in Anspruch nimmt, während auf der anderen Seite der Wasserhaushalt im Industrie- und Städtebereich punktweise durch Wasserentnahmen viel stärker belastet wird. Die Nutzungsmöglichkeiten sind wiederum vom Wasserkreislauf abhängig. Die großen Flußwassermengen (die zum Abfluß gelangen) sind z.B. nur teilweise nutzbar, da der Abfluß der Oberflächengewässer erheblich schwankt. So müssen sich viele Bereiche der Wassernutzung auf die Niedrigwassermenge als begrenzenden Faktor einstellen. Die nutzbare Wassermenge wird außerdem durch die teilweise ungeeignete chemische, physikalische und bakteriologische Beschaffenheit des Wassers eingeschränkt, so daß durch konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten große Interessenskonflikte entstehen. Aus diesen Tatsachen ergibt sich das Ziel, das Wasser optimal zu nutzen, dabei aber den Naturhaushalt möglichst minimal zu belasten.

Nach der Studie "Zukunftsfähiges Deutschland" des Wuppertals Instituts (WAP 6/95) sind die wichtigsten Umweltprobleme, die das Medium Wasser direkt und indirekt betreffen:

- die Bodendegradation
- die Eutrophierung der Oberflächengewässer und Küstengebiete
- die Versauerung der Gewässer
- die Überbeanspruchung der Wasserreserven
- die Verschmutzung des Grundwassers.

Im Fall der **Bodendegradation** ist das Wasser nicht das direkt beeinträchtigte Medium, sondern vielmehr am Auftreten dieses Problems beteiligt. Wind- und Wassererosion sind die natürlichen Ursachen vom Bodenverlust. Aufgrund menschlicher Einflüsse (Entwaldung, Anbau von Monokulturen, intensive Bodenbewirtschaftung, etc) hat die Erosion drastisch zugenommen, wodurch die Sicherheit der Nahrungsmittelversorgung gefährdet wird.

Es ist zu bemerken, daß die Erosion selbst Quelle von anderen Umweltbelastungen ist, wie z.B. der Eutrophierung.

Ein erhöhter Nährstoffeintrag in die Oberflächenflächengewässer und Küstengebiete bewirkt die Eutrophierung dieser Gewässer. Die Erosion von Ackerflächen verursacht einen solchen erhöhten Nährstoffeintrag, so daß, wie bereits aufgeführt, die Bodenerosion eine der Eutrophierungsquellen ist. Andere Nährstoffeinträge, hauptsächlich die aus industriellen und privaten Abwässern (vorwiegend Nitrate und Phosphate), Nährstoff- Auslaugung (Nitrate, zum Teil infolge überhöhter Mineraldüngeranwendungen) und der Eintrag von Stickstoff-Verbindungen (NO_x, NH₃) sind weitere Verursacher des Problems.

Nach Daten des deutschen Umweltbundesamtes (Lehm et.al. 1996) waren im Jahr 1998 50% der Phosphateinträge und 40% der Stickstoffeinträge in den Fließgewässern auf punktförmige Einträge zurückzuführen. Davon stammte der größte Teil aus häuslichen Abwässern einschließlich industrieller Indirektleiter.

(Phosphateinträge: 10% industrielle Abwässer, 10% Regenwasserbehandlung, 30% häusliche Abwässer einschließlich industrieller Indirektleiter.

Stickstoffeinträge: 7% industrielle Abwässer, 3% Regenwasserbehandlung, 30% häusliche Abwässer einschließlich industrieller Indirektleiter.)

Demnach betragen die Phosphateinträge und Stickstoffeinträge in die Fließgewässer durch diffuse Einträge 50% bis 60%. Die größten diffusen Eintragsanteile entstanden bei Stickstoff über das Grundwasser und bei Phosphor durch die Erosion.

(Phosphoreinträge: 2% Niederschlag, Streu, 12% Einleitungen aus der Landwirtschaft, 3% Dränwasser, 31% Erosion und 2% über das Grundwasser.

Stickstoffeinträge: 3% Niederschlag, Streu, 3% Einleitungen aus der Landwirtschaft, 6% Dränwasser, 6% Erosion und 42% über das Grundwasser.)

Die **Versauerung** der Gewässer wird durch die Emission direkt (SO₂, NO_x) und indirekt (NH₃) durch säurebildende Substanzen verursacht.

Bei der **Beanspruchung der Wasserreserven** kommt dem Grundwasseranteil aufgrund seiner langen Regenerationsdauer (bis zu 10 000 Jahren für Tiefengrundwässer) eine besondere Bedeutung zu.

Die Wasserentnahme in Deutschland (Lehm et.al. 1996) betrug 1995 insgesamt 14,8 Mrd. m³. Davon stammten 7,0 Mrd. m³ aus Grund- und Quellwasser und 7,8 Mrd. m³ aus Oberflächenwassern und Uferfiltrat.

Hauptgrund der **Verschmutzung des Grundwassers** sind die Stoffeinträge aus der Landwirtschaft (Nitrat, Pestizide). Zu geringeren Teilen geht die Verschmutzung außerdem auf die Aus-

laugung versauerter Waldböden (Nitrat), industriell belasteter Böden und Siedlungsflächen (unter anderem Schwermetalle, flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC)) zurück.

6.3 Anforderungen an das Modell

Anhand dieser Kenntnissen über den Wasserkreislauf und dessen Belastungen in Deutschland kann man sich ein besseres Bild über die Anforderungen machen, die ein ökologisches Modell erfüllen muß, um eine nachhaltige Nutzung des Wassers zu simulieren. Unter Berücksichtigung einer erstrebten nachhaltigen Entwicklung muß sowohl die Wassermenge als auch die Wasserqualität geschützt werden, und zwar das Wasser der unterschiedlichen Gewässertypen (Grundwasser, Fließgewässer, stehende Gewässer). Aufgrund der Vielfalt an Umweltproblemen, die diese Gewässer betreffen, sowie ihrer unterschiedliche Ursachen und nicht zuletzt aufgrund der Größe des zu modellierendes Gebietes (regionale Unterschiede können nicht zur Genüge berücksichtigt werden), ist leicht zu erkennen, daß es nicht möglich sein, wird ein einziges Modell zu finden, mit dem alle Gewässertypen und ihre Umweltprobleme beschrieben werden können.

Die komplexe Vernetzung zwischen den Gewässern untereinander (Wasserkreislauf) und mit anderen Medien, vor allem mit den Boden, macht die Modellierung von einem so großen Gebiet wie der Bundesrepublik Deutschland viel zu aufwendig und komplex, da man alle Gewässer und alle Umweltprobleme gleichzeitig betrachten müßte. Es wäre vielleicht sinnvoll, das Gesamtgebiet in Gewässereinzugsgebiete zu unterteilen und Modelle für die in den verschiedenen Einzugsgebieten jeweils bedeutendsten Probleme auszuwählen.

6.4 Modelle des Wasserhaushalts

6.4.1. Modelltypen

Hydrologische Modelle können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterteilt werden. Eine sinnvolle Unterteilung ist zunächst die Differenzierung nach der Art des Wasserkörpers, der modelliert wird, da für diese verschiedene Gesetze gelten:

- Fließgewässermodelle
- Grundwassermodelle
- maritime Modelle
- Modelle für stehende Gewässer
- Modelle zur Steuerung von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen
- Niederschlagsabflußmodelle

Unter Berücksichtigung des Gegenstandes der Simulation, d.h. des Wassers selbst oder einer Komponente, die mit dem Wasser verknüpft ist, lassen sich diese Modelle weiter unterteilen in:

- Mengenmodelle (engl. flow)

- Wassergütemodelle (engl. transport)

Mengenmodelle berechnen das Strömungsfeld, das durch verschiedene Variablen bestimmt wird (für Grundwassermodelle Druck, Piezometerhöhe oder Geschwindigkeiten). Bei diesen Modellen ist also das Wasser Gegenstand der Modellierung. Liegt das Interesse an einer Komponente im Wasser, so wird diese im Strömungsfeld transportiert. Oft wird in der deutschen Literatur der Begriff Ausbreitung anstatt Transport angewendet, um deutlich zu machen, daß dabei eine Reihe von Prozessen behandelt werden (Advektion, Diffusion, Dispersion, etc)

6.4.2. Grundwassermodelle

Das breiteste Angebot von Modellen wurde im Bereich Grundwasser gefunden. Hier bieten viele amerikanische Institute ein sehr breites Spektrum an Modellen. Es sind 1-, 2- und 3-dimensionale Transport- und Ausbreitungsmodelle für kleine und große Gebiete zu finden.

