

# Schlagwortbasierte Zugänge zu Umweltsimulationsmodellen

Thomas Seifert, Ralf Seppelt und Susanne Schwartz<sup>1</sup>

## Abstract

The use of simulation models in ecology and their application can be intensified, if a more easier access is realised. The following article presents an access to simulation models based on a thesaurus descriptor. The integration of description words within the thesaurus descriptor, model–meta–informations and data of simulation scenarios in a database set up the base for simulation pre–processing, interaction with geographic information systems and model–documentation. Consistent simulation runs can be prepared even for more complex simulation systems.

## 1. Einleitung

Systemanalyse, mathematische Modellbildung und Simulation im Umweltbereich ist ein wichtiger innovativer Baustein, zur Entwicklung nachhaltiger Nutzungen unserer natürlichen Ressourcen (Seppelt 1997a). Diese Werkzeuge führen in den klassischen Bereichen zu einer Reihe von Simulationsmodellen für die Beschreibung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Ökosystemen, zur Populationsdynamik, der Wirkung von Xenobiotika auf Organismen etc. (Grützner 1997).

Den Weg in die Praxis finden viele dieser in der Forschung entwickelten Modelle nicht. Der Einsatz dieser Modelle in der *universitären Lehre* hilft die Komplexität der untersuchten System darzustellen und zu erklären. Eine Anwendung in der *Umweltbildung* außerhalb des Campus findet in der Regel nicht statt.

Gründe für diesen Sachlage finden sich in den folgenden Charakteristika der Ökosystemmodellierung:

1. *Polysemie* (Schwartz et al. 1997): Der Zugang zu Modellierungsansätzen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Gleiche Begriffe können bei unterschiedlichen Herangehensweisen durchaus unterschiedliche Bedeutungen haben. Als Beispiel sollte der Begriff „Modell“ genügen.
2. Sowohl *mathematische* als auch *informatische Heterogenität* (Seppelt 1997b): Die verschiedenartigsten Aufgaben und Fragestellungen der Ökosystemmodellierung führen zu unterschiedlichsten Strukturen aus Mathematik (gewöhnliche oder partielle Differentialgleichungssysteme, Differenzgleichungen, stochastische Modelle, etc.) und Informatik (Stichworte: Geographische Informationssysteme, zelluläre Automaten, Entscheidungssysteme, Fuzzy–Logic etc.)

---

<sup>1</sup> Institut für Geographie und Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig, Tel.: (0531) 391-5608, FAX.: (0531) 391-8170, e-mail: R.Seppelt@tu-bs.de

3. *Integration in Geographische Informationssysteme* (Schwartz et al. 1997): Räumliche Bezüge in der Geoökologie machen eine Integration dieser unterschiedlichsten Ansätze in ein GIS unabdingbar. In einzelnen Fällen ist dies bereits erfolgreich durchgeführt wurden (Bormann et al. 1996). Aufgrund der Heterogenität der Modelle ist diese Integration immer wieder eine Herausforderung.
4. Dokumentationsmangel (Benz et al. 1997): Für eine Dokumentation von Simulationsmodellen ist die reine Beschreibung der Modellgleichungen und Algorithmen in der Regel nicht ausreichend. Nur ein intensives Studium der Gleichungen liefert ein Verständnis der zugrunde liegenden Wechselwirkungen. Auch hier sind für unterschiedliche Benutzer verschiedene Zugänge vonnöten. Interessieren den einen die mathematischen Strukturen, so kann für die andere die modellierten Wechselwirkungen (z.B. Räuber/Beute oder Konkurrenzsituationen) der richtige Einstieg sein. Der enormen Komplexität einiger Modelle wird man durch eine hierarchisch immer präziser werdende Modellbeschreibung gerecht.
5. Veröffentlichungsangst: Die Angst vor Fehlbedienungen und vor allem Fehlinterpretationen der Simulationsergebnisse ist sicher gerechtfertigt.

