

THEORIE UND MODELLIERUNG VON WALDSCHADENSPROZESSEN IM FICHELGEBIRGE - IHRE HIERARCHISCHE STRUKTURIERUNG UND TECHNOLOGISCHE ANWENDUNG

Roman Lenz und Peter Schall

ABSTRACT

A theory and their translation into simulation models concerning the forest damage symptoms in the Fichtelgebirge will be introduced, hierarchically structured and the technological application described. The results show spatial and temporal extrapolations for key-processes and important impact factors. In addition we simulate and discuss the damage symptoms like needle yellowing and loss, tree and stand mortality, and retrogression from spruce and spruce-dominated ecosystems.

This approach can be defined as an ideal basis of an "integrated assessment" as described by HAUHS (1989) in coupling the science-with the technology-cycle with theory and models.

keywords: *hierarchy conception, forest decline, spruce-ecosystem, simulation models, geographical information system, integrated assessment*

1. EINFÜHRUNG

Der Stand der Ursachenforschung zu den neuartigen Waldschäden im Fichtelgebirge, abgeleitet aus Experimenten (primär an den zwei Standorten Oberwarmensteinach und Wülfersreuth, vgl. SCHULZE et al. 1989) und aufbereitet in einigen Theorien und Modellen, steht neben den Beobachtungen, Erfahrungen und Maßnahmenplanungen der Forstwirtschaft, die z.B. mit einem umfangreichen Programm (vgl. KOCH 1986) eine Waldsanierung auf ca. 10 % der Fläche (ca. 3000 ha) im Untersuchungsgebiet Fichtelgebirge versucht.

Diese beiden Bereiche besser zu verbinden ist Anliegen des vorliegenden Beitrags. Dabei werden, orientiert an einer schematischen Verbindung von Wissenschaft und Technologie nach HAUHS (1989; Abb. 1), kontrollierte Daten zur Bildung einer Schädigungstheorie herangezogen, die dann auch mathematisch formuliert ist. Mit den Modellen lassen sich räumliche oder zeitliche Erweiterungen des Aussagebereichs ableiten, die im Sinne einer Prognose politische Entscheidungen und Maßnahmenplanungen unterstützen können. Schädigungstheorie und Modelle werden über die Erfahrungen aus der Forstwirtschaft in ihrer Plausibilität kontrolliert und eventuell empirisch erweitert. Theorie- und Modellbildung haben ebenfalls die zentrale Rolle bei der Entwicklung von Ideen zum Erkenntnisfortschritt, der letztlich bei experimenteller Bestätigung die Theorie- und Modellbildung vorantreibt.

Um diesen Zielen näher zu kommen, wird im folgenden für Waldschadenssymptome im Fichtelgebirge

- eine Schädigungstheorie formuliert,
- eine schematische Hierarchisierung von Integrationsebenen für Strukturen und Prozesse in Fichten und fichtenbestimmten Ökosystemen vorgenommen und
- eine räumliche sowie eine zeitliche Ausweitung der Aussagebereiche mittels geeigneter Modelle zur Schädigungstheorie versucht.

Erste Ansätze hierzu wurden in Form von Simulationsbeispielen zur Stickstoffhypothese bei der GfÖ-Tagung in Göttingen 1987 vorgelegt (LENZ und SCHALL 1989).

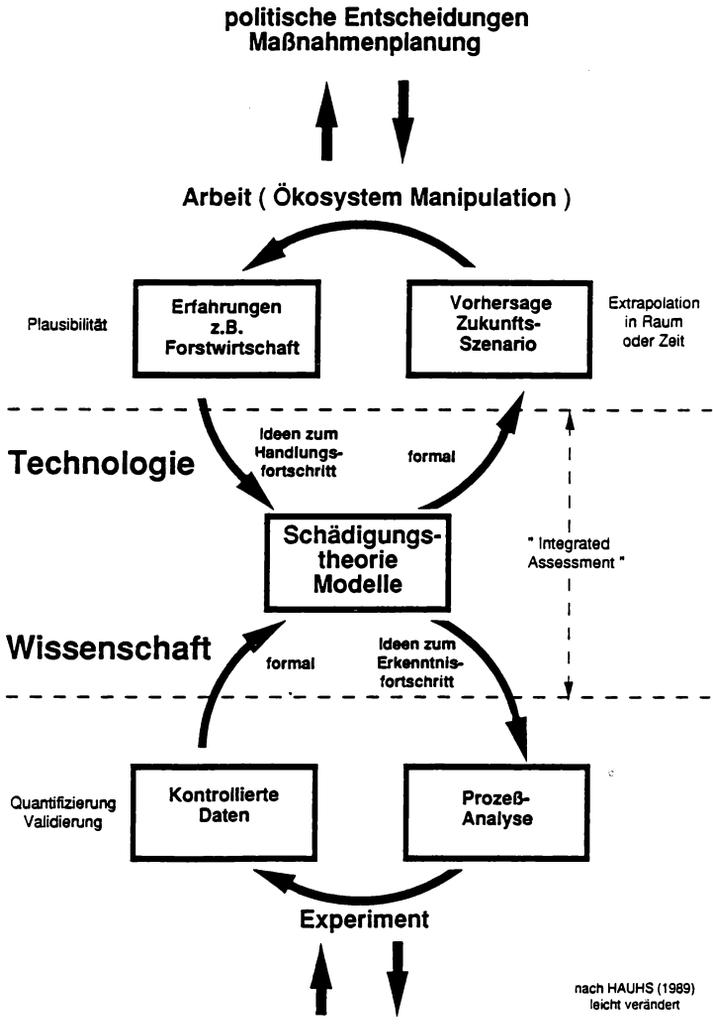


Abb. 1: Schädigungstheorie und Modelle als zentrale Koppelung zwischen Wissenschaft und Technologie (nach HAUHS 1989, leicht verändert).

2. MATERIAL UND METHODEN

Die Lage des Untersuchungsgebietes ist in Abb. 2 dargestellt. Die Schwerpunktforschung der Arbeitsgruppe Forsttoxikologie erfolgt in Fichtenökosystemen bei Wülfersreuth und Oberwarmersteinach (vgl. SCHULZE et al. 1989), die am südlichen Rand unseres zu 90 % mit Fichten bestockten Untersuchungsgebietess lokalisiert sind. Die dort gewonnenen Ergebnisse bilden zusammen mit umfangreichen Literaturauswertungen die Basis zur Formulierung einer Schädigungstheorie.