MODFLOW: Modular 3-D finite-difference ground water flow model. Das Modell ist ein Transportmodell. Zu den Weiterentwicklungen zählen kompatible Programme unter anderem zur Schadstoffausbreitung, -berechnung (z.B. SUTRA) und Parameterabschätzung. Außerdem finden jährlich Einführungsveranstaltungen und Seminare zum Erfahrungsaustausch statt.

Die modulare Struktur des Modells erlaubt die Adaptation des Modells (Kopplung mit anderen Programmen). Es werden auch verschiedene MODFLOW Pakete angeboten, in denen die Programme schon gekoppelt sind.

Das Modell simuliert den stetigen oder unstetigen Wassertransport (Wasserbewegung) in einem irregulär geschichteten Medium, in dem Äquiphären betrachtet werden können. Der durch externen Streß bedingte Transport (Transport durch einem Flußbett, Evapotranspiration, Transport zu Drainagen, etc) kann ebenfalls simuliert werden. Die hydraulischen Parameter können für die verschiedenen Schichten räumlich voneinander abweichen und müssen nicht mit der Koordinatenrichtung übereinstimmen. Die nötigen Inputdaten sind die hydraulischen Parameter sowie Streß für jede Zelle des Rasters.

Das Modell basiert auf der Transport-Gleichung und löst diese mit der Methode der finiten Differenzen. Das umströmte Gebiet wird in Blocks unterteilt, in denen die Parameter als homogen betrachtet werden. Das Programm ist in Fortran 77 geschrieben.

6.4.3. Fließgewässermodelle

BASINS 2.0: Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources. Bei diesem Modell handelt es sich um ein auf integrierte Analyse der Wassereinzugsgebiets- und Wasserqualität basiertes Modell für Punkt- und diffuse Quellen.

Die Software verknüpft GIS Informationssystem- und USA Einzugsgebietsdaten. *(Die USA hat alle ihre Böden untersucht und "parametrisiert". In England wurde vom Institute of*

Hydrology in dem Projekt HOST -Hydrology of Soil Types- eine Klassifikation der englischen Böden vorgenommen. In Deutschland wurden bis jetzt meist die alten Werte aus der Literatur oder die amerikanischen Parameter für ähnliche Böden übernommen).

Ziel des Modells ist die Bestimmung der maximalen täglichen Einträge (punktförmige und diffuse) für ein Wassereinzugsgebiet. Es können hierbei einfache und komplexe Schadstoffe in unterschiedlichen Skalen analysiert werden.

Die Komponenten des Modells können in fünf Kategorien unterteilt werden. Unter die Kategorie *Daten* werden flächenverteilte Daten, Umweltüberwachungs- und Punktdaten subsumiert. Die Kategorien *Tools & Utilities* ermöglichen die Evaluierung in den verschiedenen Skalen. Hierzu zählen die Programme TARGET, ASSESS und Data Mining. In der Kategorie *Modell System* sind die drei hydrologischen Modelle enthalten und miteinander verknüpft. Die hydrologischen Untermodelle behandeln jeweils verschiedene Probleme. Das Untermodell NPSM schätzt die von der Bodennutzung verursachten diffusiven Einträge ab, während QUAL2E ein Wasserqualitäts- und Eutrophierungsmodell für diffuse und Punktquellen ist. Das letzte hydrologische Untermodell ist ein Transportmodell, mit dem die Verdünnung und der Zerfall im Fluß berechnet wird. Die letzte Kategorie ist der *Post Processor* für die Evaluierung und Analyse des Outputs.

6.4.4. Maritime Modelle

Es stellt sich vielleicht die Frage, ob maritime Modelle für die Simulation einer Nachhaltigen Entwicklung Deutschlands in Betracht kommen. Zwar grenzt Deutschland an die Küste der Nord- und Ostsee, beide Meere werden jedoch nicht nur von Deutschland wirtschaftlich genutzt, so daß eine Betrachtung nur von deutscher Seite nicht sinnvoll wäre. An dieser Stelle wird nicht näher auf diese Frage eingegangen, sondern das Modell ERSEM vorgestellt, daß wegen des modularen Aufbaus und der Vielzahl behandelter Prozesse als Vergleich oder Vorbild dienen könnte. *(Das Modell ist dadurch nicht einfach zu handhaben und "kann nur von eingearbeiteten Fachleuten" bedient werden, nach Meinung von G. Radach vom Institut für Meeresforschung an der Universität Hamburg. Das Modell ist noch nicht an ökonomische Komponenten gekoppelt worden, dies ist aber das langfristige Ziel.)*

ERSEM: Die Besonderheit an diesem Modell ist, daß es versucht den Gewässerkörper als Ökosystem zu modellieren. Es wird also versucht, alle in dem System stattfindenden Prozesse zu beschreiben. Das Modell simuliert dynamisch die biochemischen saisonbedingten Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Siliziumzyklen im pelagischen³ und benthalischen⁴ Nahrungsmittelnetz⁵ der Nordsee, hervorgerufen durch Sonneneinstrahlung, Temperatur und Transportprozesse.

3 pelagisch: in Seen und großen Binnenseen lebend (Pflanze, Tiere)

4 benthalisch: den Meeresboden als Lebensraum haben

5 Nahrungsmittelnetz: thropische Abhängigkeiten zwischen Organismen. Besteht aus mehreren Nahrungsketten.

Das Modell hat eine modulare Struktur, in der die einzelnen Module jeweils die biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse beschreiben. Die biologischen und chemischen Untermodelle sind ortsunabhängig (könnten auf andere Modelle übertragen werden unter der Voraussetzung, daß die physikalischen Zusammenhänge bekannt sind), während das physikalische nur für das Nordseegebiet gilt.

Die biologischen und chemischen Untermodelle behandeln die Prozesse in der pelagischen Zone (Wassersäule), die geschichtet oder durchgemischt sein kann und im Benthos (Meeresboden). ERSEM ist das erste Modell, das den Versuch macht, diese Bereiche miteinander zu verknüpfen. Die Bestandteile des biologischen Untermodells sowohl in der pelagischen Zone wie im Benthos werden in funktionelle Gruppen weiter unterteilt (Fische, Phytoplankton-Gruppe, etc), so daß das Wachstum der verschiedenen Organismen besser beschrieben werden kann. Fische haben hier eine Sonderstellung.

Die biologische Variablen der funktionellen Gruppen werden als Organische-Kohlenstoff-Einheiten ausgedrückt und die chemischen als N-, P- und Si-Einheiten.

Die räumliche Auflösung des Modells ist durch zehn nichtreguläre Boxen (ICES) bestimmt, von denen die fünf tieferen in zwei Schichten unterteilt sind: Oberflächen-Boxen (0-30 m) und tiefere Boxen (>30 m). Durch diese Unterteilung kann die thermische Schichtung im Sommer berücksichtigt werden.

Das Modell läuft unter der Software SESAME mit der Anwendung von Fortran-77 auf Unix-Maschinen. Es besteht aus einem Routinensatz, der von einem Menü-gesteuerten Programm aufgerufen werden kann, um Aufgaben wie automatisches Compiling, Linking und Loading von einem Modell auszuführen.

6.4.5. Niederschlag-Abfluß-Modelle

Eine Trennung in Niederschlag-Abfluß-Modelle und Fließgewässermodelle ist oft nicht einfach vorzunehmen, da die meisten Niederschlag-Abfluß-Modelle die Möglichkeit anbieten, Strömungen mit zu modellieren, und es wenige "reine" NA-Modelle gibt, die nur die Infiltration und den Abfluß des Regens simulieren. Außerdem gibt es auch wenige Fließgewässermodelle, die nur die Strömung im Gerinne berechnen; die meisten Modelle simulieren auch die Wechselwirkungen mit dem Boden und mit dem Niederschlag.

OWLS: Objekt Watershed Link Simulation. Obwohl dieses Modell für die kurzzeitige Simulation hydrologischer Prozesse für kleine bewaldeten Wassereinzugsgebieten konzipiert wurde, wird trotzdem kurz auf das Modell eingegangen, da die Chemie des Niederschlages einer der Hauptkomponenten des Projekts ist. Die Chemie im Wassereinzugsgebiet kann aber vom Modell noch nicht ausreichend simuliert werden.

