

Die Entwicklung eines Computer-Werkzeugs für Naturschutz und Landschaftsplanung

Helmut Lorek¹, Karin Frank², Frank Köster¹, Ute Vogel³, Volker Grimm², Christian Wissel² und Michael Sonnenschein¹

Abstract

To transfer knowledge of risk analysis of metapopulations into praxis UFZ started a joint project with OFFIS with the objective to develop a computer tool which gives aid to decision making in nature reserve. The design of the resulting simulator, which is based on a generic metapopulation model, is oriented to support users without intense computer application or modelling knowledge. Hence, it offers a comfortable user interface and enables a very flexible method of working; its follow up version, which will be completed in autumn 1998, extends this assistance by providing a guided tour through the modelling and evaluation process. In addition to this, it will automatically document each result and consequently ensure its reproducibility. Another main emphasis in the design of the tool was laid on the feasibility of creating comparability studies by combining alternative scenarios to one experiment and offering suitable evaluation operators.

1 Einleitung

Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts WESP (**W**orkbench for the **M**odelling and **S**imulation of the **E**xtinction of **S**mall **P**opulations) zwischen dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (UFZ) und dem Oldenburger Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Informatik-Werkzeuge und -Systeme (OFFIS) entstehen Computer-Werkzeuge für den praktischen Einsatz im Naturschutz und der Landschaftsplanung. Ziel der gemeinsamen Arbeiten ist es, das am UFZ vorhandene theoretische Grundlagenwissen im Bereich der Modellbildung und Analyse population-ökologischer Systeme für den praktischen Naturschutz und die Landschaftsplanung verfügbar zu machen. Dazu werden auf der Basis der am UFZ entwickelten Modelle und Analysemethoden am OFFIS graphisch-interaktive Simulatoren entwickelt, die

¹ Oldenburger Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Informatik-Werkzeuge und -Systeme (OFFIS), Escherweg 2, 26111 Oldenburg, Internet: <http://www.offis.uni-oldenburg.de>.

² Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (UFZ), Sektion Ökosystemanalyse.

³ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fachbereich Informatik.

es auch Benutzern ohne tiefere „Computerkenntnisse“, erlauben, Gefährdungsanalysen existierender Populationen durchzuführen, sowie alternative Eingriffsszenarien zu deren Schutz zu evaluieren.

In diesem Artikel wird ein konkretes Simulationswerkzeug vorgestellt, das zur Risikoanalyse von Metapopulationen dient und als Entscheidungshilfe für Naturschutz und Landschaftsplanung konzipiert ist. Dazu wird zunächst kurz auf die allgemeine Metapopulationsproblematik eingegangen, die sich aus der zunehmenden Fragmentierung natürlicher Lebensräume für einzelne Arten ergibt. Im Anschluß werden Anforderungen an das Werkzeug aus der Sicht seines praktischen Einsatzes formuliert und das allgemeine, dem Simulator zugrundeliegende mathematische Modell erläutert und bewertet. Im letzten Teil wird dann die wesentliche Funktionalität von META-X sowie der zur Zeit in der Entwicklung befindlichen Nachfolgeversion META-XL vorgestellt.

2 Modelle als Entscheidungshilfe für Naturschutz und Landschaftsplanung

Besondere Habitatansprüche gepaart mit der Heterogenität der Landschaft können zur natürlichen Fragmentierung des Lebensraums von Arten führen. Solche Arten verfügen über spezielle Lebensstrategien, die es ihnen ermöglichen, als *Metapopulation* zu überleben - einem Konzept, das von Levins (1969) entdeckt wurde: Subpopulationen leben in isolierten Habitatsinseln (Patches) mit einem gewissen Extinktionsrisiko. Durch einzelne über Korridore wandernde Individuen können leere Habitate jedoch wiederbesiedelt und Extinktionen somit kompensiert werden.

Andererseits haben anthropogene Einflüsse zu massivem Habitatverlust und wachsender Isolation und damit zu einer zunehmenden Gefährdung des Artenspektrums geführt. Metapopulationen sind von diesen Eingriffen gleich doppelt negativ betroffen: während das lokale Extinktionsrisiko weiter steigt, nimmt die Chance auf Wiederbesiedlung ab. Wirksame Naturschutzstrategien sind daher nötig, die es erlauben, dieser negativen Entwicklung Einhalt zu gebieten oder durch gezielte landschaftsverändernde Maßnahmen aktiv entgegenzuwirken.

Insbesondere bei Metapopulationen gibt es eine Vielzahl von Faktoren (jedes Patch, jeder Korridor), die Gegenstand einer solchen Veränderung sein können. Andererseits hängt es von der individuellen Wahrnehmung der Organismen ab, welchen Effekt eine Maßnahme auf das Überleben der betroffenen Art hat. Deshalb sind Entscheidungshilfen nötig, die es dem Planer erlauben, aus einer Palette von Eingriffsalternativen diejenige Variante zu bestimmen, die den größten Vorteil (Artenschutzprogramme; Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen) oder den geringsten Nachteil (Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP)) für das Überleben einer Metapopulation mit sich bringt.