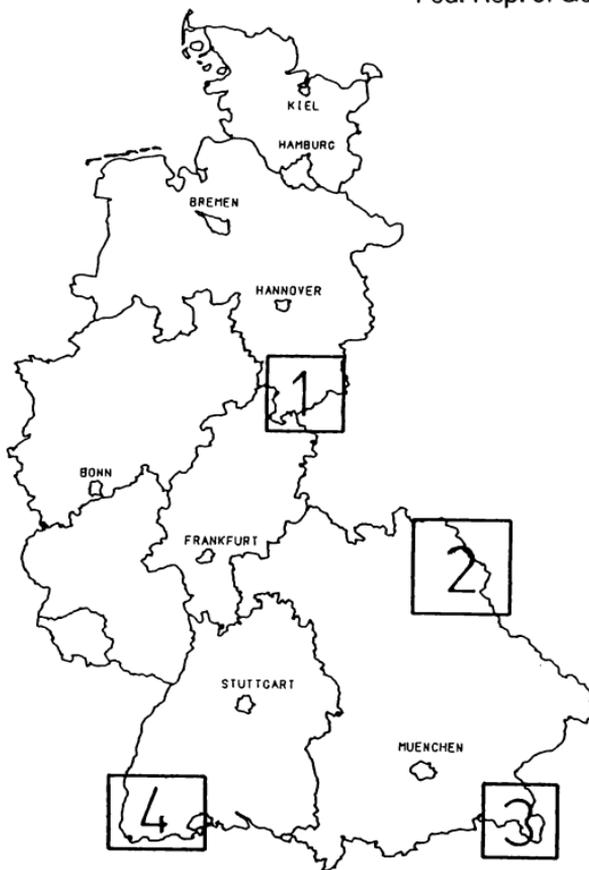
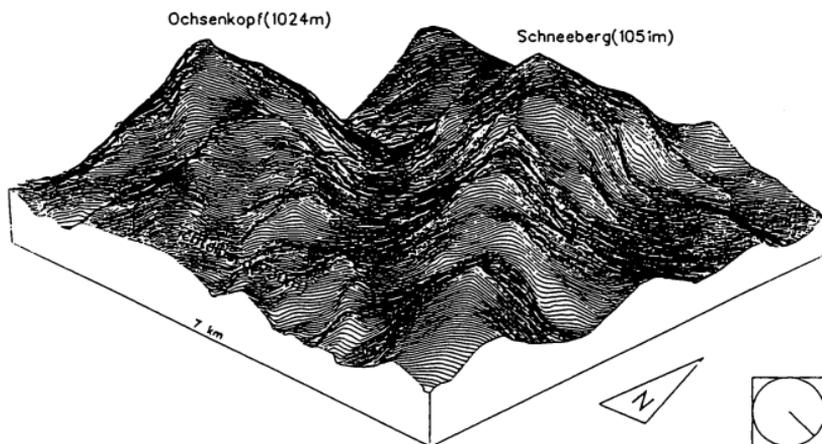
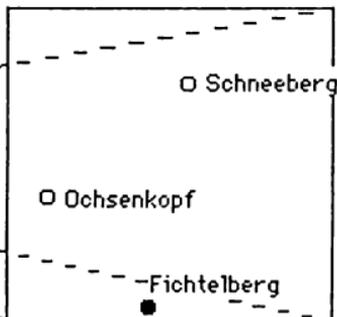
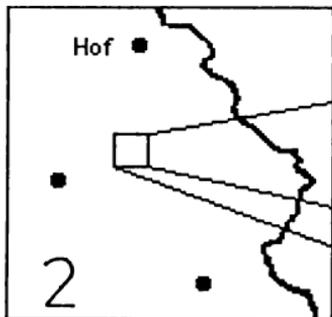


Abb. 2: Lage des Testgebiets

Fichtelgebirge

mapscale 1:200 000

mapscale 1:10 000



Schädigungstheorie

(vereinfacht nach verschiedenen Publikationen von den Arbeitsgruppen um ULRICH, SCHULZE und LANGE)

Durch die erhöhte Deposition von Säuren und säurebildenden Substanzen bei gleichzeitigem Rückgang säureneutralisierender Komponenten kommt es (auf Fichtelgebirgsstandorten) zu einer Verarmung basisch wirkender Kationen im Boden. Diese wird durch steigende NH_4^+ -Einträge, bevorzugte Aufnahme von Ammonium durch die Fichte und NO_3^- -Austräge noch verstärkt.

Das z.T. extrem verringerte Basen- und damit Magnesiumangebot hat eine reduzierte Aufnahme zur Folge, die maßgeblich durch Wurzelschäden bzw. verringerte Durchwurzelung erklärt werden kann. Demgegenüber bleibt die Stickstoffaufnahme relativ konstant, so daß es zu Nährstoffungleichgewichten kommt - ungeachtet dessen, ob eine oberirdische Stickstoffaufnahme dabei eine wesentliche Rolle spielt. Der Stickstoff tritt als steuerndes Element der Nadelmassenbildung auf, so daß es während der Kronenwachstumsphase durch Translokation zur Magnesiumverdünnung in älteren Nadeln kommt, da der diesjährige Nadeljahrgang (plus Zweige) in der Mg-Ausstattung bevorzugt wird. Durch den Verbrauch des in der Fichte gespeicherten "verfügbaren" Magnesiums kann in der darauffolgenden Phase des Stammwachstums Mg-Mangel im Stammkambium auftreten und das Dickenwachstum reduzieren. Mit verringerten Mg-Nadelgehalten nimmt die Assimilation (verringerte Photosynthesekapazität) zuerst leicht und schließlich, bei Mg-Mangel im Photosystem (Vergilbung), drastisch ab. Dann tritt auch erhöhte Nadelmortalität auf.

Diese Schädigungstheorie bestimmt die Auswahl und Aufbereitung der Daten sowie die Strukturierung der Modellierung.

Geographische Datenbank

Zur flexiblen und operationalen Verarbeitung wurden die Daten im polygonbezogenen Geographischen Informationssystem (GIS) ARC/INFO gespeichert (vgl. BACHHUBER et al. 1991, HABER et al. 1991 und TOBIAS et al. 1989a). Karten und Variable sind für das Untersuchungsgebiet in Tab. 1 wiedergegeben.

Statische Modellierung

Die Abfrage dieser Daten im GIS erfolgt durch Algorithmen. Methodisch kann diese Vorgehensweise als eine einfache Art von Expertensystem bezeichnet werden: Statische oder quasi-dynamische Modelle werden mathematisch bzw. als Regeln formuliert und ihr Zugriff als Makrosprache formalisiert.

Die verwendeten Modelle basieren auf den in der Schädigungstheorie zu Anfang genannten Einflüssen und damit Prozessen, die im wesentlichen stoffhaushaltlicher Natur auf Ökosystem- und Landschaftsebene sind. Hierzu wurden Algorithmen zur flächenbezogenen Abschätzung der Säure- (und Stickstoff-) Deposition erstellt (TOBIAS et al. 1989b), die in Verbindung mit dem Puffervermögen der Böden als sogenannte Säuretoxizitätsstufen klassifiziert wurden. Diese wiederum wurden mit den physiologischen (autökologischen) Ansprüchen von Fichten bzgl. Basen- und Wasserversorgung verglichen und als zu erwartende Vitalitätsklassen interpretiert. Säuredepositionen in der Größenordnung von über $2 \text{ kmol/ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ werden für Standorte, deren durchwurzelbare Bodenhorizonte vollständig im Aluminium-Pufferbereich liegen, als langfristig bestandsauflösend angesehen (LENZ und HABER 1990).

Dynamische Modellierung

Um die kurzfristigen Reaktionen von Fichten auf die verschiedenen standörtlichen und ökosystemaren Rahmenbedingungen - bereitgestellt durch die Modellierung im GIS - in ihrer zeitlichen Dynamik nachzubilden, wurde ein Bestandsmodell verwendet, das dynamisch rückgekoppelt Prozesse des Energie-, Wasser- und Stoffhaushalts einer "Durchschnittsfichte" simuliert. Es umfaßt dabei die Betrachtungsebenen Population, Genotyp und Organ, wobei im wesentlichen nur die Prozesse der Schädigungstheorie implementiert sind (SCHALL 1988; auch LENZ und SCHALL 1989).