Das Programm ist in C++ geschrieben, da eine objekt-orientierte Programmiermethode (OOP) für den Aufbau des Programms benutzt wurde. Die Methode hat das Ziel, die Addition anderer Methoden einfacher zu machen.

Das Programm kann in vier Untermodelle unterteilt werden: ein Modell zur Verarbeitung der Daten, ein geomorphologisches Modell, ein hydrologisches und ein Visualisierungsmodell. Das hydrologische Modell besteht aus verschiedenen Modulgruppen, die die unterschiedlichen hydrologischen Prozesse behandeln. Dabei ist es mit dem Modell möglich, Flüsse zu simulieren.

7. Luftbelastungsmodelle

7.1 Situation

Aufgrund der enormen Mengen der verbrannten fossilen Brennstoffe während der vergangenen Jahrzehnte stieg der Anteil des CO₂ in der Atmosphäre. Gleichzeitig sind die Anteile anderer Gase, vor allem in der Troposphäre, gestiegen (z.B. Methan). Die Zunahme der Methan- und Kohlendioxidsanteile an der Luftzusammensetzung stehen im Verdacht, für den sogenannten Treibhauseffekt mitverantwortlich zu sein. Dabei wird heute davon ausgegangen, daß es sich nicht nur um eine Änderung der Temperatur weltweit handelt, sondern daß sich durch nachfolgende Veränderungen das gesamte Weltklima verändert. Methan verringert daneben noch die vorhandene Menge atmosphärischer Hydroxylionen und schwächt damit die Fähigkeit der Atmosphäre, sich von Schadstoffen zu reinigen.

Ein weiteres Problem aus Sicht des Menschen ist die Verringerung des Ozonanteils in der sogenannten Ozonschicht, da so mehr UV Strahlen zur Erdoberfläche gelangen, die sonst schon in der Ozonschicht "abgefangen" wurden. Hier stehen die von den Menschen in unnatürlich großen Mengen freigesetzten FCKWs im Verdacht, die Bildung des Ozons zu bremsen.

Ebenfalls ein Problem ist der steigende Anteil des gesundheitsschädigenden Ozon in der Troposphäre, was größtenteils auf den Ausstoß von Ozon durch die Industrie zurückgeführt wird.

7.2 Modell RAINS

Das Modell RAINS (**R**egional **A**cidification/**A**ir Pollution **I**nformation and **S**imulation) wurde, beginnend mit dem Jahr 1984, an dem Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) entwickelt und liegt mittlerweile als mehrfach überarbeitete und erweiterte Version (RAINS 7.2) vor. RAINS versteht sich als umfassendes Analysewerkzeug für komplexe Umweltprobleme und erlaubt die Analyse und Bewertung alternativer Strategien zur Emissionsreduzierung und -kontrolle. Dabei konzentriert es sich auf die Bereiche Versauerung, Überdüngung und Ozon in der Troposphäre. Die implementierten Funktionen lassen sich in die folgenden Bereiche einteilen: Entstehen von Emissionen (mit Hilfe von Datenbanken über derzeitige und zukünftige Wirtschaftsaktivitäten, Energieverbrauch, etc.), Möglichkeiten ihrer Reduzierung und die dadurch entstehenden Kosten, Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre, ihre Deposition und ihre Auswirkung auf die Ökosysteme (Vergleich mit "Critical loads"). Das integrierte Optimierungsmodul ermöglicht dabei die Identifikation und Lokalisierung der kostengüns-

tigsten Reduktionsmechanismen, die zum Erreichen eines vorgegebenen Ziels (z.B. einer bestimmten Belastung der Umwelt) führen.

RAINS wird öfter als eines der besten Simulationsprogramme für Luftschadstoffe für Europa bezeichnet (siehe z.B. Einleitung zur Dokumentation im WWW von ICAM 2). Es diente als Grundlage für detaillierte Modelle in Finnland, Ungarn und der Ukraine und wird derzeit als Unterrichtshilfe an zahlreichen europäischen und nordamerikanischen Universitäten verwendet. Bis 1994 wurden mehr als 200 Kopien des Modells verkauft. Besonders stolz sind die Entwickler auf die Tatsache, daß 1994 Szenariorechnungen von RAINS als Basis für ein internationales Abkommen zur Reduzierung von SO₂-Emissionen, einem der Hauptverursacher des "sauren Regens", dienten.

RAINS kann im sogenannten "Scenario-Analysis-Mode" betrieben werden, oder auch im "Optimierungs-Mode". Im "Scenario-Analysis-Mode" wird der Weg der Emissionen von der Quelle bis zur Beeinflussung der Umwelt verfolgt. Das Modell berechnet für alternative Reduktionsstrategien die entstehenden Kosten und schätzt die zu erwartenden Umweltentlastungen ein. Im "Optimierungs-Mode" werden nicht nur die Kosten von Alternativstrategien berechnet, sondern es wird auch die kostengünstigste Lösung in Bezug auf eine vorgegebene Deposition ermittelt.

Um eine konsistente und umfassende Analyse der in RAINS betrachteten Bereiche Versauerung, Überdüngung und Ozon zu ermöglichen, verfolgt RAINS die Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und flüchtigen Kohlenwasserstoffe (VOC). Als Hauptemissionsquellen werden im Modell die Landwirtschaft und die Verbrennungskraftwerke (Energielieferanten) betrachtet, aber auch andere Emissionsquellen werden ebenfalls erfaßt.

Die räumliche Ausdehnung von RAINS umfaßt ganz Europa bis hin zum Ural, und der zeitliche Horizont reicht vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2010. RAINS nutzt 547 Zellen zu je 150 * 150 km (nur Landmasse). Eingaben müssen sich an diesen Zellen orientieren. (Sie entsprechen den Zellen des "EMEP long range atmospheric transport model".) Die Jahre 1986 bis 1996 dienen als Datenstamm, die Simulation erfolgt bis 2010 (längere Simulationen sind aber möglich). Als Ausgabedaten werden von RAINS "national cost curves", welche die entstehenden Kosten je nach anvisierter Emissionsreduzierung darstellen, angeboten. Ebenso werden die Belastungswerte für die einzelnen Zellen der geographischen Aufteilung nach gewählten Zeiträumen und Emissionsreduktionsstrategien angegeben und sind graphisch darstellbar.

Um mit dem Programm RAINS 7.2 zu arbeiten, benötigt man mindestens einen PC mit Windows 95.

7.2.1. Datenbanken in RAINS

Um ein möglichst realistisches Bild der aktuellen und erwarteten Umweltbelastung zu zeichnen, sind die folgenden Datenbanken und Szenarien in RAINS 7.2 integriert:

- Daten über den Energieverbrauch in Europa in den Jahren 1990 bis 2010, aufgelöst in über 38 Regionen, verschiedene Energietypen (Kohle, Elektrizität, Nuklearenergie, etc.) und 6 Wirtschaftssektoren
- Emissionsdaten, basierend auf dem CORINAIR Inventar der Europäischen Umweltbehörde (EEA) und weiteren nationalen Datenbanken
- Daten über agrarwirtschaftliche Entwicklungen bis zum Jahr 2010, basierend auf nationalen und internationalen Informationen
- die neuesten Angaben über Critical loads bezüglich Versauerung und Überdüngung (Stand 1996) vom niederländischen nationalen Institut für Volksgesundheit und Umwelt (RIVM)
- Quelle-Empfänger Daten für troposphärisches Ozon, berechnet vom EMEP/MSC-W Modell unter Berücksichtigung meteorologischer Daten von 1985-1995