In diesem Zusammenhang können mathematische *Modelle* nützlich sein. Modelle erlauben eine Quantifizierung der Gefährdung (Burgman *et al.* 1994; Wissel *et al.* 1994), die Simulation von alternativen Eingriffsszenarien (Verboom *et al.* 1994; Frank 1998) und deren artspezifische Bewertung (Drechsler und Wissel 1997). Ein Planer wird allerdings weder die Zeit noch die Mittel haben, die nötigen Modelle selbst zu erstellen, sondern auf Implementationen existierender Modelle angewiesen sein. Folglich kommt es zunächst darauf an, ein geeignetes Modell zu finden, das auf die Bedürfnisse von Anwendern im Bereich Naturschutz und Landschaftsplanung zugeschnitten ist.

3 Grundsätzliche Anforderungen an ein „praktisches,, Modell

Bevor ein Software-Werkzeug zur modellbasierten Analyse im praktischen Naturschutz und in der Landschaftsplanung eingesetzt werden kann, sind einige grundsätzliche Anforderungen an das zugrundeliegende Modell, die auszuwertenden Größen und die durchzuführenden Analysen zu stellen.

Die richtige Modellstruktur

Es versteht sich von selbst, daß nicht für jede neue Situation neue Modelle und neue Werkzeuge entwickelt werden können. Gesucht ist daher ein Modell, das auf ein breites Spektrum von Situationen (Arten, Landschaften, Eingriffsalternativen) anwendbar ist und auf jeden konkreten Fall spezifisch angepaßt werden kann. Im Zusammenhang mit Metapopulationen läßt sich dieser scheinbare Widerspruch lösen, indem ein Modell zugrunde gelegt wird, das sich auf die Hauptphänomene von Metapopulationen (Extinktion/Kolonisation von Patches, Stochastizität, räumliche Heterogenität) konzentriert. Die dazugehörigen Parameter können dann entweder (a) direkt aufgrund statistischer Befunde oder (b) mit Hilfe von Standard-Submodellen oder (c) einem Mix von beidem konkretisiert werden. Auf diese Weise wird eine hohe Flexibilität erreicht und die Eingabe bestmöglich an die vorhandene Information angepaßt (Doak und Mills 1994).

Die richtigen Auswertegrößen

Ein Modell wird nur dann von praktischem Nutzen sein, wenn es Auswertegrößen anbietet, mit deren Hilfe die interessierenden Managementfragen beantwortet werden können. Im Zusammenhang mit Metapopulationen muß man drei Typen von Fragestellungen unterscheiden. Der erste Typ befaßt sich mit der Frage nach der Überlebensfähigkeit der gesamten Metapopulation. Ein zweiter Themenkreis betrifft den Wiederansiedlungserfolg in einem derzeit leeren (z.B. neugeschaffenen) Habitat. Der dritte Komplex behandelt die Erholbarkeit der Metapopulation nach kurzzeitiger

Störung. Zu jedem Fragentyp gibt es ganz spezielle Auswertegrößen, die mit Standardverfahren aus den Modellsimulationen gewonnen werden können.

Die richtigen Auswerte-Experimente

Die richtige Modellstruktur und die richtigen Auswertegrößen sind allein noch kein Garant für sinnvolle Modellergebnisse. Ein Modell wird erst dann effektiv zur Entscheidungsfindung beitragen, wenn die richtigen Größen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Der praktische Wert eines Modells steht und fällt also damit, ob es dem Modellierer gelingt, einen Satz von Auswerte-Experimenten zusammenzustellen, der den typischen Problemstellungen der zukünftigen Anwender entspricht. Im Zusammenhang mit Naturschutz und Landschaftsplanung kommt es, wie erwähnt, vor allem auf die *vergleichende Bewertung von Szenarien* (Eingriffsalternativen) an. Folgende Experimente sollten daher vom Werkzeug unterstützt werden:

Einfacher Szenarienvergleich (eine Auswertegröße)

Alle Szenarien werden in ihrer Wirkung auf eine Auswertegröße verglichen. So kann die Variante bestimmt werden, die der jeweiligen Zielvorstellung am nächsten kommt.

Szenarienvergleich für unterschiedliche Auswertegrößen

Hiermit kann überprüft werden, inwieweit die Bewertung der Szenarien davon abhängt, welche Auswertegrößen und damit Schutzziele zugrunde gelegt wurden. Unterschiedliche Ergebnisse deuten an, daß eine Abwägung der Zielvorstellungen unumgänglich ist.

Szenarienvergleich für unterschiedliche Zeithorizonte

Mit dieser Option kann ermittelt werden, inwieweit es vom betrachteten Zeithorizont abhängt, wie stark die Szenarien in ihrer Wirkung auf eine Auswertegröße voneinander abweichen. Damit wird deutlich, wie nachhaltig eine vermeintlich günstigste Variante ist.