## 2. Motivation, Aufgabenstellungen und Anwendungen

Exemplarisch seien im folgenden zwei Projekte genannt, deren Bestandteil die Entwicklung von Simulationsmodellen oder -systemen war. In beiden zeigen sich die oben genannten Problemstellungen wie „Heterogenität“, „Komplexität“ und „Dokumentation“:

### 2.1 Agrar-Ökologisches Standortmodell

Das Standortmodell SIMULAT (Dieckrüger 1992) — entwickelt im Sonderforschungsbereich 179 „Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen“ — beschreibt die wichtigsten agrarökologischen Prozesse eines landwirtschaftlichen Standortes. Dieses sehr komplexe Modellsystem besteht aus einer Reihe von Teilmodellen, die voneinander wechselseitig abhängen. Zielgrößen sind die wichtigsten Prozeßvariablen eines agrarisch genutzten Standortes: Wasser- und Stoffverlagerung, stofflichen Reaktionen im Boden, Populationsdynamik von Mikroorganismen, Bestandesdynamik von Kulturpflanzen, etc.

Die folgenden Punkte führen bei diesem Modellsystem zu einem komplizierten Zugang:

- der nötige Zugriff auf raumbezogene Informationen (Bodenkarte, Landnutzungskarte),
- die Komplexität des Modellsystems, und die nicht immer intuitiven Wechselwirkungen zwischen Modellen (mit ihrer Gefahr eine Fehlbedienung),

- die daraus resultierende nicht zu unterschätzende Problematik der Simulationsvorbereitung.

Der Zugang zu einem derartigen Modellsystem kann nur durch die Ausnutzung von Meta-Modell-Information erfolgen um so eine weniger fehleranfällig Bedienung zu gewährleisten (Günther 1998, Seite 172ff.).

## **2.2 Niedermoormanagement**

Das BMBF-Verbundprojekt „Ökosystemmanagement für Niedermoore“ verfolgt zwei Zielstellungen. Zum einen den Schutz und die Entwicklung von Feuchtgrünland zur Etablierung und Sicherung von bestandesbedrohten Tier- und Pflanzenarten, sowie der Reduzierung des Torfschwundes. Zum anderen wird die Wiederherstellung von funktionierenden Niedermooren (Senken für umweltbelastende Stoffe und Gase) durch die Initiierung von Torfwachstum angestrebt. Diese Fragestellungen erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Hydrologie, Bodenkunde, Botanik, Zoologie und Sozioökonomie.

Besonders im Bereich der Modellierung ist eine Kopplung hydrologischer Grundwassermodelle, botanischer Ausbreitungs- und Futterqualitätsmodelle, faunistischer Habitateignungsmodelle und populationsdynamischer Modelle sowie sozioökonomischer Modelle unabdingbar, um geeignete Prognosen treffen zu können. Hier dient das vorgestellte System dazu zum einen mit der Heterogenität der Modelle als auch mit den unterschiedlichsten Zielvorstellungen der einzelnen Anwender den entsprechenden Zugang zum problemlösenden Modell zu finden.

## **3. Lösungsansatz**

### **3.1 Skizzen**

Den oben genannten Punkten zu begegnen ist Ziel des vorzustellenden Projektes: schlagwortbasierte Modellzugänge und Modelldokumentationen im Umweltbereich.

#### **3.1.1 Modellzugänge**

Grundlage zur Begegnung der Probleme „Polysemie“ und „mathematische Heterogenität“ ist die Modellierung des Zugangs zu Simulationsmodellen via Schlagwortsystem (Schwartz et al. 1997). Abhängig von Interessenlage des Anwenders, konkreter Fragestellung und Ziel einer Modellierungsaufgabe liefert dieses System nicht nur die entsprechende Dokumentation, wie beispielsweise: Projektziel, Untersuchungsregionen, betrachtete Arten, verwendete Modellierungsansätze, berechnete Szenarien. Darüber hinaus ist dies der Zugang zu

den verwendeten Modellen. Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Zugang zu Modellen des Wassertransports basierend auf der Richards-Gleichung.