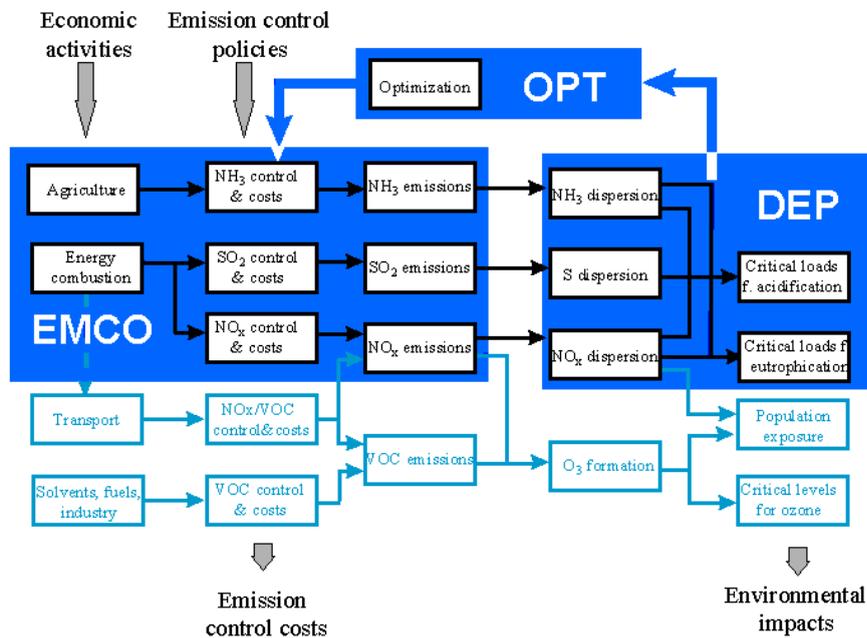
7.2.2. Szenarien

RAINS 7.2 umfaßt eine Reihe von offiziellen Energieszenarien, die dazu dienen, den Rahmen der Schadstoffemissionen unter möglichen Entwicklungen im Energiebereich abzuschätzen. Dazu gehören:

- das "Official Energy Pathway"-Szenario, das aus der UN/ECE Energiedatenbank für jedes europäische Land Daten über den jeweiligen zukünftigen Energieverbrauch von 1990-2010 bereithält
- Energieszenarien für die Jahre 1990-2010, die von der DG-XVII der Europäischen Kommission für die Mitgliedstaaten der EU entwickelt worden sind, wie z.B. das "Conventional Wisdom"-Energieszenario oder das "Low CO₂"-Szenario

Abbildung 5: Struktur von RAINS

The RAINS Model of Acidification and Tropospheric Ozone



(The shaded blue modules are not included in RAINS 7.2 and planned for 1998)

Bildquelle: http://www.iiasa.ac.at/Research/TAP/rains_europe/

7.2.3. Module

Die verschiedenen Untermodule von RAINS sind in die folgenden drei Hauptmodule (siehe Abbildung 5) zusammengefaßt: ein Emission-Kosten-Modul für SO₂-, NO_x- und NH₃-Emissionen und mögliche Reduktionsmaßnahmen (EMCO), ein Deposition- und Impact-Modul (DEP) und ein Optimierung-Modul (OPT). Zusätzlich ist noch eine ausführliche On-line Hilfe vorhanden.

“Emission Cost Module” EMCO

Das Emission-Kosten-Modul EMCO schätzt die aktuellen und zukünftigen Emissionslevel von SO₂, NO_x und NH₃ und die Kosten möglicher Maßnahmen zur Reduzierung dieser Werte ab. Die Möglichkeiten und Kosten der verschiedenen Reduktionsmaßnahmen werden in EMCO durch die jeweiligen technischen und wirtschaftlichen Charakteristiken repräsentiert. Für die Abschätzung des Reduktionspotentials einer Region oder eines Landes werden die bereits am meisten genutzten Reduktionsmaßnahmen berücksichtigt. Die individuelle Kostenberechnung basiert auf der allgemeinen Erfahrung im Einsatz von Reduktionsmaßnahmen und wird auf die region- oder länderspezifische Situation extrapoliert. Auf Grundlage der jetzigen Werte entsprechend der nationalen Statistiken und der vorhergesagten Entwicklungen in den Bereichen Ökonomie, Energieversorgung, Kraftstoffzusammensetzung (Schwefelgehalt), Landwirtschaft u.s.w.

werden die möglichen Kosten aus der Emissionskontrolle und der Emissionsreduzierung von 1990 bis 2010 abgeschätzt.

“Deposition and Critical Loads Assessment Module” DEP

Die Hauptaufgabe dieses Moduls ist die Abschätzung der abgelagerten Menge von Schadstoffen als Funktion der zugehörigen Emissionen. Die Emissionswerte werden vom EMCO Modul bezogen. Zur Berechnung des Transportes und der überregionalen Ausbreitung der Emissionen wurde das “EMEP long-range atmospheric transport model” genutzt, das die meteorologischen Gegebenheiten der Jahre 1986 bis 1996 auf Grundlage von 547 landbasierten Zellen (zu je 150 km * 150 km) zusammenfaßt. Anschließend werden diese Werte mit den “Critical loads” verglichen. “Critical loads” versuchen die Sensitivität von Ökosystemen bezüglich einzelner Umweltbelastungen zu quantifizieren. Bezüglich saurem Regen repräsentieren sie z.B. den Maximaleintrag an (sauren) Niederschlägen, der von einer Region langfristig toleriert werden kann, ohne Schäden an sensitiven Ökosystemen hervorzurufen. Die Deposition der Schadstoffe wird mit Hilfe von Übertragungsmatrizen, die auf Ergebnissen des atmosphärischen Langzeit-Transportmodells EMEP beruhen, berechnet. Mit dem DEP Modul können außerdem die für das EMEP Modell notwendigen geographischen Daten visualisiert und modifiziert werden. Geographische Daten und die Daten der *Critical Loads* können eingegeben werden (z.B. im dBase Format), solange sie zum EMEP Zellensystem passen.

“Optimization Module” OPT

Das Modul OPT identifiziert für eine vorgegebene Menge von Zieldepositionen die kostengünstigste Verteilung von Reduktionsmaßnahmen. Als Input sind die Angabe der Höhe der Zieldepositionen und die nationalen Kostenfunktionen für eine vorgegebene Auswahl von Energie- und Landwirtschaftsszenarien (aus EMCO) notwendig. Zusätzlich können politische Steuerungsfunktionen eingegeben werden, wie z.B. die Verpflichtung eines Landes zu gewissen Grenzwerten. OPT berechnet die optimale Emissionsreduktionsstrategie und die damit verbundenen Kosten für jedes Land und die Schadstoffdeposition für die optimale Lösung. Dabei wird beachtet, daß die betrachteten Stoffe unterschiedlich starke Auswirkungen auf das chemische Gleichgewicht in der Atmosphäre haben und daß die einzelnen Emissionsquellen unterschiedlich leicht bzw. schwer zu kontrollieren und zu beeinflussen sind. Es ist dabei möglich, die Betrachtung der Ablagerungswerte auf einzelne Zellen zu beschränken und dabei ggf. auch nur die Konzentrationen ausgewählter Stoffe zu jeder Zelle zu betrachten.

7.2.4. Weitere Integrationsziele für RAINS (in Realisierung)

- Die Integration des troposphärischen Ozons in die Simulation ist längerfristiges Ziel für RAINS.
- Kurzfristig realisiert werden sollen (und es stehen Pilot-Versionen zur Verfügung):

- • Die Simulation und Analyse für die Kosten und Optionen für VOC Emissionenreduzierung in Europa.
- • Die Simulation des Zusammenwirkens der Hauptemissionsstoffe (NO_x und VOC) und der regionalen Langzeitzonwerte (nicht-linear).
- • Optimierungsroutinen (nicht linear) für die Erstellung kosteneffektiver Strategien zur Reduzierung der Hauptemissionsstoffe für den troposphärischen Ozon.

7.2.5. Vor- und Nachteile von RAINS 7.2

Die große Anzahl namhafter Datenbasen, die gute Dokumentation inklusive des Online- Hilfe- Systems, die positive Resonanz durch andere Simulationssoftwareanbieter, sowie die relativ geringen Hardwareanforderungen sprechen für RAINS. Daß in RAINS 7.2 weder VOC's noch das troposphärische Ozon betrachtet werden, ist noch ein Manko von RAINS, das aber gerade beseitigt wird. Die Beschränkung auf die 547 Zellen zu je 150 * 150 km reine Landmasse in RAINS 7.2 kann zu einem Nachteil werden. Insgesamt gesehen erscheint RAINS 7.2 ein für den europäischen Kontinent sehr gutes Simulationsprogramm zu sein, um aus vorhandenen Emissionen die sich ergebenden Auswirkungen im Sinne der regionalen Versauerung und Nährstoffanreicherung zu prognostizieren und Abschätzungen zu den Wirkungen und Kosten von Emissionsreduzierungen zu erhalten.

7.3 Modell DYMOS

Entwicklungsziel von DYMOS war die Analyse und Simulation von Luftschadstoffausbreitungen mittels eines High Performance Computer Systems, um die Benutzer (sowohl Behörden, als auch Industrie) bei der Entscheidungsfindung und der strategischen Planung zu unterstützen. Als Emissionsquellen werden die Industrie, die privaten Haushalte und der Verkehrssektor erfaßt. Dieses System wurde an der GMD FIRST entwickelt.