4 Das zugrundeliegende Metapopulationsmodell

Im folgenden wird das dem Simulationswerkzeug META-X zugrundeliegende Metapopulationsmodell vorgestellt und analysiert.

Das Hauptmodell

Systeme, deren Dynamik durch eine zufällige Abfolge diskreter Zustände gekennzeichnet ist, lassen sich mit sogenannten Markov-Modellen beschreiben (Nisbet und Gurney 1982). Der Input dieser Modelle setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen: (a) der Gesamtheit aller Zustände, (b) einer Zeitskala für die Gesamtdynamik, die sich an der Zeitskala des schnellsten Teilprozesses orientiert, und (c) der Gesamtheit

aller Übergangswahrscheinlichkeiten p_{AB} , mit denen das System innerhalb des nächsten Zeitschrittes von Zustand A in Zustand B übergeht.

Auch das META-X zugrundeliegende Modell ist vom Markov-Typ (Frank und Wissel 1994). In diesem Modell ergibt sich der Zustand z einer Metapopulation aus den Zuständen z_i ihrer n Patches ergibt, was durch entsprechende n -Tupel $z = (z_1, \dots, z_n)$ beschrieben wird. Jedes einzelne Patch wird dabei entweder als „leer,, ($z_i=0$) oder als „besetzt,, ($z_i=1$) angesehen, so daß die Metapopulation insgesamt 2^n verschiedene Zustände z annehmen kann. Zustandsänderungen erfolgen nur im Zuge von Kolonisations- oder Extinktionsprozessen, wobei berücksichtigt wird, daß die Subpopulation eines momentan besetzten Patches i innerhalb des nächsten Zeitschrittes mit Wahrscheinlichkeit b_{ij} ein leeres Patch j kolonisiert und mit Wahrscheinlichkeit v_i ausgelöscht wird. Welcher Prozeß tatsächlich als nächstes abläuft, wird dann per Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Auf diese Weise läßt sich die Dynamik einer Metapopulation über beliebige Zeiträume simulieren.

Analysen zeigen, daß alle Modellsimulationen von prinzipiell gleichem Verhalten sind: (a) Der Zustand $(0, \dots, 0)$, in dem alle Patches und damit die gesamte Metapopulation ausgestorben sind, ist absorbierend, d.h. einmal erreicht, wird er nie wieder verlassen. (b) Jede Metapopulation stirbt entweder sehr schnell aus oder erreicht den sogenannten *etablierten* Zustand, der durch typische Fluktuationen in den Besetzungszuständen der Patches und eine konstante Extinktionsrate gekennzeichnet ist.

Integrierte und externe Submodelle

Bei der Wahl der Submodelle ist insbesondere darauf zu achten, daß sie so strukturiert sind, daß allein durch Parameterinitialisierung eine breite Palette von Managementmaßnahmen simuliert werden kann. In Zusammenhang mit Metapopulationen sind vor allem Maßnahmen relevant, die auf Veränderungen der Patch-Konfiguration, des Vernetzungsmusters (wo existieren Korridore?) oder der lokalen Bedingungen innerhalb der einzelnen Patches abzielen. Was ihre Umsetzung in einem Werkzeug angeht, muß zwischen integrierten und externen Submodellen unterschieden werden. In META-X ist beispielsweise ein landschaftsbezogenes Submodell (Frank 1998) für die Kolonisationswahrscheinlichkeiten b_{ij} integriert. Dieses Submodell geht davon aus, daß die Kolonisation eines leeren Patches immer das Ergebnis von Emigration, Ankommen und Etablierung einer neuen Subpopulation ist. Außerdem wird angenommen, daß sich die Emigranten gleichmäßig auf die anliegenden Korridore verteilen und keine Wanderung außerhalb von Korridoren erfolgt.

Diese Annahmen spiegeln sich letztlich in folgendem Modellansatz wider:

$$b_{ij} = \left(E_i \cdot \frac{A_{ij}}{\sum_{k \neq i} A_{ik}} \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{d_1}\right) \right) / I_j,$$

wobei E_i die mittlere Zahl der Emigranten ist, die Patch i innerhalb eines Zeitschrittes verlassen. A_{ij} ist entweder 1 oder 0 je nachdem, ob es einen Korridor zwischen Patch i und Patch j gibt oder nicht, wodurch das gesamte Vernetzungsmuster beschrieben ist. (x_i, y_i) sind die Koordinaten des Patches, die sich unmittelbar aus der Patch-Konfiguration ergeben. d_1 beschreibt die mittlere Distanz, die ein einzelnes Individuum überwinden kann, so daß der Ausdruck in Klammern nichts anderes ist als die mittlere Zahl der Individuen, die Patch j erreicht. Ob es zur Kolonisation kommt, hängt von der Zahl I_j der Immigranten ab, die für die Etablierung einer Subpopulation in Patch j notwendig wäre.