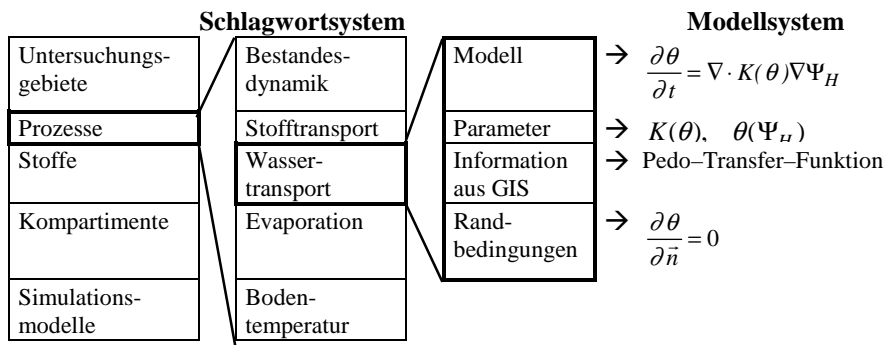


Abbildung 1: Modellzugang über Schlagwortsystem.

Fragestellung: Wie wird der Prozeß des Wassertransports modelliert?

Diese Modellzugänge sind nur zu realisieren, wenn *Meta-Information* über die verfügbaren Modelle ausgenutzt werden. Hat man (vgl. Abbildung 1) den Zugang zum problemlösenden Modell gefunden, so dient die Meta-Information über den Modellaufbau dazu, nötige Parameter und Anfangswerte sowie nötigenfalls mit diesem Modell verknüpfte Teilmodelle darzustellen und anzufordern.

### 3.1.2 Simulations-Projekte

An diesem Punkt sollte nun der Start eines Simulationslaufes erfolgen. Um dem Punkt „Fehlinterpretation“ zu begegnen, erfolgt hier eine Unterstützung durch bereits erfolgten Simulationen resp. Modell-Szenarien. Studien, die im jeweiligen Projekt durchgeführt wurden, dienen als Grundlage für weitere Simulation. Auf konkrete Szenariendefinitionen wird in der Dokumentation hingewiesen, so daß sich eine validierte Grundlage für weitere, neue Simulationsläufe ergibt.

### 3.1.3 Simulations-Modelle

Grundlage des Systems sind die im Forschungsprojekt entwickelten oder verwendeten Simulationsmodelle. Ziel des schlagwortbasierten Zugriffes ist dabei, daß keinerlei Reengineering an bestehenden Modellen vorzunehmen ist (kein „reinvention of the wheel“ (Benz et al. 1997)). Der Zugriff auf Modellparameter und Initialwerte erfolgt über Dateien oder Datenbanken, entsprechend dem Entwicklungsstand der zu integrierenden Simulationsmodelle. Im Rahmen der

Simulationsvorbereitung werden die Parameter entsprechend diesem Attribute dem Modells übergeben.

Abbildung 2 stellt schematisch die Struktur des Systems dar. Raumbezogene Information über die mittels GIS zugegriffen wird (Bodenkarte, Geologie, Landnutzung, u.s.w.) wird dem Simulationsmodell im System über die gemeinsame Datenbank zugänglich gemacht.

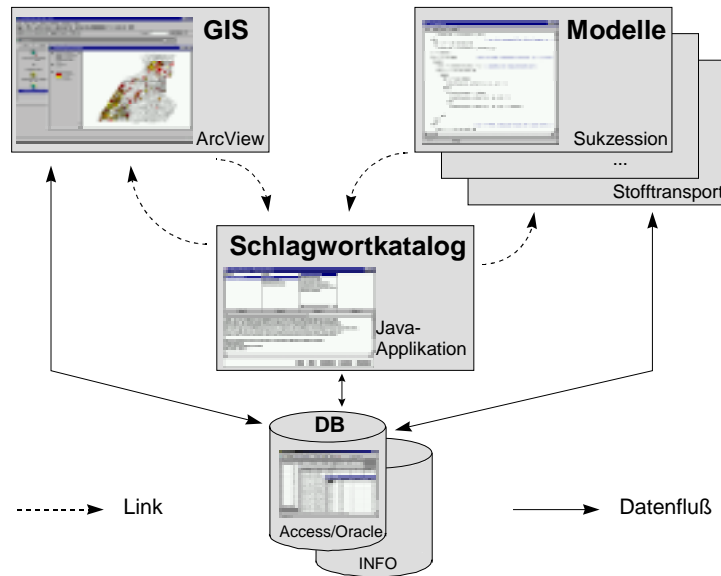


Abbildung 2: Struktur des Systems mit den Bestandteilen GIS, Simulationsmodelle/Modellsysteme, zugrunde liegende Datenbank und dem Zugangssystem „Schlagwortkatalog“

### 3.2 Datenmodellierung

Abbildung 3 stellt das EER-Diagramm der Systembestandteile Schlagwortkatalog, Meta-Model-Information und Szenarienkatalog dar. Auf einige Besonderheiten der Datenmodellierung soll im folgenden eingegangen werden.