Gegenstand der Analysen sind Wintersmog (hohe Konzentration chemisch stabiler Schadstoffe), Sommersmog (hohe Konzentration von Ozon und anderen Photooxidantien) und antigene Luftbelastung (hohe Konzentration von Substanzen mit Allergien auslösenden Effekten auf das menschliche Immunsystem), aber auch bestimmte Einzelkomponenten (z.B. Schwermetalle, Benzol, radioaktive Substanzen). Hierbei ist die Behandlung von Problemstellungen in verschiedenen Skalierungen genauso möglich (z.B. Ballungsgebiete, Länder, Europa), wie auch die Einbettung des DYMOS-Systems in großräumige globale Modelle.

DYMOS wurde bei der Anwendung zur Simulation der Ozonproduktion in Berlin und Brandenburg für den Zeitraum der FLUMOB-Meßkampagne (Juli 1994) des Berliner Senats und des Umweltministeriums Brandenburg erfolgreich validiert. Seitdem ist DYMOS schon mehr-

fach zum Einsatz gekommen (z.B. im Auftrag von Greenpeace im Raum München oder im Rahmen des Projektes ECOSIM im Großraum Athen).

7.3.1. Aufbau von DYMOS

Das DYMOS-System besteht aus einer Reihe von parallel implementierten Simulationsmodellen für Meteorologie, Transport und Luftchemie, sowie Datenbanken für Modelleingaben und Simulationsergebnisse. Des Weiteren gibt es eine grafische Benutzeroberfläche mit Datenvisualisierung. Die einzelnen Modelle können dank der Definition generischer Schnittstellen im DYMOS-System ausgetauscht werden. Ebenso können auch weitere Modelle in das DYMOS-System eingefügt werden.

Die notwendigen Simulationseingaben umfassen die topographischen Daten (Oberflächenrelief, Landnutzung), meteorologische Daten (Windstärken und Windrichtungen, Temperaturprofile, u.a.) und Emissionsdaten (Industrie, private Haushalte, Verkehr). Diese Daten können teilweise mittels bereitgestellter Tools aus topographischen Karten generiert werden.

In der Basisversion des DYMOS-Systems wurden das mesoskalische Eulersche Atmosphärenmodell REWIMET (REgionalWIndModell Einschließlich Transport, DLR Oberpfaffenhofen), das Luftchemiemodell CBM-IV (Carbon Bond Mechanism, U.S. Environmental Protection Agency) und das vertikal hochauflösende Eulersche Atmosphärenmodell (GESIMA, GEesthachter SIMulationsModell der Atmosphäre, GKSS-Forschungszentrum) miteinander gekoppelt. Durch die Definition generischer Schnittstellen in DYMOS ist es aber auch möglich, die einzelnen Modelle gegen andere auszutauschen oder weitere hinzuzufügen.

Implementiert wurde das DYMOS-System auf den, der GMD FIRST intern verfügbaren HPC-Plattformen (SUN-Cluster, MANNA, Parsytec GC PowerPlus). Prinzipiell kann das DYMOS-System auf jeden derzeit verfügbaren Hochleistungs(parallel)rechner portiert werden.

Mittels der Benutzeroberfläche des DYMOS-System kann der Anwender Simulationen starten sowie Zustandsvariablen (z.B. Windfelder) und Resultate (z.B. Stoffkonzentrationen) in Form von zwei- oder dreidimensionalen Darstellungen des Modellgitters anzeigen lassen. Ebenfalls möglich ist eine multimediale Ergebnisdarstellung, die dem Betrachter einen virtuellen Flug durch das Modellgebiet erlaubt, wobei Schadstoffkonzentrationen in Form von Wolken visualisiert werden.

7.3.2. Vor- und Nachteile von DYMOS

Das große Spektrum der Simulation in DYMOS (Wintersmog, Sommersmog, Untersuchung von Einzelkomponenten, Antigene) bei gleichzeitiger Skalierbarkeit über einen weiten Rahmen (von einzelnen Ballungsgebieten bis ganz Europa), sowie die Möglichkeit der Einbettung in großräumige globale Modelle sind eindeutige Vorteile von DYMOS. Die Austauschbarkeit von einzelnen Modellen, bzw. die Möglichkeit weitere Modelle in das DYMOS-System einzubin-

den, ist ebenfalls ein Vorteil von DYMOS. Auch die schon vorhandene grafische Oberfläche und multimediale Visualisierung der Simulationsergebnisse sind positiv zu bewerten.

Die Anforderungen an die Hardware im DYMOS-System mit Hochleistungsparallelrechnern können von Nachteil sein, sind aber leicht nachvollziehbar. Insgesamt gesehen, stellt DYMOS eine sehr leistungsfähige Simulationssoftware mit Erfassung eines sehr großen Spektrums an Luftschadstoffen (Sommersmog, Wintersmog und vielen weiteren Einzelsubstanzen, inklusive O₃, NO_x, VOC, CO, SO₂) dar.

8. Integrated Assessment Modelle

8.1 Einleitung

Integrated Assessment Modelle haben sich in Europa aus Einzelmodellen der Mensch- Umwelt-Relation, aus Fragestellungen der Versauerung und der ökologischen Forschung, und in den USA aus ökonomischen Modellen entwickelt. Während sich in der letzten Dekade die integrierte Modellierung eher stärker auf die Vorhersage globaler Klimaänderungen konzentriert hat, stehen im Mittelpunkt der heutigen Betrachtung Fragen des Populationswachstums und der Gesundheitserhaltung, des Managements von fossilen und erneuerbaren Energieressourcen, der Sicherung der Nahrungsmittel- und Frischwasserversorgung und schließlich Fragen der Stabilität der globalen biochemischen Stoffkreisläufe gegenüber anthropogen induzierten Störungen. Zu den bekannteren Vertretern zählen heute das IMAGE Modell (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect, RIVM, Niederlande), TARGETS (Tool to Assess Regional and Global Environmental and Health Targets for Sustainability, RIVM, Niederlande), ICAM (Integrated Climate Assessment Model, USA), Global 2100, PAGE, um nur einige zu nennen.

Zur Lösung des bei der Modellierung auftretenden Komplexitätsproblems verwenden moderne Integrated Assessment Ansätze eine hierarchisierte Modellstruktur. Die Basisebene wird dabei von diversen Teilmodellen gebildet, die regional relevante Prozesse detailliert simulieren. Die so gewonnenen hoch aufgelösten Daten werden von themenspezifischen Modellen, wie z.B. RAINS (Regional Acidification Information and Simulation, IIASA, Österreich) oder IMAGE, zur Beschreibung bestimmender Einzelprozesse verwendet. Auf dieser mittleren Ebene ist man in der Lage, generische Bestimmungsgrößen und Dynamiken in Metamodelle zu aggregieren, die an typischen Szenarien kalibriert werden. In der obersten Ebene der Modellhierarchie werden die isoliert gültigen Metamodelle durch die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Einzelprozessen zu übergeordneten Integrated Assessment Modellen, wie z.B. das TARGETS, verknüpft.

Grundsätzlich sollte sich das für das HGF-Vorhaben geplante Simulationssystem am Aufbau von Integrated Assessment Modellen orientieren. Allerdings sind Integrated Assessment Modelle aus zwei Gründen nicht direkt einsetzbar: Sie haben meist einen globalem Charakter und sind daher geographisch nicht genügend fein aufgelöst (IMAGE teilt z.B. die Welt in 13 Welt-

regionen ein), und sie zeigen meist einen monolithischen Ansatz. Dies erfordert eine klare Vorstellung von Anfang an, welche Module das Gesamtsystem beinhalten soll. Das geplante Simulationssystem soll sich aber unter Anpassung an die Ergebnisse der anderen Arbeitsgruppen sukzessive entwickeln, flexibel und leicht erweiterbar sein. Aus diesen problemspezifischen Anforderungen ergibt sich die Konsequenz, daß eine Implementation nicht durch ein monolithisches Gesamtmodell erreicht werden kann. Die geforderte Flexibilität und leichte Erweiterbarkeit legen einen modularen Aufbau nahe, der es für jede anwendungsspezifische Fragestellung gestattet, die benötigten Modelle einfach zu integrieren.