Tab. 1: Karten und Variablen im Geographischen Informationssystem

UNTERSUCHUNGS- GEBIET		FICHELGEBIRGE 1:10 000		LANG/LENZ 1989	
Karte:	DATAFILE NAME	Variablen:	ITEM NAME	Relationale Datenbank:	ITEM NAME
- Höhengichtlinien (1)	HOEAAT HOEPAT	- Höhenlinien - Höhenfestpunkte	HOB-E HOB-E		
- Höhenstufen (1)*	HOESTU.PAT	- Höhenstufen	HOESTU	Klimatabelle: - mittlere jährliche Niederschlags- summe (in 100 mm/yr) - Zahl der Tage mit Nebel - mittlere jährliche Lufttemperatur	NIE NEB TEM
- Hangneigung und Exposition (1)*	EXPNEI.PAT	- Exposition (in 45°) - Neigung	EXP NEI		
- Realnutzung (2)*	REL.PAT	- Realnutzung - Forstamt - Buchungsstellenschlüssel - Hochziffer - Schlüsselnummer	REL FAMT BS HZ SCHL	Bestandstabelle: - Bestandstyp - Bestandsalter - Nutzungsart - Bonität - jährliche Festlegung von Stickstoff in der permanenten Biomasse - klassifizierter laufender jährlicher Zuwachs	BFN ALTST NAN RELERT STICK ZUWACHS
- Standort (3)*	STO.PAT	- Standortkartierung - Bodeneinheit - Ausgangsgestein	STO BODYTYP AUSGEST	Bodentabelle: - Humusform - Organ. Substanz (min/max) - Sorptionskapazität (min) (mmol/100g) - Sorptionskapazität (max) - pH-Wert - Gründigkeit - K (Mn+Fe)-Versorgung - Ca-Versorgung - Mg-Versorgung - Feuchtestufe	HUMUS ORGIN SORPMM SORPMA PH-BOD GRUELD KMINFEBOD CABOD MGBOD FEUCHT
- Waldschäden (4) (<i>Picea abies</i>)	SCHAD.PAT	Rechtswert Hochwert	X-WERT Y-WERT	- Luftbildnummer - Schadstufe nach Struktur- merkmalen (Stichprobenbaum Nr.1,2,3,4) - Phänotyp (Stichprobenbaum Nr.1,2,3,4) - Vergilbung yellowing (Stichprobenbaum Nr.1,2,3,4) - Endschadstufe (Stichprobenbaum Nr.1,2,3,4) - Lage - Beschirmungsgrad - Stufigkeit - Mischungsgrad - Endschadstufe je Raster- netzpunkt - Vergilbungstufe je Raster- netzpunkt - Relative Schadklasse	BILD S1,2,3,4 P1,2,3,4 V1,2,3,4 E1,2,3,4 LAGE SCHIRM STUF MISCH EGES VERGILB ESTU

Erläuterung:

- (1) Forstbetriebskarten der Forstämter Fichtelberg (1982), Goldkronach (1982), Weißenstadt (1981) und Wunsiedel (1982); OFD Bayreuth
 - (2) (1) und Forsteinrichtungswerke der o.g. Forstämter
 - (3) OFD Bayreuth, ca 1960: Standortkarte Fichtelgebirge, unveröff. Original
 - (4) Lehrstuhl für Landschaftsökologie, 1987: Waldschadensinterpretation nach CIR- Luftbildern vom 26.9.86, unter Anleitung von A. TROYKE
- * Eigene Interpretation (vgl. HABER et al. 1991)

Die interne Steuerung der so errechenbaren Symptome Nadelvergilbung, Nadelverlust, Baumwachstum und Bestandsdichte erfolgt

1. über die Einteilung des Baumes in Biomassenkompartimente (Organe), die assimilieren, transpirieren (nur Nadeln), Wasser leiten, respirieren, Magnesium aufnehmen und verlagern können;
2. über die Biomassenkompartimentierung, die die Kohlenstoffallokation steuert und im Rahmen der genetischen Adaption vom Wasser- und Magnesiumhaushalt der Kompartimente reguliert wird; und
3. über die Bestandsdichte, die biomassenabhängig dem Gesetz der natürlichen Dichteregulation (YODA et al. 1963) folgt.

Die externe Steuerung des Modells könnte über standörtliche und ökosystemare Charakteristika, die - wie oben erwähnt - in der geographischen Datenbank bereitgestellt sind, erfolgen. Auf Grund der relativ weiten Spanne der möglichen Anknüpfungsdaten (Klassifizierung!) und der zu geringen zeitlichen Auflösung ist eine direkte Ökotopt-bezogene Verbindung mit dem Bestandsmodell derzeit (noch) nicht sinnvoll.

Daher geben die allgemeinen Steuerparameter lediglich die mittlere standörtliche Situation im Fichtelgebirge für Lagen um 700 m ü.NN (Jahresmitteltemperatur ca. 7 °C, Temperaturamplitude im Jahresverlauf ca. 18 °C, Strahlung ca. 300 W/m², Bodenwasserpotential < 0,05 mP) wieder.

Die weitere externe Steuerung, die nur indirekt aus den Ergebnissen der statischen Modellierung abgeleitet werden können, erfolgt über die der Schädigungstheorie entsprechenden Magnesium-Versorgungsstufen und einen Stickstofffaktor, der die Nadelmassenbildung kontrolliert.

3. ERGEBNISSE

Hierarchisierung von Strukturen, Reaktionszeiten, Schadsymptomen und Schlüsselprozessen

Ausgehend von grundlegenden theoretischen Überlegungen zu Organisationsebenen von Materie in biologischen Systemen (HABER 1979), ihrer Struktur und Dynamik (z.B. v.d. MAAREL 1980) und ihrer Modellierbarkeit (z.B. LANDSBERG 1986) wurde eine Untergliederung von Fichten und Fichtenwaldökosystemen in einem Landschaftsausschnitt nach Organisationsebene, Reaktionszeit, Schadsymptomatik und Schlüsselprozessen vorgenommen und vereinfacht dargestellt (Abb. 3).

Diese schematische Einteilung verhilft zu einer Kategorisierung von Strukturen auf verschiedenen Organisationsebenen, die im angegebenen Zeithorizont als konstant angesehen werden können und damit den Rahmen für die dort ablaufenden Prozesse bilden. Prozesse auch zwischen den Organisationsebenen beeinflussen im Gegenzug die Ausprägung der Struktur. Geht man im Schema (Abb. 3) von der Betrachtungsebene Ökosystem/Landschaft aus, so sind dort die rahmengebenden Bedingungen, die Standortfaktoren Temperaturregime, Nährstoff- und Wasserhaushalt, charakterisierbar, die in Reaktionszeiten von 10⁰-10² Jahren je nach Art (autökologische Ansprüche) zu einer vorhersagbaren Bestandsdichte- und Biomasseentwicklung (als Prozeß betrachtet, vgl. Forstl. Ertragstafeln) führen. Über noch längere Zeiträume betrachtet bedingt insbesondere das allgemeine Klimaregime die Existenzmöglichkeiten der jeweiligen Arten.