### 3.2.1 Schlagwortkatalog

Der Schlagwortkatalog ist baumartig aufgebaut. Jedes Schlagwort besitzt ein oder kein übergeordnetes Schlagwort (funktionaler Beziehungstyp *SuperSW*). Die Wurzelschlagwörter bieten den Einstieg in den Schlagwortkatalog. Den Schlagwörtern sind Grafiken zugeordnet. Da die Grafiken speziell zu einem Schlagwort erstellt werden oder dies erklären, ist eine weitere mögliche Zugehörigkeit zu einem anderen Schlagwort nicht sinnvoll, daher die funktionale Relation *hat*.

### 3.2.2 Modell–Meta–Information

Diese bestehen aus einem Modell-, einem Parameter- und einem Initialobjekttyp. Mehrere Parameter und Initialobjekte gehören zu einem oder mehreren Modellobjekten (einwertiges objektwertiges Attribut *gehört*). Bei Modellen, die aus mehreren Teilmodellen bestehen, werden diese Teilmodelle über den Beziehungstyp *Voraus* miteinander verknüpft, d.h. ein (Teil)Modell kann andere (Teil)Modelle mit bestimmten Parametern als Voraussetzung haben (Beziehungstyp *Voraus* mit Attribut *Parameterwert*). Einem Parameterobjekt kann ein Initialobjekt zugeordnet sein, wenn zu dem Modellparameter auch entsprechende Modell–Initialwerte gehören. Initialobjekte sind, sofern es im Modell so realisiert ist, räumlich diskretisiert. Die entsprechende räumliche Zuordnung steht im Attribut *RaumElemTyp*.

### 3.2.3 Szenarien

Ein Szenario (Objekttyp *Szenario*) besteht aus mehreren Szenario–Modellen (Objekttyp *Szenariomodell*, mengenwertiges objektwertiges Attribut *Modelle*), die je eine Referenz auf die Modell–Meta–Informationen haben (einwertiges objektwertiges Attribut *ist*) und dem Gebiet, auf dem die Simulation läuft (Objekttyp *Gebiet*, einwertiges objektwertiges Attribut *hat*). Durch den Objekttyp *Berechnungseinheit des Modells*, der je zu genau einem Gebiet und Szenariomodell gehört (funktionaler Beziehungstyp *gehört zu*), ist es möglich, auf einem Gebiet mehrmals dasselbe Modell an verschiedenen Orten (Attribut *Bez.in Karte*) rechnen zu lassen (Gebietssimulation mit 2D-Modellen). Die Objekttypen *Unterelement1..3* stellen die räumliche, hierarchische Diskretisierung der Berechnungseinheit dar (für ein 3D-Modell: Ebene, Gerade, Punkt). Die vier Beziehungstypen *hat Wert* und der Beziehungstyp *hat* speichern die entsprechenden Initial- bzw. Parameterwerte (Attribut *Wert*) für dieses Modell in diesem Szenario.