Wie man diesem Beispiel entnehmen kann, hängt b_{ij} insbesondere von den Charakteristika der beteiligten Subpopulationen ab (E_i, I_j), die ihrerseits, wie die Extinktionswahrscheinlichkeit v_i , von Bedingungen innerhalb der Patches i beeinflusst werden. Eine Spezifikation aller drei Größen ist in META-X durch die Nutzbarmachung externer Submodelle gewährleistet. Insbesondere können alle Simulationswerkzeuge für lokale Populationsdynamiken, wie RAMAS (Jacquez und Ginzburg 1989) oder EXI (Märtens und Stephan 1997; Rothhaupt 1997) genutzt werden. Wichtig ist nur, daß die interessierenden Charakteristika (v_i, E_i, I_j) mit Hilfe des Werkzeugs bestimmt und über eine geeignete Schnittstelle in META-X eingelesen werden können.

Naturschutzrelevante Auswertegrößen und ihre Bestimmung (eine Auswahl)

Aufgrund der Zufälligkeit in jeder Metapopulationsdynamik können prinzipiell nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden. Nichtsdestotrotz gibt es eine Reihe von Größen, die als Maß für die Erreichung bestimmter Managementziele dienen können. Wenn es beispielsweise um die Verbesserung der Überlebensfähigkeit einer Metapopulation geht, werden Größen wie das Extinktionsrisiko $P_0(t)$ (Wahrscheinlichkeit, daß die Metapopulation zum Zeitpunkt t ausgelöscht ist) oder die mittlere Lebensdauer T_m relevant. Ist man dagegen an ihrer Erholbarkeit interessiert, so ist die Wahrscheinlichkeit $R(\text{ini}, \text{est})$, daß die Metapopulation vom Ausgangszustand (ini) aus den etablierten Zustand (est) erreicht, das geeignetere Maß. Alle drei Größen lassen sich mit dem im folgenden kurz skizzierten *Standardverfahren* (Wissel *et al.* 1994; Stelter *et al.* 1997) aus den Modellsimulationen gewinnen.

Nach Festlegung eines Zeithorizonts t_H für die Simulation der Metapopulationsdynamik und Durchführung hinreichend vieler Simulationsläufe wird zunächst eine Statistik über die Extinktionszeitpunkte der Metapopulation angelegt und eine entsprechende Häufigkeitsverteilung aufgenommen. Die daraus ableitbare kumulative Wahrscheinlichkeit $P_0(t)$, daß eine Extinktion zum Zeitpunkt t oder früher stattfindet, ist dabei nichts anderes als das gesuchte Extinktionsrisiko. Es sei jedoch bemerkt, daß auf diesem Wege nur Aussagen für Zeitpunkte t innerhalb des betrachteten Zeithorizonts t_H gemacht werden können. Aus theoretischen Überlegungen (Wissel *et al.* 1994) und zahllosen Fallbeispielen (Verboom *et al.* 1993; Märtens und Stephan 1997, Stelter *et al.* 1997) weiß man aber, daß das Extinktionsrisiko $P_0(t)$ auf der Basis der vorhandenen Informationen über den Zeithorizont t_H hinaus *extrapoliert* wer-

den kann. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Extinktionsprozessen immanente Eigenschaft, daß für größere t-Werte immer ein *linearer Zusammenhang* zwischen $-\ln(1-P_0(t))$ und t gefunden werden kann (vgl. auch Abbildung 3 Berechnung der mittleren Lebensdauer). Es reicht also aus, die per Simulation gewonnenen Werte von $-\ln(1-P_0(t))$ einer linearen Regressionsanalyse zu unterziehen. Ist y_0+mt die ermittelte Regressionsgerade, so kann man sicher sein, daß

$$-\ln(1-P_0(t)) \approx \begin{cases} 0, & \text{für } t \leq \text{Max}(0, -\frac{y_0}{m}) \\ m(t + \frac{y_0}{m}), & \text{sonst} \end{cases}$$

gilt, wobei $-y_0/m$ der t-Wert ist, an dem die Regressionsgerade die y-Achse schneidet. Aus dieser Beziehung läßt sich leicht $P_0(t)$ bestimmen, wobei man die Fälle $y_0 < 0$ und $y_0 \geq 0$ unterscheiden muß (vgl. Tabelle 1). Mit $P_0(t)$ ist aber auch

$$\int_0^{\infty} t \cdot \frac{dP_0}{dt} dt$$

bekannt. Andererseits wissen wir, daß jede Metapopulation nach kurzer Zeit entweder ausgestorben oder im etablierten Zustand ist, so daß $R(\text{ini, est}) \approx 1-P_0(t)$ für kleines t ist. Welche Berechnungsvorschriften sich letztlich ergeben, ist in Tabelle 1 zu sehen.