Verfolgt man das Schema für Bestände (Organisationsebene Population/Art) weiter, so kommen bei gegebener Bestandsdichte (jetzt als Struktur betrachtet) dominierende und unterdrückte Baumindividuen (vgl. KRAFT'sche Klassen) vor, die verschiedene Biomassekompartimentierungsstrategien aufweisen. Dieses Kompartimentierungsverhalten kann sich je nach Licht-, Wasser- oder Nährstoffstreß bzw. -konkurrenz verschieden ausbilden und drückt sich im Haushaltsregime der Bäume aus. Die haushaltlichen Funktionen und die Biomassekompartimentierung führt damit zur spezifischen Ausbildung der Organe, in denen ökophysiologische Prozesse wie Assimilation, Transpiration, Respiration, Wasser- und Nährstoffleitung ablaufen (Organisationsebene Organ).

HIERARCHIE von STRUKTUREN und PROZESSEN für FICHTEN und FICHTENBESTIMMTE ÖKOSYSTEME zur SIMULATION von SCHADSYMPTOMEN bei ausgewählten SCHLÜSSELPROZESSEN							
Organisations- ebene	Reaktionszeit					Schadssymptome	Schlüsselprozesse (nach Schädigungstheorie)
	Sek.-Min.	Min.-Tage	Tage-Jahre	$10^0 - 10^2$ Jahre	$\geq 10^2$ Jahre		
Zelle (μm^2)						Nadelvergilbung	
Organ (cm^2)		Assimilation Respiration Magnesium- allokation	Biomasse- kompartimen- te				Nadelverlust
Genotyp (m^2)			Haushalte- Kohlenstoff Wasser Magnesium	Biomasse- kompartimen- tierung		Baumsterben	Bei Mg-Mangel Ein- schränkung des Stamm- gegenüber Kronenwach- stum. Stickstoffversorgung kontrolliert Nadelbildung
Art/ Population (ha)				Bestands- dichte Bestands- masse	Autökologische Ansprüche		Bestandssterben Retgression
Ökosystem/ Landschaft (km^2)				Temperatur- amplitude Basenver- sorgung Wasserver- sorgung	Temperatur Niederschlag Strahlung		Stickstoff- und Säureüber- schuß führt zur Basenver- armung, Wurzeltoxizität, systemischem Wasser- streß und Nährstoffun- gleichgewichten

*dynam. Rück-
kopplungsmodell*



*statische
Modelle*



Abb. 3: Hierarchie von Strukturen, Prozessen und Einflußfaktoren für Fichten und fichtenbestimmte Ökosysteme zur Simulation von Schadensymptomen bei ausgewählten Schlüsselprozessen

Wenn jetzt das beschriebene Gesamtsystem z.B. in eine mangelhafte Magnesiumversorgung kommt, so ändert sich die Mg-Trans- und -Allokation zwischen den Biomassekompartimenten, wodurch auch Assimilationsraten reduziert sein können. Der Mg-Haushalt des gesamten Baumes verändert sich und es setzen Adaptationserscheinungen ein, die sich in der Biomassekompartimentierung auswirken. Schließlich kann es auch zu einer Reduktion der Bestandsdichte und -masse kommen, die sich im Rahmen der autökologischen Ansprüche entweder stabilisiert oder bis zum Auftreten anderer, besser angepasster Arten führt.

Die jeweiligen augenscheinlich erkennbaren Schadsymptome lassen sich auf den jeweiligen Organisationsebenen als

- Nadelvergilbung
- Nadelverlust
- Baumsterben
- Bestandssterben oder gar als
- Retrogression

beschreiben. Inwieweit sich die Symptome durch die Ebenen von oben nach unten durchziehen, hängt demnach davon ab, ob die Adaptationsfähigkeit (der Strukturen) auf der jeweiligen Ebene Geschwindigkeit und Ausmaß der Veränderung (der Prozesse) kompensieren kann. Treten andere oder mehrere Stressoren gleichzeitig auf (z.B. systemischer Wassermangel), können natürlich auch andere Anpassungen ge- bzw. überfordert werden, so daß z.B. zuerst ein (unspezifischer) Nadelverlust auftritt. Auch derartige Prozeß-Struktur-Wirkungsketten lassen sich prinzipiell in das vorgestellte Schema einfügen.

In der rechten Spalte dieses Schemas sind entsprechend der Schädigungstheorie die Schlüsselprozesse nochmals kurz angeführt, die die wesentlichen Modellstrukturen bilden bzw. steuernd auf sie einwirken.

Die genannten Modelle - das dynamische Rückkopplungsmodell für die Organisationsebenen Organ, Genotyp und Population (vgl. Abb. 3, dunkle Schraffur), die Algorithmen im GIS zu Population und Ökosystem/Landschaft (vgl. helle Schraffur der statischen Modelle) - decken die beschriebene Hierarchisierung der Schadtheorie zum Gesamtsystem ab. Dabei überschneiden sich die beiden Modelle bzw. Modelltypen im Bereich der Simulation von Bestandsdichten und -massen auf der Organisationsebene Population.

Räumliche Extrapolation

Hier wurde versucht, Ökosystemzustände in ihrer möglichen Auswirkung auf die Fichtenvitalität in 4 Klassen zu einer gedachten natürlichen und potentiell zu erwartenden Situation anzugeben. Der gesamte Zeitrahmen dieser Simulation umfaßt Jahrhunderte. Ist es prinzipiell möglich, für (die) Referenzstandorte (Oberwarmersteinach und Wülferreuth) die wesentlichen Depositions- und Bodenprozesse deterministisch auch über längere Zeithorizonte zu modellieren (vgl. z.B. für die Oberbodenverarmung KAUPENJOHANN 1989), so wird bei einer räumlichen Ausweitung des Aussagebereichs wegen ungenauer Daten eine derartige Vorgehensweise nahezu unmöglich. Daher kann eigentlich nur auf einen in Jahrzehnten (bis Jahrhunderten) erreichten Zustand der Umweltbedingungen in ihrer Bedeutung für die Fichtenvitalität durch eine gutachterliche Verknüpfung der wesentlichen Einflußgrößen geschlossen werden.

Den autökologischen Ansprüchen einer Durchschnittsfichte zu Folge wäre unter natürlichen Bedingungen ihre Vitalität im Untersuchungsgebiet als mäßig gut bis gut einzustufen (Abb. 4): klimatische Rahmenbedingungen, Bodenwasser- und Nährstoffversorgung sowie Bodenazidität auch im Mineralboden sind eher günstig. Die Vitalitätsstufen "vital" und "less vital" wären jeweils zu ca. 50 % im Untersuchungsgebiet vertreten. Bei dieser Einschätzung ist zu beachten, daß unter natürlichen Konkurrenzbedingungen Buchen mit einer Beimischung von Tanne, Bergahorn, Fichte und Kiefer im Untersuchungsgebiet vorherrschen würden (REIF 1989). Demgegenüber steht die Abschätzung der potentiellen Fichtenvitalität unter der Annahme einer gleichbleibenden Säurebelastung der Fichtenwaldökosysteme in den nächsten Jahrzehnten mit einem verringerten Anteil von vitalen (ca. 6 %) bzw. weniger vitalen Beständen (ca. 45 %; vgl. Abb. 5). Diese Bestände finden sich nur noch auf Standorten geringerer Säuredeposition und höherer Gründigkeit bzw. besserer Basenversorgung.