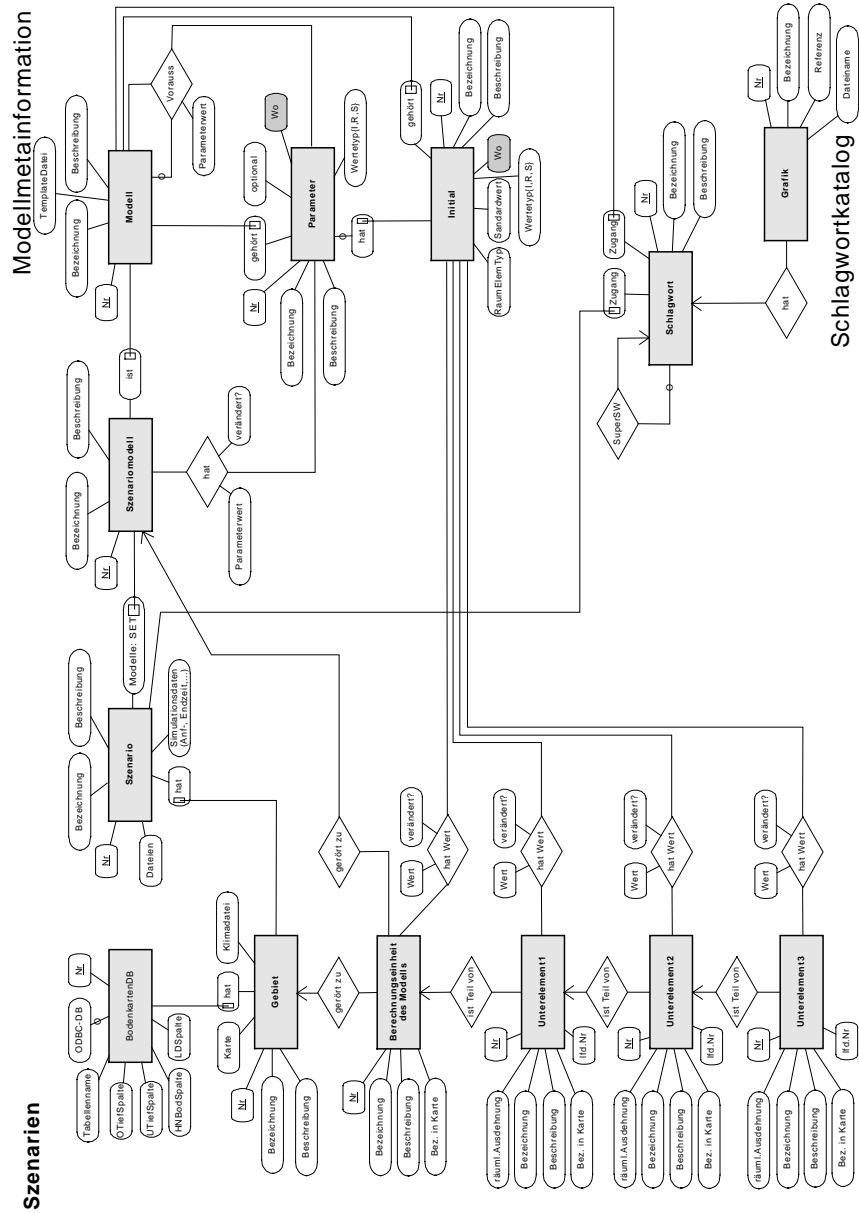


Abbildung 3: Schlagwortkatalog und dessen Anbindung in der Modelldokumentation mittels Meta-Information.

### 3.2.4 Datei/DB-Information der Eingabedaten — Modellzugang

Der Modellzugang von einem Schlagwort zu einem Modell, bzw. Szenario ist durch das einwertiges objektwertiges Attribut *Zugang* realisiert

Der *Wo*-Objekttyp ist das entscheidende Element zur Speicherung der Simulationsdaten, vgl. Abbildung 4. Falls die Eingabedaten eines Modells in eine Datei geschrieben werden müssen, so muß eine Template-Datei (Attribut *TemplateDatei* des Modells) angegeben werden. Die Datei enthält Platzhalter für Parameter und Initialwerte. Jeder dieser Parameter/Initial-Objekttypen hat über ein *Wo*-Objekt eine Relation zu seinem Platzhalterstring. Dieser wird in der Templatedatei durch einen *Sim.Wert* ersetzt. Sollen die Eingabedaten in eine Datenbank geschrieben werden, so hält das *Wo*-Objekt die Verbindung zwischen dem Parameter/Initial-Objekt und dem *DB-Attribut*. Jedes Attribut gehört zu einer *DB-Tabelle* (Beziehungstyp *gehört*), diese wiederum kann bis zu drei Schlüsselattribute besitzen (einwertiges objektwertiges Attribut *Schlüssel1..3*).