8.2 Das Modell IMAGE2.0

IMAGE2.0 (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect) ist ein prozeßbasiertes, multidisziplinäres, integriertes Modell zur globalen Simulation der Dynamik des Systems Gesellschaft-Biosphäre-Klima. Es modelliert (bis zu einer gewissen Tiefe) die Beziehungen zwischen ökonomischer Entwicklung (und hier speziell die in der Energiewirtschaft), Bevölkerungsentwicklung, den daraus resultierenden Veränderungen in der Landnutzung und Landbedeckung und der Generation von Treibhausgasen. Die Veränderungen in der Landnutzung bzw. Landbedeckung werden auf einem 0.5 Grad x 0.5 Grad Gitter berechnet, für die Modellierung der Emissionen als Funktion von Energieverbrauch und Industrieproduktion wird die Welt in 13 Weltregionen eingeteilt. Die Zeiteinteilungen (Schritte) liegen je nach Untermodell zwischen einem Tag und 5 Jahren. Es werden die Jahre 1970 bis 2100 betrachtet, wobei 1970 bis 1990 die Ausgangsdaten liefern. Das Modell simuliert den zukünftigen Energieverbrauch, berechnet daraus die zu erwartenden Emissionen bei der Energieerzeugung und addiert diese zu den anthropogenen und natürlichen Emissionen von z.B. CO₂, CH₄ oder N₂O aus der Landwirtschaft, Verbrennung von Biomasse, Feuchtgebieten, Tiermist etc. Die Emissionswerte werden in Konzentrationen von Treibhausgasen wie CO₂, CH₄, N₂O oder auch Ozon umgerechnet, und unter Berücksichtigung der Bedeutung der Weltmeere für das Klima und die CO₂-Zirkulation wird schließlich die zukünftige Temperaturverteilung der Erde bis zum Jahre 2100 simuliert.

IMAGE2.0 wurde vom RIVM, dem nationalen Institut für Volksgesundheit und Umwelt, Niederlande entwickelt, und gehört zum Typ der Integrated Assessment Modelle. Viele Teilkomponenten von IMAGE2.0 wurden auch in dem Integrated Assessment Modell TARGETS des RIVM verwendet. IMAGE2.0 wird zu Untersuchungen der Beziehungen und Rückkopplungen im System Gesellschaft-Biosphäre-Klima eingesetzt und dient damit der Beurteilung der wichtigsten Unsicherheitsquellen in diesem System. Weiterhin hilft IMAGE2.0 beim Aufzeigen von Wissenslücken, unterstützt Entscheidungsfindungsprozesse und kann zur Untersuchung des Einflusses von ökonomischen Entwicklungen bzw. des technischen Fortschritts auf Veränderungen des Klimas und damit zur Bewertung der Konsequenzen von Klimaverordnungen in den nächsten 50-100 Jahren eingesetzt werden.

Die Veränderungen in der Landnutzung bzw. -bedeckung, bedingt durch klimatische, demographische und ökonomische Faktoren, werden in der Berechnung des Emissionsstroms berücksichtigt

8.2.1. Der Aufbau von IMAGE 2.0

IMAGE 2.0 besteht aus 3 großen Komponenten, die ihrerseits aus mehreren Teilmodellen bestehen. So unterteilt sich IMAGE in eine Energie-Industrie Komponente (energiewirtschaftliches Modell, Modell für energiewirtschaftliche Emissionen, Industrieproduktions- und Industrieemissionsmodell und Modell für die restlichen Emissionen), eine Landwirtschaft- / Landnutzungs-komponente (Landwirtschaftsbedarfmodell, Vegetationsmodell, Landnutzungsmodell, Landkohlenstoffmodell und Landnutzungsemissionenmodell) und eine Atmosphäre-Ozean Komponente (Atmosphärenaufbaumodell, zonales Klimamodell (Atmosphäre), ozeanisches Klimamodell und biologisches und chemisches Modell für die Ozeane).

8.2.1.1. Energie-Industrie Komponente:

In der Energie-Industrie Systemkomponente ist die Welt in 13 Regionen (Canada, USA, Lateinamerika, Afrika, Westeuropa, Osteuropa, ehemalige Sowjetunion, Mittlerer Osten, Indien und Nachbarstaaten, China und Nachbarstaaten, Ostasien, Australien und Neuseeland, Japan) unterteilt.

Zu jeder dieser Regionen werden die Emissionsmengen der einzelnen Treibhausgase als Funktion von Energieverbrauch und Industrieproduktion simuliert. Die Unterteilung der Welt in "nur" 13 Regionen wird damit begründet, daß es zu schwierig ist, wirtschaftliche Faktoren mit demographischen (z.B. Handelsbeziehungen, technischer Fortschritt) gemeinsam noch nennenswert feiner aufzulösen.

Intern werden für jede Region der Bedarf an (End)Nutzwärme und -elektrizität sowie die notwendigen Kraftwerkskapazitäten und der Primärenergiebedarf berechnet. Mittels Emissionskoeffizienten werden die sich aus dem Energieverbrauch in jeder Region ergebenden Emissionswerte für CO₂, CH₄, N₂O und anderer Treibhausgase abgeleitet. Hinzu kommen noch die Emissionsmengen, die nicht direkt aus der Energieerzeugung resultieren (z.B. Kühlmittel und CO₂ der Zementindustrie), die in IMAGE 2.0 für jede Region extra simuliert werden.

Entscheidend beeinflusst wird die Energiewirtschaft im IMAGE-System von Veränderungen in der Bevölkerung und von Änderungen im Bruttosozialprodukt (mögliche Eingabeparameter).

8.2.1.2. Landwirtschafts- / Landnutzungskomponente:

Ausgehend von 1970 werden hier die Veränderungen in der globalen Landnutzung/Vegetation aufgrund klimatischer und wirtschaftlicher Faktoren simuliert. Die sich aus der Landnutzung/Vegetation ergebenden Effekte auf den Transport von CO₂ und anderen Treibhausgasen von der Biosphäre zur Atmosphäre hin werden miterfaßt.

Bei der landwirtschaftlichen Landnutzung wird der gesellschaftliche Bedarf derjenigen landwirtschaftlichen Produkte abgeschätzt, die einen deutlichen Beitrag zur Landnutzung liefern. Der wichtigste, dabei änderbare Parameter ist der Elastizitätskoeffizient für den Zusammenhang zwi-

schen Lebensmittelverbrauch (unter Berücksichtigung der Lebensmittelarten) und dem Pro-Kopf-Einkommen.

Die Erde ist dabei in dieselben 13 Regionen eingeteilt wie bei der Energie- Industrie-Komponente. Noch nicht berücksichtigt wird die Nutzholzproduktion als Wirtschaftszweig (trotz großem Landnutzungseffekt).

Für die generelle Simulation der Landbedeckung wird in IMAGE 2.0 mit einem weltumspannendem Gitternetz gearbeitet, dessen räumliche Auflösung 0.5 Grad Breite x 0.5 Grad Länge beträgt. Jede Gitterzelle ist durch Klima und Bodengüte charakterisiert. Über 8 Vegetations- bzw. Nutzpflanzenklassen wird die potentielle (d.h. max. mögliche) Landbedeckung simuliert und daraus die sich ergebene Produktivität (z.B. CO₂-Abbau) ermittelt.

Darüber hinaus werden auch die Änderungen in der Landbedeckung durch Abgleich des Bedarfs an regionaler Landnutzung (Industrie, Landwirtschaft, Bevölkerung) und Brennholz mit dem lokalen Vegetationspotential simuliert. Die Änderungen in der Landbedeckung beeinflussen die natürlichen Emissionen von Treibhausgasen, wobei die Rückkopplungseffekte auf die Landbedeckung im System berücksichtigt werden.

Insgesamt werden in der Landwirtschafts- / Landnutzungskomponente die Quellen, Senken und Reservoirs von CO₂ in der (terrestrischen) Biosphäre abgeschätzt, sowie die Emission von CO₂, CH₄, NO_x, N₂O, VOC für verschiedene Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen simuliert. Berücksichtigt werden dabei die Emissionen, die bei der Verbrennung von Biomasse (Wald, Weideland, etc.) oder bei der Tierhaltung (bzw. von natürlichem Tierbestand) entstehen, sowie die Emissionen von natürlichen Feuchtgebieten und bewässerten Reisfeldern. Wichtigste veränderbare Parameter sind die Emissionskoeffizienten.

8.2.1.3. Atmosphäre-Ozean Komponente:

In der Atmosphäre-Ozean Komponente werden die Anteile der Treibhausgase an der Atmosphäre und der Einfluß der Weltmeere auf den CO₂-Bestand der Luft und die Temperaturverteilung auf der Erde simuliert. Für die langlebigen Gase wird hierbei von einer relativen Gleichverteilung in der Troposphäre ausgegangen (z.B. CO₂, CH₄).

Um nicht durch immensen Rechenaufwand gebremst zu werden, werden in IMAGE 2.0 die Bewegungen innerhalb der Atmosphäre bzw. innerhalb der Meere nicht simuliert, sondern nur soweit wie nötig durch Parameter festgelegt (inklusive Wärmetransport). Dafür wird eine Vielzahl von Treibhausgasen betrachtet (CO₂, CH₄, N₂O, CFC's, O₃, CO, Cl₂ und freies OH). Über nichtlineare Verhältnisgleichungen werden auch die radiativen Anteile der Treibhausgase mitberücksichtigt. Der Anteil an OH in der Atmosphäre ist explizit festgelegt, genauso die Lebenszeit von N₂O und CFC's. Die Atmosphäre ist in Abschnitte mit Ausbreitungen von je 10 Breitengraden eingeteilt. Betrachtet wird meist nur die Troposphäre. Die Hauptparameter im Bereich Atmosphäre sind in IMAGE 2.0 die Wolkenhöhe und die Lichtdurchlässigkeit der Wolken.

Die Ozeane sind ebenfalls in Abschnitte zu je 10 Breitengraden und außerdem noch in Schichten mit einer Stärke von 400 m eingeteilt. Der Einfluß der Weltmeere stellt sich in IMAGE 2.0 nur durch die Aufnahme von CO₂ und Wärmenergie aus der Atmosphäre dar.

8.2.2. Ein- und Ausgabedaten von IMAGE 2.0

8.2.2.1. Eingabedaten:

- Wirtschaftsdaten (z.B. Bruttosozialprodukt, Landnutzung)
- Technologiedaten
- Demographiedaten
- Klimadaten
- Parameter: Elastizitätskoeffizient für den Zusammenhang Verbrauch/Pro-Kopf-Einkommen, Emissionskoeffizienten

8.2.2.2. Ausgabedaten:

- Emissionen
- Konzentrationen von CO₂, Treibhausgasen
- Klimaänderung
- Neue Landnutzungsstrukturen
- landwirtschaftliche Auswirkungen

8.2.3. Vor- und Nachteile von IMAGE 2.0

Die große Anzahl an betrachteten Emissionsgasen und der geringe Hardwareaufwand (z.B. Standard SUN - SPARC) von IMAGE 2.0 sind ein Vorteil dieser Simulationssoftware. Auch die schon vorhandene Nutzung durch Forschung und Politik in einem gewissen Rahmen sind positiv zu bewerten. Die Unterteilung der Welt in nur 13 Regionen bei der Betrachtung der Energiewirtschaft bzw. Landwirtschaft ist eher ein Diskussionspunkt, ob noch weiter verfeinert werden muß oder ob diese Aufteilung im gegebenen Kontext (Energie- bzw. Landwirtschaft) schon ausreichend ist. Die weitgehende Abstraktion der Vorgänge in der Atmosphäre (weg von der Simulation) machen das IMAGE - System als Simulationssoftware für die Atmosphäre ungeeignet. Das gleiche gilt für die Behandlung der Ozeane. Die noch fehlende Behandlung des Forstwirtschaftssektor in IMAGE 2.0 kann von Nachteil sein - für die Zukunft ist die Integration der Forstwirtschaft auf jeden Fall vorgesehen.

IMAGE 2.0 erscheint eine geeignete Simulationssoftware für die Abschätzung der Reaktionen im Wechselspiel Gesellschaft - Klima - Biosphäre.

9. Zusammenfassung

In diesem Bericht sollte untersucht werden, für welche Problemfelder der nachhaltigen Entwicklung Modellierungen sinnvoll sind, welche Modelle sich dafür eignen und welche (Weiter)Entwicklungen angemessen und durchführbar erscheinen. Fragen der Modellprämissen, der Datenproblematik und der Validität der Modellergebnisse verdienen dabei besondere Aufmerksamkeit, ferner sollte die Kompatibilität der Modelle mit der Struktur des im Projekt erarbeiteten Gliederungsschemas gewährleistet sein. Für die einzelnen Gebiete wie Wirtschaft, Forst, Landwirtschaft, Wasser und Luft wurde eine große Vielfalt an Modellen untersucht. Obwohl einige Modelle für sehr spezielle Systeme bzw. Szenarien konzipiert sind, lassen sich doch einige allgemeinen Prinzipien und Konzepte übernehmen.

Unter den Forstmodellen (Kapitel 4.) sind besonders die Projekte ECO-CRAFT und LTEFF hervorzuheben. Sie wurden speziell in einer Kooperation innerhalb der EU entwickelt und sind an die europäische Situation angepaßt. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht die Abhängigkeit des Wachstums der Bäume von einer globalen Temperatursteigerung und einem Anwachsen des CO₂-Gehalts. In der Landwirtschaft (Kapitel 5.) sind oft Teilmodelle für bestimmte Prozesse wie Nitratauswaschungen oder das Verbleiben von Pestiziden im Boden von Interesse. Des weiteren gibt es eine große Auswahl an Modellen für die verschiedenen Nutzpflanzen im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingsbefall. Die Modelle im Bereich Wasser (Kapitel 6.) beschäftigen sich vor allem mit dem Wasserkreislauf und der Qualität des Wassers. Die Bandbreite der Modelle reicht von Modellen für fließende Gewässer, über solche für stehende Gewässer bis hin zu maritimen und Grundwasser-Modellen. Im Bereich Luft (Kapitel 7.) geht es vor allem um Luftschadstoffe und deren Einfluß auf das Klima. Im Mittelpunkt steht dabei das Programm RAINS, welches als das beste Simulationsprogramm für Luftschadstoffe für Europa gilt. Das Modell DYMOSS, welches bei der GMD FIRST entwickelt wurde, ist ein spezielles Programm zur Ermittlung der Luftschadstoffverteilung. Durch dieses Modell ist eine lokale bzw. regionale Simulation möglich.

Im Kapitel 8. wird der letzte Teil der Aufgabenstellung, die Zusammenschaltung von Einzelmodellen zu einem Gesamtsystem, untersucht. Als Beispiel wird das integrierte Modell IMAGE2.0 betrachtet. Trotz einiger starker Vereinfachungen liefert es im Rahmen der geforderten Genauigkeit befriedigende Ergebnisse. Der einzige strittige Punkt ist die Aufteilung in 13 Weltregionen, da eine ungenügende Auflösung zu erwarten ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß es eine riesige Auswahl an verschiedenen Modellen gibt, die für den konkreten Fall ausgewählt werden müssen. Oft kann nur ein Experte des jeweiligen Fachbereichs bei einer konkreten Fragestellung entscheiden, welches Modell verwendet werden kann.

10. Literatur

- Jorgensen, S. E., *Fundamentals of Ecological Modelling* (2nd Edition). Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1994.

- Jorgensen, S. E., Halling-Sorensen, B., Nielsen, S. N., *Handbook of Environmental and Ecological Modeling*. Lewis Publishers, Boca Raton, London, New York, Tokyo, 1994.
- Bergh, J.C.J.M. van den..*Ecological Economics and Sustainable Development*, Cheltenham, Brookfield 1996.
- Birnbacher, D., Schicha, C.. *Vorsorge statt Nachhaltigkeit - Ethnische Grundlagen*, in: Erdmann, K.-H., Kastenholz, H.G., Wolff, M.(Hrsg.), *Nachhaltige Entwicklung: Zukunftschancen für Mensch und Umwelt*, Berlin, Heidelberg 1996, S. 141-156.
- Bossel. H.. *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*, Braunschweig, Wiesbaden 1992.
- Brundtland-Bericht.. *Unsere Gemeinsame Zukunft*, (Original: World Commission on Environment and Development: *Our common future*, Oxford, New York 1987.
- Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages. *Konzept Nachhaltigkeit - Fundamente für die Gesellschaft von morgen*, Bonn 1997.
- Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. *Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung: Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung*, Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, BT-Drucksache 13/11200 vom 26.06.1998.
- Faber, M., Jöst, F., Manstetten, R.. *Limits and Perspectives of the Concept of a Sustainable Development*, Paper der Universität Heidelberg, 1994.
- Faber, M., Proops, J.L.R.. *Evolution, Time, Production and the Environment*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York u.a. 1993.
- Grützner, R., Häuslein, A., Page, B.. *Softwarewerkzeuge für die Umweltmodellierung und Simulation*, in: Page, B, Hilty, M. (Hrsg.), *Umweltinformatik-Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung*, München, Wien, Oldenburg 1994, S. 157- 182.
- Grützner, R.. *Stand, Probleme und Aufgaben der Umweltsimulation*, in: Grützner, R.(Hrsg.), *Modellierung und Simulation im Umweltbereich*, Braunschweig, Wiesbaden 1997, S. 1-31.
- Grützner, R.:*Stand, Probleme und Aufgaben der Umweltsimulation*, in: Grützner (Hrsg), *Modellierung und Simulation im Umweltbereich*, Wiesbaden 1997, S 1-31.
- Kopfmüller, J.. *Sustainable Development: Hintergründe, Umsetzungsaspekte, Forschungsbedarf*, Arbeitsbericht der Abteilung für Angewandte Systemanalyse des Kernforschungszentrums Karlsruhe 1991.
- Majer, H., Vornholz, G.. *Sustainable Development: Zur Konzeption einer ökologisch tragfähigen Entwicklung*, in: WISU, *Das Wirtschaftsstudium: Zeitschrift für Ausbildung, Examen und Weiterbildung*, 7/1994, S. 626-632.
- Meadows, D.. *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*, Stuttgart 1972.