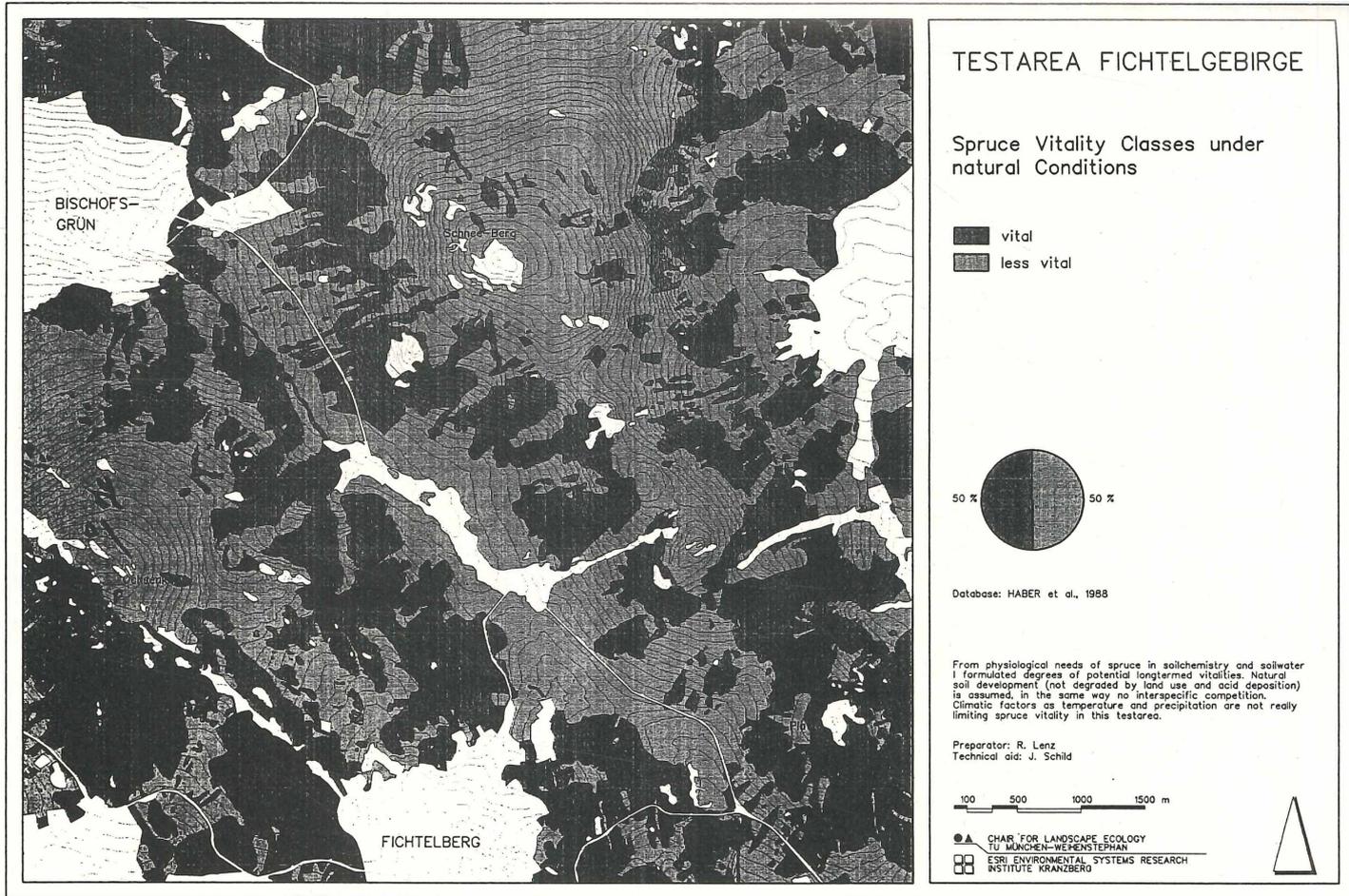


Abb. 4: Fichtenvitalitätsklassen unter natürlichen Bedingungen im Fichtelgebirge

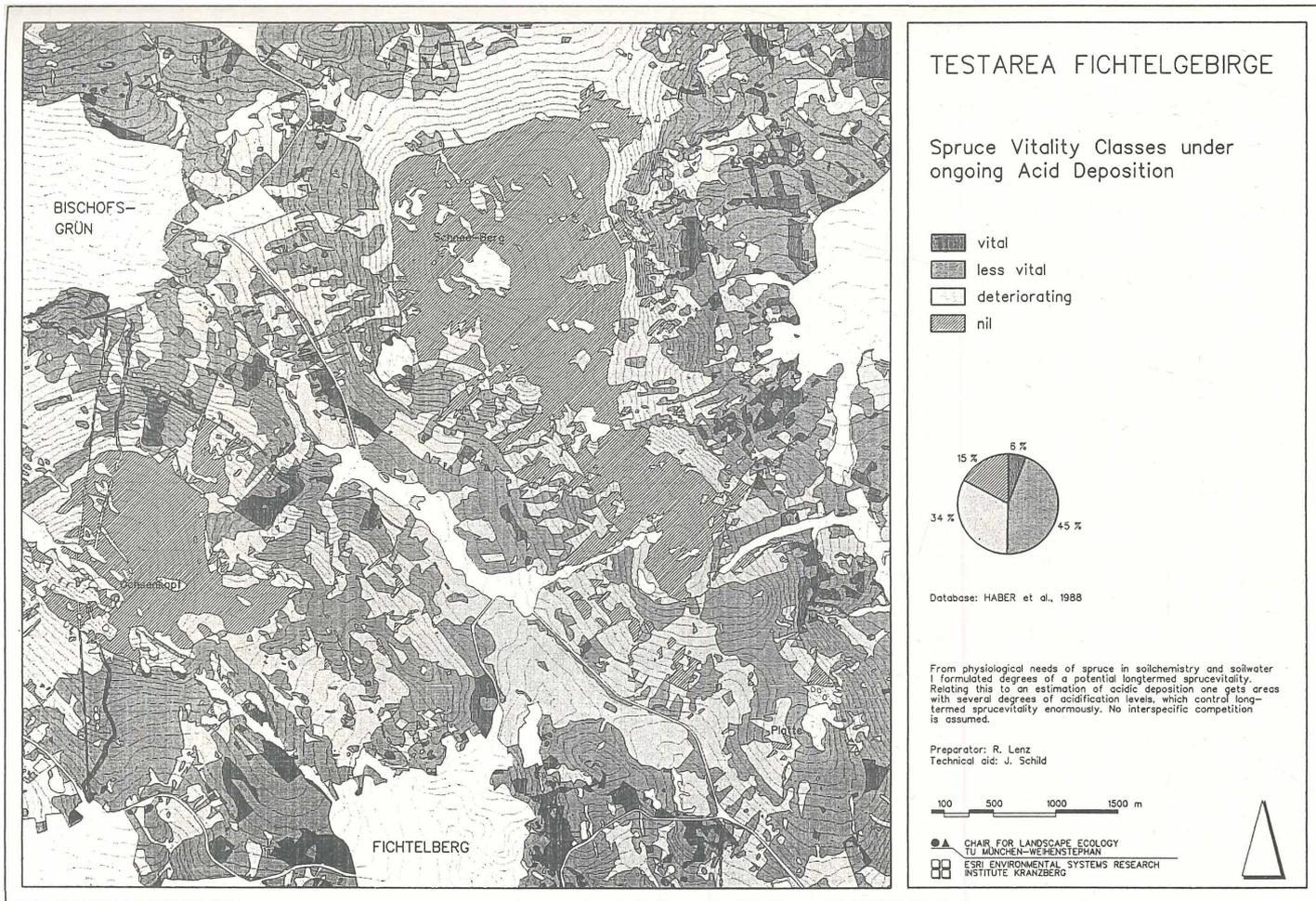


Abb. 5: Fichtenvitalitätsklassen bei weiterer saurer Deposition im Fichtelgebirge