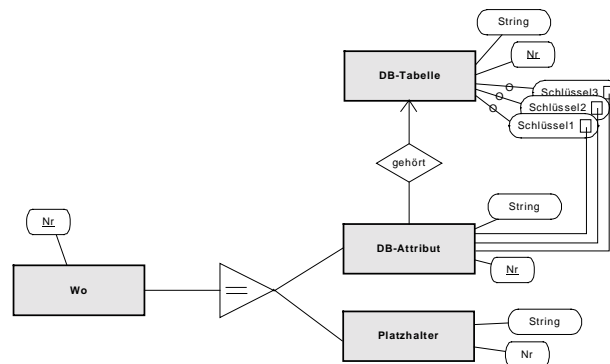


Abbildung 4: EER-Diagramm des Objektes WO

### 3.3 Implementation

Die Implementation von Schlagwortkatalog und Modellzugang erfolgt in der Programmiersprache JAVA. Plattformunabhängigkeit, Möglichkeiten der Integration in das WWW (Riekert et al. 1998) und Objektorientiertheit ließen JAVA als Sprache der Wahl erscheinen. Der Schlagwortkatalog, die Meta-Modellinformation und die Simulations-Szenarien sind in Datenbanken abgelegt (MS-Access unter Windows-NT/95, bzw. ORACLE unter UNIX) und stellen der Oberfläche und den Simulationmodellen ihre Inhalte via JDBC Schnittstelle zur Verfügung. Vorteile dieses Konzeptes ist die zentrale Datenhaltung und daraus bedingte einfachere Wartung. Damit vereinfacht sich auch die Einbindung von Simulationsmodellen in Geographische Informationssysteme. Die Vorbereitung von raumbezogenen



Informationen als Grundlage (Parameter- oder Initialwerte) kann innerhalb des GIS erfolgen und über die Datenbank dem Simulations-Projekt zur Verfügung gestellt werden, vgl. Abbildung 2.

#### 4. Lösungen und Anwendungen *en détail*

##### 4.1 Modellzugang am Beispiel der Wassertransportmodellierung

Die Darstellung des Systems erfolgt am klarsten an Hand des Beispiels aus Abbildung 1. Schon die Tatsache, daß die dort aufgeführte Richards-Gleichung in unterschiedlichen Dimensionen angewendet und gelöst werden kann, zeigt, daß nicht nur ein Simulationsmodell zur Lösung des Problems zur Verfügung stehen kann.

Zu den unterschiedlichen Modellierungsansätzen gehören zum Beispiel Bilanz-Modelle, Kompartimentmodelle und 2D/3D-Modelle, welche die genannte Richard-Gleichung lösen. Letztere werden öfters auch durch das verwendete numerische Lösungsverfahren charakterisiert (hier: Finite-Differenzen, Finite-Elemente, siehe Abbildung 5).

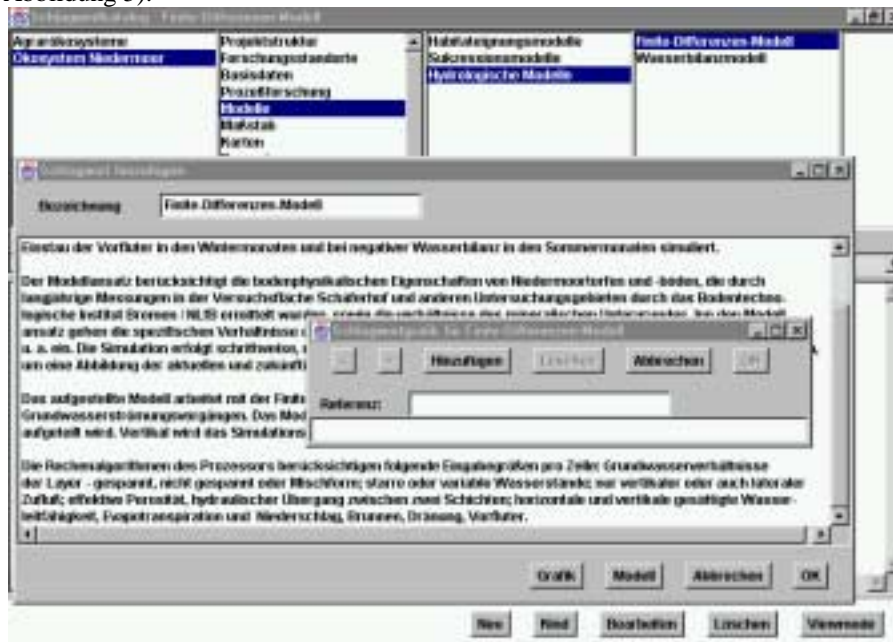


Abbildung 5: Oberfläche Schlagwortsystem für das Beispiel aus Abbildung 1 „Modellierung Wassertransport“. Hier die Darstellung der Bearbeitung von Schlagworten und Texten.