- Mohr, H.. Wieviel Erde braucht der Mensch? Untersuchungen zur globalen und regionalen Tragekapazität, in: Erdmann, K.-H., Kastenholz, H.G., Wolff, M.(Hrsg.), Nachhaltige Entwicklung: Zukunftschancen für Mensch und Umwelt, Berlin, Heidelberg 1996, S. 45-60.
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development, Sustainable Development: OECD policy approaches for the 21st century, Paris 1997.
- Rolf, A..Umweltinformatik als Gestaltungsforschung für eine „Nachhaltige Entwicklung“, in: Hilty, L.M., Jaeschke, A., Page, B., u.a.(Hrsg), Informatik für den Umweltschutz, Band 1, 8. Symposium, Marburg 1994, S. 77-80.
- Töpfer, K.. Von der Idealvorstellung zum Ziel, in: Danzer, B., Levi, H.W.(Hrsg.), Umweltverträgliches Wirtschaften: Von der Utopie zum operativen Ziel, Stuttgart 1995, S. 125-135.
- UBA - Umweltbundesamt. Auserwählte Ziele in den fünf nationalen Themenschwerpunkten, Anlage der Pressemitteilung 25/98, Bonn 28.04.1998.
- Umwelt. Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Entwicklung in Deutschland gesetzt, in: Bundesministerium, Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.), Umwelt, Eine Information des Bundesministeriums, Heft 4, 1997.
- Bossel, H. Simulation Dynamischer Systeme. Vieweg. 1992. 2. Auflage
- Bossel, H. Umweltdynamik. te-wi Verlag, 1985
- Bossel, H. TREEDYN3 Forest Simulation Model. Forschungszentrum der Waldökosysteme der Universität Göttingen. 1994
- Berdowski, van Minnen, van Heerden, van Grinsven, de Vries. SOILVEG, Deutsch Priority Programm on Acidification, National Institut of Public Health and Environmental Protection
- Chertov, O. Sustainable Development of Boreal Forests. 1996
- Sonntag, M. Klimaveränderungen und Waldwachstum. Verlag Mainz. 1998
- Nagel, J.BWIN Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Niedersächsische forstliche Versuchsanstalt, 1997
- Ecological Modeling, International Journal on Ecological Modeling and System Ecology, Vol. 83. 1-6,151-162, 197-205, 283-293
- van Minnen, Meijers. FORSOL, Forest-Soil Model National Institut of Public Health and Environmental Protection. 1994
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1997, Land- und Forstwirtschaft in Deutschland Daten und Fakten 1998 Home Page: <http://www.dainet.de/>
- ECOCRAFT: <http://www.ed.ac.uk/~cbarton/ecocraft/>
- Register of Ecological Models: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/server.html
- CAMASE Register of Agro-Ecosystems Models: <http://www.bib.wau.nl/camase/>

- Haase, M.; Raumbezogene Datenstrukturen für die hydrologische Modellierung; Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft; Aachen, Mainz, 1997.
- Holzbecher, E.; Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie; Berlin..., Springer, 1996
- Hydrologisches Atlas der Bundesrepublik Deutschland, 1979.
- H. Lehm, M. Steiner, H. Mohr; Wasser die elementare Ressource: Leitlinien einer nachhaltigen Nutzung; Berlin, Heidelberg, New York...; Springer Verlag, 1996.
- Niederschlag-Abfluß-Modelle für die Stadthydrologie. WAP 6/95
- Umweltdaten Deutschland 1998, Umweltbundesamt.
- <http://www.umweltbundesamt.de/udd/gew/index.htm>
- Zukunftfähiges Deutschland, Wuppertal Institut
- Agrarstandort Deutschland. Landwirtschaft heute. Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Bonn 1998, S. 33f.
- BML, Referat 313. Gute fachliche Praxis im Pflanzenschutz. Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Bonn 1998. <http://www.bml.de/>
- BML Referat 624. Forschungsrahmenplan 1997 - 200 Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Bonn 1998, S. 26f.
- Erzeugerrichtlinien für die Anerkennung der demeter-Qualität. Demeter-Bund e. V., Darmstadt 1998. <http://www.demeter.net/europe/germany/index.html>
- Großmann K., Koehler C. K. Faktendaten und Modelle im Bereich Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in der Bundesrepublik Deutschland 1994. ZADI-Zentralstelle für Agrardokumentation und -information, Bonn 1994. <http://www.dainet.de/meta/a-r-mode.htm#T>
- Mirschel, W., Wenkel K.-O. Agroecosystem models - tools for estimation of consequences of climate changes, 1998. <http://www.zalf.de/Mdd/setergagoek.html>
- Positionspapier der deutschen Natur- und Umweltschutzverbände zur EU-Agrarpolitik der Agenda 2000, Deutscher Naturschutzring Dachverband der deutschen Natur- und Umweltschutzverbände (DNR) e.V., Bonn Bad Godesberg 1998. http://www.dnr.de/Erklärungen/EU_Agrar.htm
- Schulzke, Dr. sc. agr Dietrich. EU - Forschungsprojekt: Regionale Richtlinien zur Unterstützung nachhaltiger Landnutzung durch Agra/Umweltprogramme der EU, Kapitel: EBBS - Ertragsbildung- und Bewertungssystem für Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen. <http://www2.fh-eberswalde.de/user/schulzke/eupro.htm>
- Quellen: http://www.iiasa.ac.at/Research/TAP/rains_europe/
- THE RAINS MODEL OF ACIDIFICATION Science and Strategies in Europe
- International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg, Österreich 1990 Kluwer Academic Publishers, ISBN 07923-0781-X (HB), ISBN 07923-0782-8 (PB)

-
- Mieth, P.; Unger, S.; Schäfer, R.-P.; Schmidt, M. Simulation der Ozonproduktion in Berlin und Brandenburg für den Zeitraum der FLUMOB-Meßkampagne (Vergleichende Betrachtungen und Szenarienrechnungen), Editor: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Berlin, 1995
 - Rufeger, W.; Mieth, P. The DYMOS system and its application to urban areas, Environmental Modelling & Software, Vol. 13, No. 3-4 (1998), pp. 287 - 294
 - Sydow, A. Modelling and Simulation of Air Pollution, Systems Analysis Modelling Simulation, 25 (1996), pp. 303-314
 - Sydow, A.; Lux, Th.; Mieth, P.; Schmidt, M.; Unger, S. The DYMOS Model System for the Analysis and Simulation of Regional Air Pollution, in: R. Grützner (ed.), Modellierung und Simulation im Umweltbereich, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 1997, pp. 209- 219
 - Sydow, A.; Lux, Th.; Rosé, H.; Rufeger, W.; Walter, B. Conceptual Design of the Branch-Oriented Simulation System DYMOS (Dynamic Models for Smog Analysis), Transactions of the Society for Computer Simulation International, Vol. 15, No. 3 (1998), pp. 95 - 100
<http://www.first.gmd.de/org/dymos.html>
 - IMAGE 2.0 - Integrated Modeling of Global Climate Change, edited by Joseph Alcamo with papers by The IMAGE Project, National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), the Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1994 ISBN: 0-7923-2860-4