	$P_0(t)$	T_m	$R(\text{ini, est})$
$y_0 < 0$	$0, \quad \text{für } t < -y_0/m$ $1 - e^{-m(t+y_0/m)}, \quad \text{sonst}$	$1 - e^{-y_0} \cdot e^{-mt}$	1
$y_0 \geq 0$	$1 - e^{-y_0} \cdot e^{-mt}$	$1 - e^{-y_0} \cdot e^{-mt}$	$1 - e^{-y_0} \cdot e^{-t}$

Tabelle 1

Zusammenhang zwischen den angestrebten Auswertegrößen ($P_0(t)$, T_m , $R(\text{ini, est})$) und den Charakteristika (y_0 , m) der durch Regressionsanalyse gewonnenen Regressionsgeraden y_0+mt

Resümee

Das hier vorgestellte Modell (Hauptmodell; Submodelle; Auswertegrößen) besitzt alle Eigenschaften, die ein Modell haben muß, um als Basis für ein flexibles Computerwerkzeug für Naturschutz und Landschaftsplanung zu dienen. Das Hauptmodell berücksichtigt alle Phänomene, die Metapopulationen immanent sind, wie die Kolo-

nisation von Patches, die Extinktion von Subpopulationen oder die Stochastizität in diesen Prozessen. Die individuelle Beschreibungsweise der Patches gestattet die Berücksichtigung räumlicher Heterogenität und die Simulation landschaftsverändernder Eingriffe mit Hilfe von Submodellen. Gemeinsam mit den beschriebenen Auswertegrößen kann eine breite Palette von metapopulationsrelevanten Managementmaßnahmen und -zielen abgedeckt werden.

5 Der Simulator META-X

Im Bereich des Naturschutzes gibt es bislang nur wenige einsetzbare Software-Werkzeuge. RAMAS, ALEX und VORTEX sind drei uns bekannte Werkzeuge im Bereich der Gefährdungsanalyse von Metapopulationen (Lindenmayer *et al.* 1995). Sie verletzen jedoch mindestens zwei der oben aufgeführten Anforderungen. Zwar kann die Frage nach der *Überlebensfähigkeit* einer Metapopulation untersucht werden, Fragen nach dem *Wiederansiedlungserfolg* und der *Erholbarkeit* einer Metapopulation werden dagegen vernachlässigt. Diese Werkzeuge erlauben derzeit auch keine *vergleichende Bewertung von Szenarien*. Es können lediglich einzelne Experimente durchgeführt werden, eine vergleichende Analyse von Szenarien unter den oben genannten Gesichtspunkten ist dagegen nicht möglich.

META-X ist ein auf dem in Kapitel 4 vorgestellten Modell basierender Simulator. Die aktuelle Version von META-X bietet bereits ein Werkzeug mit moderner Benutzungsoberfläche, das die Spezifikation von Modellen und die Durchführung von Standardauswertungen für einzelne Szenarien erlaubt. Die nächste Version von META-X, META-XL (META-X eLaborated), die im Herbst 1998 fertiggestellt sein wird, berücksichtigt zudem die genannten Anforderungen hinsichtlich des Szenarienvergleichs und bietet eine verbesserte Benutzerführung, die es insbesondere Personen mit geringeren Kenntnissen in der Modellierung oder im Umgang mit Computern ermöglichen soll, eigenständig Modelle zu spezifizieren, zu simulieren und zu analysieren. Seine Funktionalität berücksichtigt damit alle in Kapitel 3 definierten Anforderungen.

Im folgenden werden die von META-X bzw. META-XL unterstützten Arbeitsschritte näher erläutert.

5.1 Erstellung von Szenarien und deren Zusammenfassung zu einem Experiment

META-X erlaubt die Spezifikation einzelner Szenarien des Metapopulationshauptmodells und ihre Evaluation hinsichtlich der mittleren Überlebensdauer. In Abbildung 1 ist ein Ausschnitt aus der Benutzungsoberfläche von META-X dargestellt. Im

linken Teil des abgebildeten Fensters ist die Projektverwaltung bestehend aus Experimenten und Auswertungen zu erkennen. Der rechte Teil stellt die eigentliche Modellgenerierungskomponente dar: Im oberen Bereich können Parameterwerte eingegeben und angezeigt werden; der darunterliegende Landschaftseditor bietet die Möglichkeit, Patches der Metapopulation und ihre Verbindungstopologie grafisch zu spezifizieren. Die Reihenfolge der durchgeführten Spezifikationsschritte kann vom Modellierer nahezu frei gewählt werden und unterliegt somit keinen wesentlichen Einschränkungen.

META-X ermöglicht eine große Flexibilität bei der Erstellung eines Modells. Die großen Zahl (optionaler) Haupt- und Subparameter des Metapopulationsmodells, die in META-X verwaltet werden, stellt erhöhte Anforderungen an den Modellierer. Um auch modellierungsunerfahrenen Anwendern eine übersichtliche Spezifikation von Modellen zu ermöglichen, bietet META-XL daher neben der freien auch eine geführte interaktive Erstellung eines Szenariums. In mehreren Schritten werden hierbei nacheinander der betrachtete Landschaftsausschnitt der Metapopulation, die Positionierung der Patches in diesem, die Eingabe der Vernetzungsmusters sowie die Parameter „mittlere Ausbreitungsdistanz,“ und „mittlere Korrelationslänge,“ und die Patch-Charakteristika vom Benutzer erfragt.

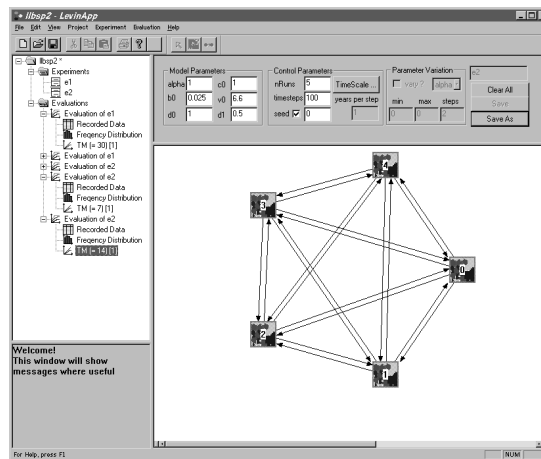


Abbildung 1
Ausschnitt aus der Benutzungsoberfläche von META-X

1. Diese Angaben können wahlweise mit Hilfe eines grafischen Editors oder textuell spezifiziert werden. Aus den bereits eingegebenen Parametern werden soweit möglich weitere Modellgrößen automatisch berechnet. Eingegebene und berech-

nete Modellparameter werden nach jedem Spezifikationsschritt nochmals dargestellt, um eine Nachkorrektur der eingestellten Werte zu ermöglichen.

2. Dieses Vorgehen hat den zusätzlichen Vorteil, daß kein Parameter „vergessen,, werden kann. Da der Anwender gezwungen wird, sich zu jedem Parameter zu positionieren, werden frühzeitig mögliche Unsicherheiten und Fehlerquellen aufgedeckt, was für das Vertrauen in die Modellergebnisse und das Verständnis des Systems förderlich ist. Der Landschaftseditor hat den Vorteil, daß alle im Modell verwendeten räumlichen Informationen im Kontext der untersuchten Landschaft dargestellt werden können. Auf diese Weise wird ein ganzheitliches Erfassen des Zusammenhangs zwischen Modellergebnis und aktueller räumlicher Konstellation unterstützt (Anschaulichkeit anstelle „Formelsalat,,).

Die Spezifikation eines einzelnen Szenariums ist bereits in der aktuellen Version von META-X integriert. META-XL wird darüber hinaus um das Konzept des Experiments erweitert: Ein Experiment in META-XL modelliert einen vergleichenden Versuchsaufbau durch eine Zusammenfassung von mehreren, zu einer Fragestellung gehörenden Szenarien, die sowohl manuell eingegeben als auch durch Variation von Parametern automatisch erzeugt werden können.

Neben der eigentlichen Modellbeschreibung müssen Kontrollgrößen zur Steuerung der Simulation angegeben werden. Diese Kontrollparameter können sich entweder auf die Simulation aller Szenarien eines Experimentes beziehen, wie z.B. die Anzahl der zu jedem Szenarium durchgeführten Simulationsläufe, oder szenarienspezifisch einstellbar sein.

5.2 Interaktive Durchführung von Experimenten

In META-X kann jedes einzelne Szenarium eines Experiments wie auch das gesamte Experiment im Batchbetrieb effizient simuliert werden. Wegen der Stochastizität des Modells muß zu jedem Szenarium eine größerer Zahl von Simulationsläufen durchgeführt werden, damit aus den resultierenden Simulationsdaten statistisch relevante Ergebnisse abgeleitet werden können.

Um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, sein Modell und die eingestellten Simulationskontrollparameter vor dem Start dieses u.U. erheblichen Simulationsaufwands zu validieren, bietet META-X auch eine Simulation im sogenannten „interaktiven Betrieb,, (s. Abbildung 2) an. Hierbei wird zum einen das Verhalten des Modells geeignet, d. h. durch eine animierte Darstellung der Patchtopologie sowie durch grafische Darstellung der Funktionsverläufe bzw. und textuelle Anzeige der Werte signifikanter Modellgrößen, visualisiert. Zum anderen kann die Simulation interaktiv durch den Benutzer gesteuert werden.

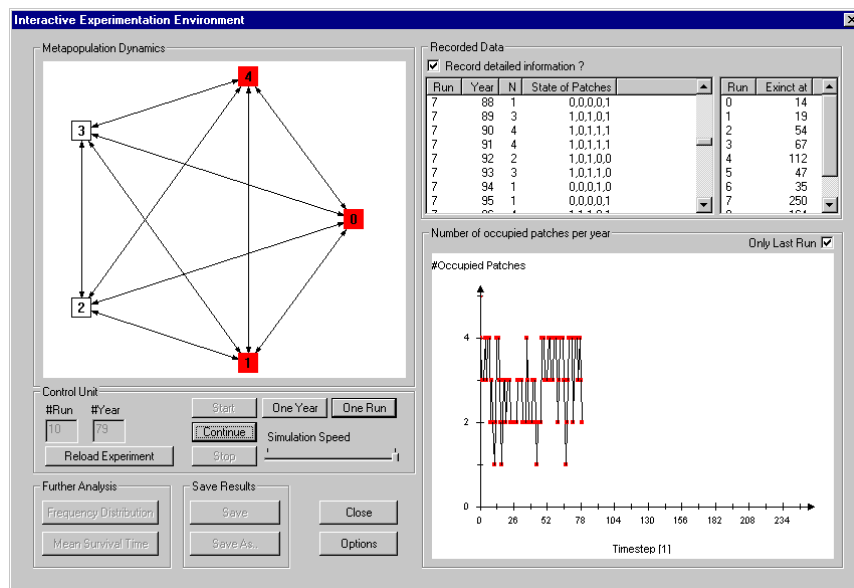


Abbildung 2
Interaktive Simulationsdurchführung

5.3 Automatische Auswertung von durchgeführten Experimenten

Während der Simulation eines Experiments werden die interessierenden Modellgrößen protokolliert und als „Rohdaten“, der Simulation gespeichert. Im Anschluß an die Simulation werden in META-X bereits alle zur Berechnung der mittleren Lebensdauer notwendigen Auswertungen vorgenommen und gespeichert; META-XL sieht darüber hinaus die Durchführung weiterer Auswertungsoperationen vor.

Abbildung 3 zeigt die Auswertung der mittleren Überlebenszeit einer Metapopulation für ein Szenarium in META-X. Um die Berechnung des Ergebnisses nachvollziehbarer zu gestalten, können die notwendigen Berechnungen schrittweise durchgeführt werden. Die Möglichkeit der interaktiven Auswertung wird in META-XL auf weitere Auswertungsfunktionen ausgedehnt werden.

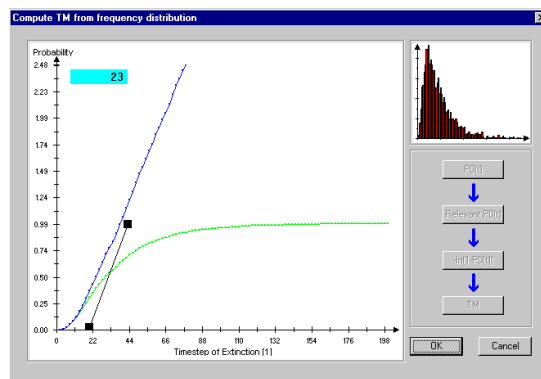


Abbildung 3 Berechnung der mittleren Lebensdauer

Die Simulation eines Experiment erzeugt eine sehr große Datenmenge. META-X bietet hierzu bereits die Möglichkeit, die gespeicherten Daten auf die zur Berechnung der mittleren Überlebensdauer einer Metapopulation notwendigen Daten einzuschränken. In META-XL wird eine gezielte Einschränkung der gespeicherten Simulationsdaten auf die interessierenden Modellgrößen explizit durch Angabe der zu protokollierenden Modellgrößen oder implizit durch die zu beantwortende Fragestellung möglich sein.

5.4 Projektverwaltung

Alle Szenarien, Experimente, Auswertungen, Dokumentationen sowie alle während der Simulation erzeugten Simulationsdaten werden von META-X bzw. META-XL in sogenannten Projekten verwaltet. Abbildung 4 verdeutlicht die Struktur eines Projektes: Ein Projekt kann mehrere Experimente enthalten, die wiederum aus einer Menge von Szenarien, szenarienübergreifenden Kontrollparametern und der Angabe der zu beobachtenden Modellgrößen bestehen. Jedes Szenarium wird durch seine Modellparameter, seine szenarienspezifischen Kontrollparameter sowie die zu diesem Szenarium ggf. bereits durchgeführten Auswertungen beschrieben. Jede Auswertung umfaßt neben den berechneten Ergebnisdaten eine automatisch generierte Dokumentation. Zusätzlich zu dieser können jedes Projekt, jedes Experiment, jedes Szenarium und jede Auswertung zusätzlich vom Benutzer kommentiert werden.

META-X und META-XL bieten dem Benutzer die Möglichkeit, einmal erstellte Projekte wieder zu laden und ihre Szenarien und Experimente zu modifizieren und erneut zu simulieren. Um eine korrekte Zuordnung von Experiment und Auswertung und somit die Reproduzierbarkeit der gewonnenen Resultate zu gewährleisten, dokumentiert bereits META-X automatisch, welche Experimentspezifikationen zu ei-

nem Ergebnis geführt haben, d.h. META-X und META-XL dokumentieren jede Auswertung automatisch mit den Informationen über das zugrundeliegende Experiment bzw. Szenarium, die zugehörigen, erzeugten Simulationsdaten und die Beschreibung der auf diese angewendeten Auswertungsfunktionen.

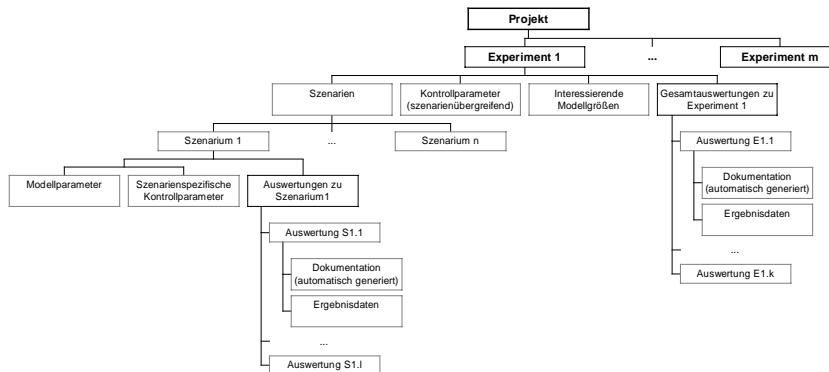


Abbildung 4 Organisation der Projektverwaltung

6 Zusammenfassung

META-X integriert theoretisches Grundlagenwissen aus dem Bereich der Risikoanalyse von Metapopulationen in ein leicht handhabbares Computerwerkzeug, das Entscheidungshilfen für Naturschutz und Landschaftsplanung bietet.

Bei der Entwicklung von META-X und in besonderem Maße von META-XL wurden die Anforderungen von Benutzern ohne tiefere „Computerkenntnisse“, verstärkt berücksichtigt. Bereits META-X bietet eine komfortable Benutzungsoberfläche auf einem Standardbetriebssystem, META-XL erweitert diese um eine Unterstützung bei der Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte und bietet somit auch eine methodische Hilfestellung sowohl bei der Modellspezifikation als auch bei der Durchführung von Auswertungen. Beide META-X-Versionen führen zudem automatisch eine Dokumentation der Auswertungsergebnisse durch und gewährleisten somit deren Reproduzierbarkeit.

Ein zusätzlicher Schwerpunkt bei der Entwicklung des Werkzeug wird in META-XL zudem auf die Möglichkeit zur Erstellung vergleichender Studien gelegt, indem durch die Zusammenfassung verschiedener Szenarien zu einem Experiment alternative Eingriffsszenarien evaluiert werden können.

7 Literaturverzeichnis

- Burgman, M.A., Ferson, S., Akçakaya, H.R. (1994): Risk Assessment in Conservation Biology, Chapman and Hall, London.
- Doak, D.F., Mills, L.S. (1994): A useful role for theory in conservation, *Ecology* 75, S. 615-626.
- Drechsler, M., Wissel, C. (1997): Trade-offs between local and regional scale management of metapopulations, *Biological Conservation* 83, S. 31-41.
- Frank, K., Wissel, C. (1994): Ein Modell über den Einfluß von räumlichen Aspekten auf das Überleben von Metapopulationen, *Verh. Gesellschaft für Ökologie* 23, S. 303-310.
- Frank, K. (1998): Optimizing network of patchy habitats: from model results to rules of thumb for landscape management, in: B. Lieff et al. (Hrsg.): Linking Protected Areas with Working Landscapes, Proc. of the Third International Conference on Science and Management of Protected Areas (SAMP3 III), Calgary 1997, (im Druck).
- Hanski, I. (1994): A practical model of metapopulation dynamics, *J. Animal Ecology* 63, S. 151-163
- Jacquez, G.M., Ginzburg, L. 1989. RAMAS: Teaching population dynamics, ecological risk assessment and conservation biology. *Academic Computing* 4: 26-27, 54-56
- Levins, R. (1969): Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control, *Bull. Entomol. Soc. Am.* 15, S. 237-240.
- Lindenmayer, D.B., Burgman, M.A., Akçakaya, H.R., Lacy, R.C. and Possingham, H.P., (1995): A review of the generic computer programs ALEX, RAMAS/space and VORTEX for modelling the viability of wildlife metapopulations, *Ecological Modelling*, Band 82, S. 161-174.
- Märtens, B., Stephan, Th. 1997. Die Überlebenswahrscheinlichkeit von Zauneidechsenpopulationen (*Lacerta agilis* L., 1758). *Verh. der Gesellschaft für Ökologie* 27: 461-467
- Nisbet, R.M., Gurney, W.S.C. 1982. *Modelling Fluctuating Populations*. John Wiley and Sons, New York
- Rothhaupt, G. 1997. Populationsgefährdungsanalyse am Raubwürger (*Ianius excubitor* L.) Diss. Universität Göttingen
- Stelter, C., Reich, M., Grimm, V., Wissel, C. (1997): Modelling persistence in dynamic landscapes: lessons from a metapopulation of the grasshopper *Bryodemta tuberculata*, *J. Animal Ecology* 66, S. 508-518.
- Verboom, J., Metz, J.A.:J., Meelis, E. (1993): Metapopulation models for impact assessment of fragmentation, in: C.S. Vos et al. (Hrsg.): *Landscape Ecology of a Stressed Environment*, Chapman and Hall, S. 172-191.
- Wissel, C., Stephan, T., Zschke, S.H. (1994): Modelling extinction and survival of small populations, in: H. Remmert (Hrsg.): *Minimum Animal Populations*, Springer, Berlin, S. 67-103.