Somit liefert der Schlagwortkatalog durch seinen Modellzugang nicht nur eine Auswahl zum problemlösenden Modell, sondern darüber hinaus auch zum Simulationsmodell mit der problemadäquaten Komplexität.

Nur zeigt sich hier, daß damit auch die verschiedene Modelltypen mittels Meta-Daten verwaltbar sein müssen. Die Tatsache, daß es sich dabei um dynamische Prozeßmodelle und/oder statische Bilanzierungsansätze handeln kann, ist hier weniger problematisch. Viel entscheidender ist der Raumbezug:

## 4.2 Simulationsvorbereitung: Raumbezug

Im oben genannten Projekt „Niedermoormanagement für Niedermoore“ zeigt sich die Problemstellung des Umgangs mit unterschiedlichen Skalen und unterschiedlichen räumlichen Bezugsebenen in der Modellierung ausgezeichnet. Folgende Modelle bilden die Grundlage im Forschungsprojekt:

- *Sukzessionmodelle* (Grünlandzusammensetzung, Ausbreitungsmodellierung niedermoorspezifischer Pflanzenarten): modelliert durch zelluläre Automaten. Raumbezug: Raster, 2D, Teilgebiete.
- *faunistische Habitateignungsmodelle*. Raumbezug: naturräumliche Strukturen, 2D, gesamtes Untersuchungsgebiet.
- *Wassertransport* und Bilanz: modelliert durch Finite-Differenzen-Modell (3D), gesamtes Untersuchungsgebiet.

Im Gegensatz dazu ist das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Standortmodell nur anwendbar auf einen bezüglich Landnutzung und Bodeneigenschaften homogenen Standort (Punkt), betrachtet aber einer eindimensionale Bodensäule in die Tiefe (1D).

Die Verwaltung von Simulations-Szenarien für eine derartige Modellsammlung erfolgt mit dem in Abbildung 3 am linken Rand unter Bezugseinheit des Modells dargestellten Pfad, vgl. Abschnitt 3.2.3. Wird durch den Objekttyp *Berechnungseinheit des Modells* dieser Raumbezug explizit angegeben (Ökotop, 2D-Raster, 3D-FD-Gitter), so kann daraus die Struktur der möglichen Parameter und Initialwerte abgeleitet werden. So ergibt sich daraus eine Beschreibung beispielsweise von

- 3D-Parameterfeldern (Leitfähigkeiten) für ein Wassertransportmodell,
- 2D-Initialwerten für einen zellulären Automaten
- 1D-Tiefenprofilen für Nährstoffverteilungen eines Ökotops.

Erfolgt die Auswahl von Gebietsbereichen für eine Simulation aus dem GIS, so ist hier auch bekannt, ob das selektierte Gebiet durch ein Modell abgedeckt werden kann, oder ob das Geschehen in dem Gebiet nur durch mehrmalige Simulationsläufe, angewendet auf Teilflächen erfolgen muß.

### 4.3 Simulationsvorbereitung: Modell–Meta–Information und Modellkopplung

In welcher Weise unterstützt die Meta–Information bezüglich eines Simulationsmodells die Simulationsvorbereitung? Am Beispiel der Fragestellung einer Simulation von Bestandesdynamik typischer landwirtschaftlicher Kulturpflanzen soll dies dargestellt werden: Die Anfrage einer Simulation zur Bestandesdynamik führt zu folgenden Beziehungen aus der Meta–Informations–Datenbank (siehe ):

- Zum Teilmodell „Bestandesdynamik“ *gehören* Parameter und es *setzt voraus* die Teilmodelle
  - „Stoffdynamik“ für Nährstoff Nitrat/Ammonium (*Parameterwert*),
  - „Wassertransport“
  - „Transpirationsmodell“
- Zum Teilmodell „Stoffdynamik“ für Nährstofftransport *gehören* Parameter und es *setzt voraus* die Teilmodelle
  - „Stofftransport“
  - „Wassertransport“
- Zum Teilmodell „Stofftransport“ *gehören* Parameter und Initialbedingungen mit Raumbezug
- Zum Teilmodell „Wassertransport“ *gehören* Parameter und Initialbedingungen mit Raumbezug und *setzt voraus* die Teilmodelle
  - „Evaporationsmodell“
  - Klimadaten mit Niederschlag, Strahlung, Temperatur, etc.