Die Kuppenlagen und Höhenrücken (mit hoher Deposition und z.T. flachgründigeren Böden) sind dann nicht mehr dauerhaft mit Fichten bestockt (Flächenanteil ca. 15 %, Vitalitätsklasse "nil"). Ca. ein Drittel der Bestände befindet sich zudem in Auflösung (Vitalitätsklasse "deteriorating"). Eine Waldschadenskartierung im Jahr 1986 und die derzeit laufende Waldsanierung (Düngung und Umpflanzung bzw. Aufforstung; KOCH 1986) stützen diese Prognose (vgl. LENZ und HABER 1990).

Aus theoretischen Überlegungen der Sukzessionsforschung (v.d. MAAREL 1988) kann diese Entwicklung bis hin zur Auflösung von Fichtenbeständen für die Betrachtungsebenen Ökosystem/Landschaft auch als Retrogression bezeichnet werden. Ob über eine andere Pflanzengemeinschaft, wie die sich dort spontan einstellenden Reitgrasbestände (*Calamagrostis villosa*), diese Retrogression zum Stillstand kommt, bedarf noch weiterer Untersuchungen (vgl. SCHULZE 1989). Zumindest kann über die bessere Nitratverwertung dieser Art(en) und der geringeren Säuredeposition gegenüber Fichtenbeständen mit einer deutlichen Verlangsamung der Retrogression gerechnet werden.

Zeitliche Extrapolation

Zwischen den Ebenen Zelle/Organ und Ökosystem/Landschaft spielen sich zahlreiche genotypspezifische und bestandsregulatorische Vorgänge in Zeithorizonten von Minuten bis Jahrzehnten ab, die je nach rahmengebenden ökosystemaren Bedingungen verschieden ausgeprägt sind. Um deren zeitliche Dynamik zu simulieren, wird das Bestandsmodell (SCHALL 1988) eingesetzt (vgl. Abb. 3).

Die Steuergrößen Magnesiumversorgung und Stickstofffaktor wurden dazu aus den zur Verfügung stehenden Informationen (vgl. SCHULZE et al. 1989) und der Schädigungstheorie abgeschätzt (Tab. 2). Die Läufe a bis e in Abb. 6 sind Simulationsexperimente für 40-60jährige Fichtenbestände (vergleichbar den Jungbeständen in Wülfersreuth und Oberwarmersteinach), die normalerweise in dieser Altersphase eine sehr hohe Nettoprimärproduktion aufweisen. Der anfängliche Magnesium-Nadelgehalt liegt im Optimalbereich ($> 0,8$ mg/g TS). Ausgabegrößen sind Nadelmasse, oberirdische permanente Biomasse, Nadeljahrgänge und Nadelvergilbung (vgl. Ordinatennachse von rechts nach links in Abb. 6). Bei ausreichender Nährstoffversorgung wird ein der Bonität entsprechendes Wachstum bei konstanter Nadelmasse ohne Schadsymptome wiedergegeben (vgl. Tab. 2 und Abb. 6, Lauf a). Die folgenden Läufe b, c und d geben die Reaktion der Fichten auf eine mangelhafte Magnesiumversorgung wieder, wobei die Versorgung mit Stickstoff zur Simulation von Nährstoffimbilanzen variiert wird (vgl. Tab. 2). Tritt gleichzeitig Stickstoffmangel auf (Lauf b), ist die Nadelmasse an den Versorgungsgrad beider Elemente angepaßt, d.h. durch verringerten Nadelaustrieb reduziert. Durch einen entsprechend geringeren Kohlenstoffgewinn ist der Zuwachs vermindert. In dieser Situation treten aber keine wesentlichen Schadsymptome auf.

Tab. 2: Steuerparameter der Simulationsläufe und ihr Bezugsrahmen im statischen Modell

Lauf	Magnesiumversorgung		Stickstoffversorgung (die Nadelbildung variiender Faktor)		Fichtenvitalitätsklassen
		in kg/ha.a			
a	ausreichend	6	normal	1	vital
b	Mangel	4	Mangel	0,8	weniger vital
c	Mangel	4	normal	1	weniger vital
d	Mangel	4	Überschuß	1,2	weniger vital
e	starker Mangel	1,5	normal	1	absterbend

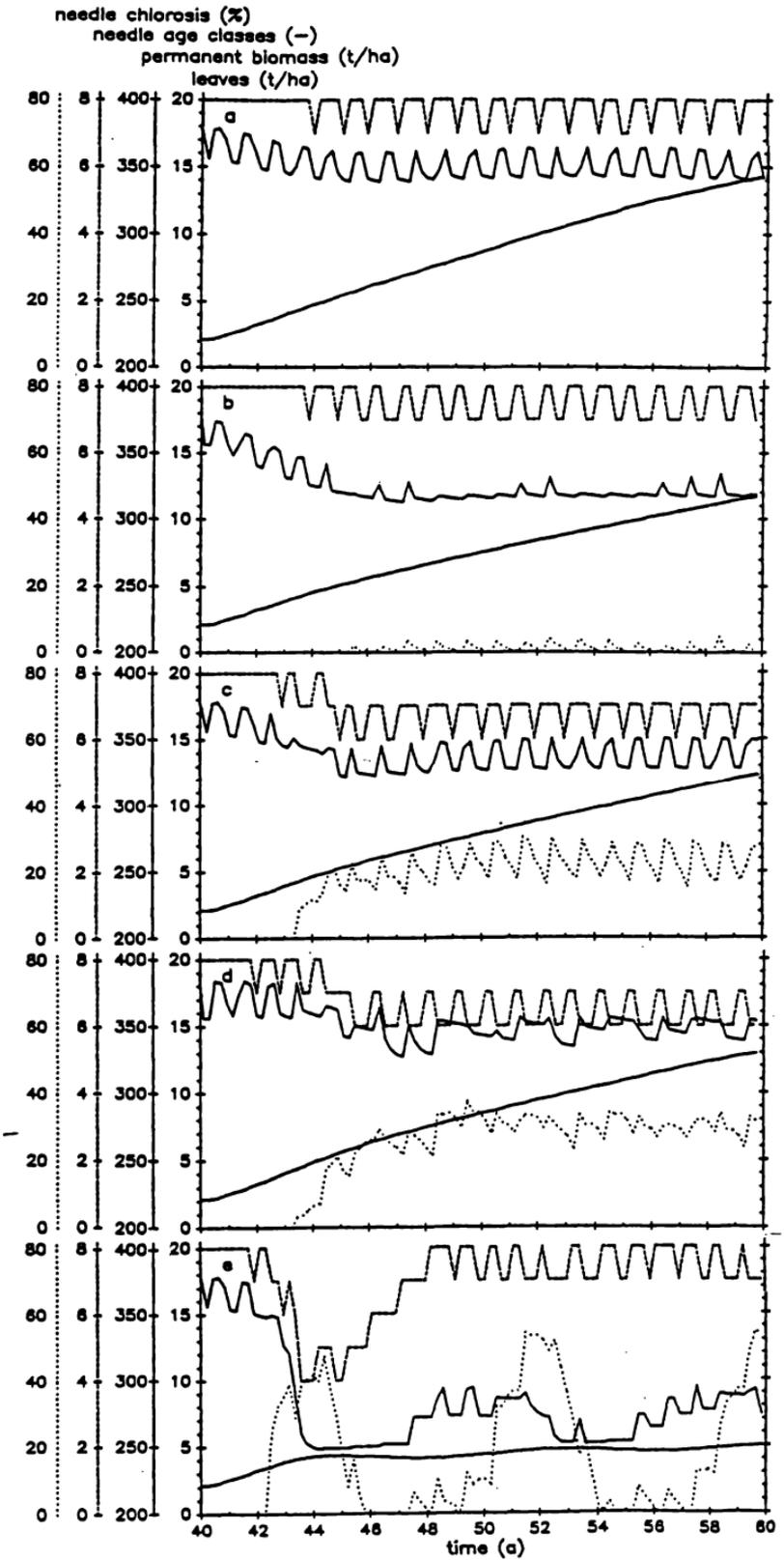


Abb. 6: Modellergebnisse für unterschiedliche Mg/N-Relationen

Ist die Stickstoffversorgung hingegen normal (Lauf c), so kommt es durch einen "normalen" Austrieb zu einer Magnesium-"Verdünnung" in den älteren Nadeln, und der älteste Nadeljahrgang geht verloren. Deshalb ist die Nadelmasse leicht reduziert und zusätzlich treten Vergilbungen auf. Der Zuwachs ist ebenfalls durch den Kohlenstoffgewinn limitiert; in diesem Fall aber eher durch die geringere Assimilationseffizienz bei Magnesiummangel.

Bei Stickstoffüberschuß (Lauf d) ist der Austrieb stark erhöht, mit der Folge stärkerer Magnesium-Verdünnung (= mehr Vergilbung) und höherer Nadelmortalität. Die Nadelmasse als Integral von Austrieb und Abwurf bewegt sich auf dem Niveau von Lauf c. Der Zuwachs ist analog zu Lauf c durch die geringere Assimilationseffizienz reduziert.

Lauf e zeigt die Reaktion der Fichten auf extrem niedrige Magnesiumversorgung. Durch den entstandenen starken Magnesiummangel in den Nadeln, begleitet von hohen Vergilbungsanteilen, reduziert sich die Nadelmasse im Alter von 40-44 Jahren drastisch. Dann gehen die Vergilbungen zurück und nehmen im Laufe der Regeneration der Nadelmasse wieder zu. Die folgende (erneute) Nadelmortalität führt zu erneuter Verminderung der Nadelmassen und Vergilbungsanteile. Die Abfolge: Nadelmassenregeneration, Nadelvergilbung, Nadelverlust und Abnahme der Vergilbung wiederholen sich zyklisch. Nur anfänglich ist dabei die Anzahl der Nadeljahrgänge ein Ausdruck des Nadelverlustes. Später können wieder alle Nadeljahrgänge auftreten, wenn auch mit stark reduziertem Benadelungsgrad (Grenzwertproblem: ab wann ist ein Nadeljahrgang noch vorhanden?). Die Bestandsmasse fluktuiert leicht und nimmt praktisch nicht mehr zu, d.h. der Bestand löst sich auf.

Die Läufe a und c bzw. d könnten ungefähr die Situation in Wulfersreuth (ungeschädigter Bestand) bzw. Oberwarmersteinach (geschädigter Bestand) repräsentieren.

4. DISKUSSION

Die Hierarchisierung einer komplexen Schädigungstheorie, in der die Forschungsergebnisse für verschiedene Betrachtungseinheiten (entsprechend den Richtungen Ökophysiologie, Pflanzenökologie und Ökosystemforschung) integriert sind, erweist sich zur Wissensaufbereitung, -anwendung und -darstellung als hilfreich. Durch sie werden - hier für Fichten und fichtenbestimmte Ökosysteme - wesentliche Schädigungsprozesse in einen umfassenden Struktur- und Prozeßrahmen eingefügt. Damit wird auch die Relevanz respektive Dominanz jeweiliger übergeordneter Organisationsebenen auf die untergeordneten (für die Waldschadensvorgänge im Fichtelgebirge) deutlich. Dies ist ein notwendiger Schritt, um Forschungsergebnisse für politische Entscheidungsträger sowie für Maßnahmenplanungen aufzubereiten und Anhaltspunkte für weitere Schwerpunktforschung zu liefern. Aus der Hierarchisierung wird auch deutlich, daß eine hochsignifikante Beziehung zwischen Zustandsgrößen weiter voneinander entfernter Organisationsebenen (selbst bei ausgesprochen großem Stichprobenumfang) nicht erwartet werden kann, denn das dazwischen liegende System kann mehrfaktoriell/nichtlinear reagieren und zusätzliche Steuerparameter können auftreten. Demzufolge sind Vergleiche zwischen z.B. Nadelspiegelwerten und Austauschbelegungen im Boden - in den Ebenen (Abb. 3) von oben nach unten gegangen - (zumindest) abhängig von Nadelalter, Baumwachstumsphase, Bestandsdichte, Nährstoffaufnahmevermögen und tatsächlicher Verfügbarkeit.

Reine Korrelations- und Regressionsanalysen können nur dann interpretierbare Aussagen liefern, wenn ein Fließgleichgewicht (in der Terminologie der Thermodynamik = stationärer Zustand) in jeder der Organisationsebenen vorliegt. Dies ist bei stärkeren Eingriffen bzw. Beeinflussungen von Schlüsselprozessen i. d. R. nicht der Fall.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die räumliche oder zeitliche Extrapolation wissenschaftlicher Theorien mittels Modellen. Dabei ist zu beachten, daß Organisationsebenen typischen Reaktionszeiten und räumlichen Dimensionen zugeordnet sind und sich daher das Problem von entweder zeitlicher Schärfe und räumlicher Unschärfe oder räumlicher Schärfe und zeitlicher Unschärfe ergibt.

Auf der Ökosystem/Landschaft-Ebene wurde daher ein Simulationsmodell benutzt, das die (bei dem derzeitigen Daten- und Wissensstand mögliche) räumliche Schärfe bei zeitlicher Unschärfe hervorhebt; im Gegensatz zu dem RAINS-Modell des IIASA (vgl. AICAMO et al. 1987), wo auf dieser Ebene für eine ähnliche Fragestellung ein deterministisch-dynamisches Modell benutzt wird, obwohl die hierzu benötigte Prozeßkenntnis und Datenbasis noch sehr lückenhaft bzw. unscharf ist.

Auf der Genotyp- und Organebene dagegen wurde ein dynamisches Modell verwendet, das räumlich nur ungenau zu lokalisieren ist; im Gegensatz z.B. zu einer Rasterkartierung von Nadelspiegelwerten, wo dementsprechend der Aufnahmezeitpunkt und die Ausstattung benachbarter Nadeljahrgänge die kritischen Größen sind.

Die beschriebenen Modellierungen basieren zwar auf einer Vielzahl neuerer Kenntnisse zum Waldschadensgeschehen bei der Fichte im Fichtelgebirge, sie zeigen aber auch noch deutliche Lücken auf. Bei der räumlichen Extrapolation ist die (vorwiegend zeitliche) Unschärfe auf fehlende Daten der tatsächlichen Depositions-, Mineralisations- und Silikatverwitterungsraten zurückzuführen. Die räumliche Charakterisierung müßte durch Tiefengradienten der Bodenparameter pH und Basensättigung (neben weiteren bodenmorphologischen Typisierungen und Angaben zur tatsächlichen Durchwurzelung) ergänzt werden. Bei der zeitlichen Extrapolation sind genotypspezifische Annahmen zu überprüfen sowie deren Steuerung. Dabei ist z.B. die Frage der Dominanz von Mg-Versorgung gegenüber dem Energiehaushalt (unter Stickstoffeinfluß) noch weitgehend offen.

Trotz der noch offenen Fragen erscheint es uns notwendig, wissenschaftliche Erkenntnisse in politisch umsetzbare Aussagen zu übersetzen. Dabei liegt die zentrale Fragestellung darin, wie explizit auf bestehende Theorien zugegriffen wird und ob dabei adäquate Vorgehensweisen ausgewählt und formuliert werden.

Die Verknüpfung der beiden Bereiche "Wissenschaftliche Forschung" und "Politische Analysen" kann z.B. über Forschungsbeiräte und Projektträgerschaften erfolgen (wie derzeit üblich) und, in einer ziemlich konventionellen Weiterentwicklung, als sog. "integrated assessment" als eigener Forschungs- und Entwicklungsbereich ausgebaut werden (vgl. z.B. STREETS 1989). Im Idealfall sind die Kreisläufe (vgl. Abb. 1) jedoch durch gleiche Theorien eng verknüpft. Inwieweit noch unterschiedliche Modelle für Technologie und Wissenschaft verwendet werden oder als Optimum ein gemeinsames Modell eingesetzt wird, das Vorhersagen machen und Hypothesen testen kann, hängt von dem Erkenntnisstand und der Aufgabenstellung ab.

Wir danken dem BMFT für die finanzielle Förderung der Datenaufbereitung im zugrundeliegenden Projekt (HABER et al. 1991).

LITERATUR

- ALCAMO J., AMANN M., HETTELINGH J.P., HOLMBERG M., HORDIJK L., KÄMÄRI I., KAUPPI L., KAUPPI P., KORNAI G., MÄKELÄ A., 1987: Acidification in Europe: A simulation model for evaluating control strategies. - AMBIO Vol. 16 No. 5: 232-245.
- BACHHUBER R., LANG R., LENZ R., HABER W., 1991: Dokumentation und Übergabe der Daten zur Hypothesensimulation zum Waldsterben an die Ökosystemforschungszentren Göttingen und Bayreuth. - Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme Göttingen, Bd 21, Reihe B.
- HABER W., 1979: Theoretische Anmerkungen zur ökologischen Planung. - Verhdlg. Ges. f. Ökologie VII: 19-30.
- HABER W., LENZ R., SCHALL P., BACHHUBER R., GROSSMANN W.D., TOBIAS K., KERNER H.F., 1991: Prüfung von Hypothesen zum Waldsterben mit Einsatz dynamischer Feedbackmodelle und flächenbezogener Bilanzierungsrechnung für vier Schwerpunktforschungsräume der Bundesrepublik Deutschland. - Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme Göttingen, Bd. 20, Reihe B.
- HAUHS M., 1989: Ökosystemmodelle: Wissenschaft oder Technologie? - In: BRECHTEL H.-M. (Hrsg.): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer? DVWK Mitteilungen 17: 351-366.
- KAUPENJOHANN M., 1989: Chemischer Bodenzustand und Nährelementversorgung immisionsbelasteter Fichtenbestände in NO-Bayern. - Byer. Bodenkdl. Ber. 11.
- KOCH H., 1986: Intensivierung durch Sanierungs- und Waldverjüngungsmaßnahmen im Fichtelgebirge. - AFZ Jg. 41, H. 16/17: 377-381.

- LANDSBERG I., 1986: Physiological ecology of forest production. - London, Academic Press.
- LENZ R., HABER W., 1990: Longterm assessment of spruce vitality in the Fichtelgebirge (West Germany) under ongoing acid deposition. - *Vegetatio* 89: 121-135.
- LENZ R., SCHALL P., 1989: Darstellung waldschadensrelevanter Ökosystembeziehungen als Grundlage von dynamischen Modellen und Hypothesensimulationen am Beispiel der Stickstoffhypothese. - *Verhdlg. Ges. f. Ökologie XVII*: 633-641.
- MAAREL E. v.d., 1980: Towards an ecological theory of natur management. - *Verhdlg. Ges. f. Ökologie VIII*: 13-24.
- REIF A., 1989: The vegetation of the Fichtelgebirge: Origin, site conditions, and present status. - In: SCHULZE E.-D., LANGE O.L., OREN R. (eds): Forest decline and air pollution. *Ecol. Studies* 77: 8-22.
- SCHALL P., 1988: Fichtenwald, ein dynamisches Simulationsmodell zur Reproduktion von Waldschadenssymptomen bei der Fichte. - Diplomarbeit am Lehrstuhl f. Landschaftsökologie, TU München-Weihenstephan, unveröffentlicht.
- SCHULZE E.-D., 1989: Die Wirkung von Immissionen auf Fichtenökosysteme - Ergebnisse der Waldschadensforschung im Fichtelgebirge. - *GSF-Bericht* 6/89: 95-106.
- SCHULZE E.-D., LANGE O.L., OREN R., 1989: Forest decline and air pollution. A study of spruce (*Picea abies*) on acid soils. - *Ecological Studies* 77.
- STREETS D.G., 1989: Integrated assessment: Missing link in the acid rain debate? - *Environmental Management* Vol. 13, No. 4: 393-399.
- TOBIAS K., BACHHUBER R., GROSSMANN M., 1989a: Landschaftsinformationssystem: Methodischer Beitrag zur Ökosystemforschung am Beispiel von vier Schwerpunktforschungsräumen der Bundesrepublik Deutschland. - *Verhdlg. Ges. f. Ökologie XVII*: 627-631.
- TOBIAS K., LANG R., LENZ R., SCHALL P., 1989b: Flächenbezogene Abschätzungen der Depositionsmengen von Protonen, Stickstoff, Calcium und Magnesium in vier Schwerpunktforschungsräumen der Bundesrepublik Deutschland. - *Geo-Informationssysteme*, 2. Jg., H. 4:26-32.
- YODA T., KIRA T., OGAWA H., HOZUMI K., 1963: Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. (Intraspecific competitions among higher plants XI). - *Institute Polytechnics, Osaka City University, Series D* 14: 107-112.

ADRESSE

Dipl. Agr. biol. Roman Lenz
 Dipl. Ing. Peter Schall
 Lehrstuhl für Landschaftsökologie
 der TU MÜNchen-Weihenstephan
 D-W-8050 Freising 12

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1991

Band/Volume: [19 3 1991](#)

Autor(en)/Author(s): Schall Peter, Lenz Roman

Artikel/Article: [Theorie und Modellierung von Waldschadensprozessen im Fichtelgebirge - ihre hierarchische Strukturierung und technologische Anwendung 647-661](#)