Diese sehr vereinfachte und aggregierte Darstellung — eine Verbalisierung der in Abbildung 3 wesentlich detaillierter dargestellten Relationen — zeigt zweierlei:

Zum einen ist hiermit die Grundlage gegeben, die zur Verfügung stehenden Teilmodelle anzuwählen bzw. aufzurufen, den Anwender nach Parametern und Initialbedingungen zu fragen, bzw. diese aus vorhandenen Datenbeständen abzuleiten (z.B. Bodenkarte) und letztlich eine *konsistente* Simulation zu starten.

Zum anderen werden hier Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb des Modellsystems klar dargestellt. Diese Wechselwirkungen werden (zumindest sollten sie das) auch in der Modelldokumentation im Schlagwortkatalog dargestellt. Sie sind hier jedoch ein weiteres Mal, didaktisch in anderer Form aufbereitet, präsent.

## 5. Fazit

Zwei Schwerpunkte charakterisieren den Einsatz des beschriebenen Systems: Die Modell- und Projektdokumentation sowie geführte und mit Expertenwissen unterstützte Heranführung an Simulationsmodelle mit anschließender Simulationsvorbereitung. Die konkret vorliegende Implementation erlaubt eine zentrale Datenhaltung und Mehrplatzbenutzung. Die Integration in das Internet ist vorgesehen. Mit der schlagwortunterstützten Modelldokumentation wurde somit einen Beitrag zur Umweltbildung und Umweltdidaktik entwickelt.

## Literatur

- Benz, J., Hoch, R., Gabele, T. (1997). Documentation of Mathematical Models in Ecology – An unpopular Task. *Ecomod.* 1–8, Dezember 1997.
- Bormann, H., Conrad, R., Onigkeit, J., Seppelt, R. (1996): Modellanwendung: Simulation des Gebiets-Wasserhaushaltes für das Untersuchungsgebiet Nienwohlde sowie der Stickstoff- und Bestandesdynamik für das Untersuchungsgebiet Neuenkirchen. In: *Landschaftsökologie und Umweltforschung*, 24(1): 268-277.
- Dieckrüger, B. (1992). Standort und Gebietsmodelle zur Simulation der Wasserbewegung in Agrarökosystemen. *Landschaftsökologie und Umweltforschung*, Bd. 19. Institut für Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig.
- Günther, O. (1998). *Environmental Information Systems*. Springer
- Grützner, R. (1997). Stand, Probleme und Aufgaben der Umweltsimulation. Kapitel 1, S. 1–32. *Fortschritte in der Simulationstechnik*. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig
- Riekert, W.-F., Tochtermann, K. (1998): *Hypermedia im Umweltschutz*. 1. Workshop, Ulm, metropolis, Marburg
- Schwartz, S., Conrad R. (1997). Konzeption eines schlagwortbasierten Umweltsimulations- und -informationssystems zum Management von Ökosystemen. In F. Dollinger und J. Strobl, (Hrsg.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX – Beiträge zum GIS Symposium*, Salzburger Geographische Materialien, 26: 123–132.
- Seppelt, R. (1997a) Ansätze nachhaltiger Nutzung agrarischer Ökosysteme. In A. Kuhn und S. Wenzel (Hrsg.) *Simulationstechnik, Fortschritte in der Simulationstechnik*, S. 333–338. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig.
- Seppelt, R. (1997b) Strategie für eine nachhaltige Landwirtschaft — Anwendung der Kontrolltheorie auf langfristige bioökonomische Prozesse. *Landschaftsökologie und Umweltforschung*, Bd. 26. Institut für Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig.