

Modellierung der Vegetationsdynamik in Wäldern Simulationsmodelle in der forstlichen Vegetationskunde

- Anton Fischer, Freising -

Abstract: Modelling forest vegetation dynamics Conceptual models are designed to analyse the main elements of complex systems and their interrelationships in regard to specifically formulated research objectives. Since these interrelationships are not quantified within the frame of a conceptual model, conceptual models per se can not be verified statistically. However, with elements and their mathematical interdependencies clearly defined and by formulating specific parameters accordingly, conceptual models can be transformed into simulation models. In forest vegetation science simulation models aimed at analysing developmental processes in forests are becoming more important during the past years.

By presenting two examples, (i) the „Beech Forest Model“ of Ch. NEUERT and (ii) FORSKA-M used to model forest regeneration after wind throw, the potentials of simulation models and their relevance to forest vegetation research are discussed. If simulated developmental processes show great similarity to developmental processes observed in the field, elements of the systems under investigation seem to be sufficiently and accurately described and defined within the model. One of the important prerequisites of introducing simulation models into forest vegetation science is the availability of appropriate data sets of observed forest stand developments which can be compared with the results of simulation runs.

In the case of the Beech Forest Model, major trends regarding the spatial and temporal differentiation of distinct developmental phases in beech forests can be obtained and thus key results, i.e. concerning minimum areas of beech forest protected areas, be formulated. In the case of simulations of stand development after wind throw events in close-to-nature spruce forest ecosystems the comparison of observed data with simulated development shows that the model - as can be said after 15 years of field data recording - accurately and verifiably pictures the general developmental processes but that it also proves to be insufficient in accurately modeling the development of the breast-height diameter. Simulation models, especially individual-based models, are a main part of the reorientation from descriptive to process-analysing vegetation science.

1. Einleitung

Wie die meisten Naturwissenschaften ist auch die Vegetationskunde aus einem im Wesentlichen deskriptivem Ansatz hervorgegangen. Über Jahrzehnte hinweg wurden in allen Vegetationstypen Europas (und mittlerweile weit darüber hinaus) Bestandesdokumentationen (pflanzensoziologische Aufnahmen) durchgeführt, im Rahmen einer großen Zahl von Einzelstudien publiziert sowie in Form überregionaler Übersichten zusammengeführt und ausgewertet (z.B. für Niedersachsen: PREISING et al. 1990 ff; für Süddeutschland: OBERDORFER 1977-92; für Deutschland: Synopsis der Pflanzengesellschaften Deutschlands, beginnend

1996 mit den *Erico-Pinetea*, HÖLZEL et al. 1996; für Österreich: GRABHERR, MUCINA, WALLNÖFER & ELLMAUER 1993; für die Niederlande: SCHAMINEE et al. 1995-99; für Großbritannien: RODWELL 1991-2000). Der Kenntnisstand über die Vegetation, betrachtet auf der Ebene floristisch definierter Gesellschaften, ist in Europa und Japan besonders umfassend, und auch in anderen Teilen der Erde geht er mittlerweile oft weit über Anfangsstadien hinaus.

Sehr früh in der vegetationskundlichen Forschung ist der Aspekt der Veränderlichkeit von Vegetationsbeständen erkannt und aufgegriffen worden. Eine aktuelle Übersicht über Stand und Entwicklung der Sukzessionsforschung gab im Rahmen der RTG-Tagung 1999 FISCHER (1999); hingewiesen sei auch auf die Symposiumsberichte der IVV-Tagungen von 1967 (TÜXEN & SOMMER 1979), 1973 (SCHMIDT 1975) und - mit Schwerpunkt auf den Wäldern - von 1981 (DIERSCHKE 1982). Auch hier stand lange Zeit der beschreibende Aspekt im Vordergrund des wissenschaftlichen Zugangs: Beobachtungsflächen wurden fest markiert (die erste Dauerfläche wurde wahrscheinlich von Braun-Blanquet 1917 im Schweizer Nationalpark eingerichtet, BRAUN-BLANQUET 1931) und über einen mehr oder weniger langen Zeitraum wiederholt aufgenommen. Da dies sehr langwierig ist, besonders in Wäldern, wurde häufig ein Schluss vom räumlichen Nebeneinander auf das zeitliche Nacheinander gezogen, ein Verfahren, was wenigstens in besonders günstig gelagerten Fällen zu überzeugenden Resultaten führen kann (z.B. THIELE 1978; FISCHER 1982, vergl. dazu FISCHER 1999). Zunehmend wurden aber auch experimentelle Langzeit-Dauerflächenversuche eingerichtet: von W. Lüdi 1930 in einem Borstgrasrasen in 2.000 mNN (Schynige Platte bei Interlaken/Schweiz, LÜDI 1959), fortgeführt von O. Hegg und Mitarbeitern (HEGG 1992, HEGG et al. 1992), von K.F. Schreiber in Süddwestdeutschland (SCHIEFER 1981, SCHREIBER 1997) und von W. Schmidt im neuen Botanischen Garten in Göttingen (SCHMIDT 1981, 1993).

In den zurückliegenden Jahrzehnten ist in der Vegetationskunde/Geobotanik allgemein wie auch speziell in der Vegetationsdynamik-Forschung die Suche nach den Prozessen, welche zu den beobachteten floristischen Zuständen (den Pflanzenbeständen bzw. den Pflanzengesellschaften einschließlich ihrer Standortbindung) führen und der beobachteten Veränderlichkeit der Vegetationsbestände zu Grunde liegen, verstärkt worden. Hierbei stellt neuerdings die Modellierung ein wichtiges Hilfsmittel dar. Auf der RTG-Tagung 1999 (FISCHER 1999) konnte - dem damaligen Stand entsprechend - in Bezug auf Sukzessionsforschung erst ein eher knapper Abriss geben werden. Heute kann dieser, gerade auch im Hinblick auf Wälder, bereits tiefergehender ausfallen. Der vorliegende Beitrag ist auf konzeptionelle Modelle und auf Simulationsmodelle fokussiert.

2. Konzeptionelle Modelle

Konzeptionelle Modelle (auf Englisch „conceptual models“, manchmal im Deutschen auch als „Konzept“ bezeichnet) sind auf das Grundsätzliche reduzierte Darstellungen von Systemen, d.h. der wesentlichen Elemente des betrachteten Systems und deren grundsätzlichen Beziehung zueinander, entweder mit Worten umschrieben oder graphisch dargestellt (deshalb auch „verbale“ bzw. „graphische Modelle“ genannt). Gut bekannte (und z.T. in FISCHER 1999 bereits genannte) Beispiele sind die von EGLER (1954) als alternative Eckpunkte formulierten Sukzessionsmodelle der „Relay Floristics“ bzw. der „Initial Floristic Composition“, speziell auf Wälder bezogen das auf LEIBUNDGUT (1959) zurückgehende Wald-Entwicklungsphasenmodell sowie das „Mosaik-Zyklus-Konzept“ von REMMERT (1991).

Als Beispiel sei ein aktuell entwickeltes konzeptionelles Modell vorgestellt, das von BRANG et al. (in Vorb.) zur *Darstellung des Entscheidungsfindungsprozesses in Bezug auf Schutzwaldbestände im Gebirge* entwickelt wurde (Abb. 1). Es geht um den *permanenten Schutzeffekt von Gebirgswaldbeständen* gegen Erosion, Steinschlag, Schneelawinen usw. - In

diesem konzeptionellen Modell kommt zum Ausdruck: Die Schutzwirkung eines Schutzwaldes im Gebirge hängt unmittelbar von der Bestandessituation ab, also von Artenzusammensetzung, Baumartenregeneration und Altersstruktur, von der Bestandesdichte, der Bestandesstruktur und der Einzelbaumstabilität; diese Parameter werden ihrerseits durch die Standortbedingungen (Klima, geologischer Untergrund, Boden usw.) und durch natürliche Störungen wie Sturm bzw. Sturmwurf, Borkenkäfer, Schneelawinen usw. beeinflusst - daneben entscheidend durch die waldbaulichen Maßnahmen. Die im Bestand durchgeführten waldbaulichen Maßnahmen hängen von einem Entscheidungsfindungsprozess auf der Ebene der Forstbetriebseinheit (z.B. Forstamt, Forstrevier) ab, der seinerseits u.a. von Marktbedingungen, Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte, rechtlichen und politischen Vorgaben sowie Tradition und knowhow, also sozioökonomischen Aspekten abhängt. - Das Modell benennt die zentralen Elemente und zeigt, welches Element auf welches wirkt (Pfeile).

Eine völlig andere Thematik behandelt das konzeptionelle Modell zur Schlüsselrolle von Solitärbäumen in Savannen-Ökosystemen (JELTSCH et al. 1995, JELTSCH et al. 1998; Abb. 2); hier geht es um die Regeneration einzeln stehender Bäume in Konkurrenz mit den Savannen-

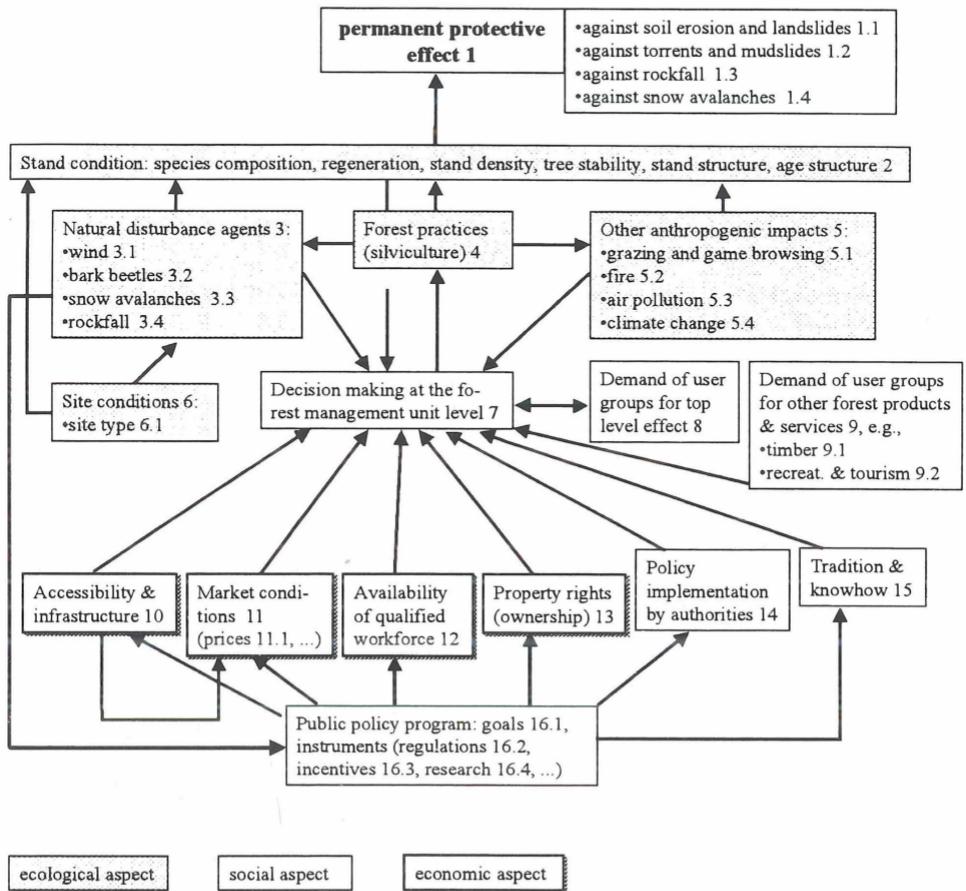


Abb. 1: Konzeptionelles Modell des Entscheidungsfindungsprozesses in Bezug auf Schutzwaldbestände im Gebirge (aus: BRANG et al. in Vorb.).

Fig. 1: Conceptual model of the decision-making process in a protection forest at the stand level (from: BRANG et al. in prep.)

gräsern. Die Regeneration hängt nach Aussage des konzeptionellen Modells primär von der Populationsstruktur der beteiligten Baumarten sowie der Dichte und Verteilung der Individuen ab; ihrerseits werden diese vom Lebenszyklus der einzelnen Arten und den Etablierungsbedingungen sowie der Mortalität bestimmt, wofür, in unterschiedlichen Abhängigkeitsbeziehungen, u.a. Wasserverfügbarkeit, Brände und Beweidung maßgeblich sind.

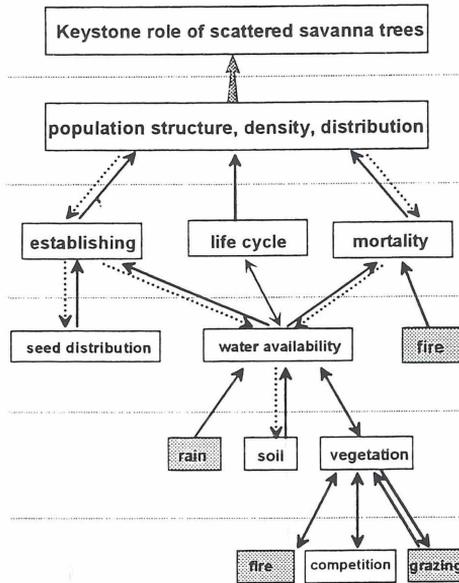


Abb. 2: Konzeptionelles Modell zur Existenz von Solitäräbäumen in Savannen (aus: JELTSCH et al. 1995).

Fig. 2: Conceptual model of the key role of scattered savanna trees (from: JELTSCH et al. 1995).

Unabhängig vom konkreten Sachzusammenhang wird aus den beiden Beispielen deutlich:

- Im konzeptionellen Modell kommt es auf die wesentlichen (oder besser: die dem Modellbildner als wesentlich erscheinenden) *Elemente* und ihre *grundsätzliche Verknüpfung* an.
- Das Modell ist stets auf eine bestimmte *Fragestellung* hin ausgerichtet und ändert sich sofort, sobald die Fragestellung geändert wird (z.B. von Schutzwald- auf Erholungsfunktion des Waldbestandes).
- Das Modell ist *skalenabhängig* (im erstgenannten Beispielfall: Forstbetriebs-Ebene)
- Die Beziehungen sind *nicht quantifiziert*, höchstens wird eine Wirkungsrichtung angegeben (Pfeil); das Modell ist damit statisch.

Konzeptionelle Modelle wollen und können also lediglich *die wesentlichen Elemente eines Systems und deren grundsätzliche Verknüpfungen* herausarbeiten. Mit der Entwicklung des Modells will sich der Modellbearbeiter selbst herausfordern, das grundsätzliche Zusammenspiel der relevanten Elemente zu verstehen. - Hier endet die Bedeutung des konzeptionellen Modells. Ob das Modell die Zusammenhänge vollständig und richtig darstellt, kann nicht überprüft und bewiesen, sondern lediglich plausibel gemacht werden.

3. Simulationsmodelle

Allerdings bieten konzeptuelle Modelle die Option der Weiterentwicklung. Wenn es gelingt, (1) die Inhalte der in den Abb. 1 und 2 dargestellten Boxen zu definieren und zu ska-

lieren, (2) die Beziehung der Elemente mathematisch zu fassen (Parameter $\text{boxB} = f_{\text{Parameter boxA}}$) und (3) ein zeitliches Ablaufschema zu hinterlegen, dann wird aus dem statisch-beschreibenden ein „lebendes“ Modell, ein Simulationsmodell. Durch Vergleich der Simulationsläufe mit der beobachteten Realität lässt sich dann überprüfen, ob bzw. in welchem Maße das Modell fähig ist, reale Abläufe nachzuzeichnen, in welchem Maße es also die Zusammenhänge adäquat darstellt.

Simulationsmodelle bestimmen heute die Vorstellungen über die nähere Zukunft des Menschen stark bis hin auf die globalpolitische Ebene; beispielhaft sei auf die weltweit geführte, in erheblichem Maße auf Klima-Simulationsmodellen basierende Diskussion zum „global change“ hingewiesen (IPCC 2001). Gerade deshalb ist es aber wichtig zu realisieren, dass Simulationsmodelle nicht die Zukunft vorhersagen sondern lediglich die Zusammenhänge und quantifizierten Interaktionen, von denen Fachleute glauben, dass sie das System gut beschreiben, auf eine mehr oder weniger lange Zeitachse extrapolieren. Wesentliche wissenschaftliche Funktion von Simulationsmodellen ist es, berechnete Entwicklungen mit den real abgelaufenen und gemessenen Entwicklungen zu vergleichen: Wenn beide Abläufe gut übereinstimmen spricht das dafür, dass die Systemelemente und ihre Verknüpfung verstanden und auch quantitativ richtig erfasst sind. Struktur und Funktionsweise des Systems sind dann anscheinend wenigstens in den Grundzügen dargestellt.

Zwei jüngst erarbeitete, auf Walddynamik bezogene Simulationsmodelle, werden hier beispielhaft behandelt.

3.1 Buchenwaldmodell

Auf die Analyse der Walddynamik ausgerichtet ist das unlängst von NEUERT (1999) publizierte, am UfZ Leipzig-Halle erarbeitete sog. „Buchenwaldmodell“. Es ist ein gitterbasiertes Modell: Der untersuchte „Wald“ ist in Raumeinheiten von $14,3 \times 14,3$ m Grundfläche und eine Höhe von 40 m unterteilt, ein Raumausschnitt, der etwa dem von einer ausgewachsenen Buche eingenommenen Raum entspricht. Die Eingangsgrößen in das Modell sind drastisch reduziert: (1) Der „Wald“ besteht ausschließlich aus Buche. (2) Er ist in 4 Straten unterteilt: Hauptkronendach, untere Kronenschicht, Jungbuchen, Sämlinge. (3) Nur wenige Zustandsvariable werden betrachtet, insbesondere Individuenzahl, Höhe, Alter und Kronenschirmfläche. (4) Auf der Prozessebene gehen im Wesentlichen ein: Schließen von Kronenlücken bzw. Einwachsen von einer Schicht in die nächste sowie die damit verbundene Konkurrenz, die zum Absterben von Individuen führt; Verjüngung. (5) Nur zwei Nachbarschaftswirkungen werden einbezogen: gegenseitige Modifikation des Lichtangebotes (Beschattung) sowie Einfluss sturmgeworfener Bäume auf die Nachbarn und die Individuen in den unteren Schichten.

Mit diesen Simplifizierungen entsteht im Simulationslauf ein Bestandesmuster, das durchaus in Buchen-Urwäldern wiederzufinden ist: (1) Ein Mosaik von Bestandes-Entwicklungsphasen entsteht. (2) Die Phasen folgen im Zeitverlauf in der richtigen Reihenfolge aufeinander. (3) Die Flächengröße der einzelnen Phasen liegt in der in realen urwaldartigen Beständen zufindenden Größenordnung (kleiner 1 ha). (4) Der Zeitbedarf zum Durchlaufen der Phasen entspricht mit wenigen hundert Jahren etwa dem realen Zeitverlauf. - D.h. das simple Wald-Konzept (conceptual model) und die gemachten Quantifizierungen beschreiben reale Buchenwaldbestände anscheinend in den Grundzügen richtig.

Damit kann man das Buchenwaldmodell heranziehen, um praktische Aussagen abzuleiten. So zeigt sich, dass sich die genannten Wald-Eigenschaften bei einer zu Grunde gelegten Bestandesfläche von etwa 20 bis 30 ha einstellen; ein Buchenwald-Naturwaldreservat sollte also pro Gesellschaft eine Mindestflächengröße von ca. 20 bis 30 ha haben, um aus sich selbst heraus langfristig existenzfähig zu sein (detailliertere Ausführungen dazu in FISCHER im Druck).

Das Beispiel macht deutlich: Vegetationsdynamik ist stark mit Strukturbildung verknüpft. Als weiteres diesbezügliche Beispiel sei auf das Simulationsmodell von LEJEUNE & TLIDI (1999) zur Entstehung von Streifenmusterbildungen in Gehölzbeständen in Trockengebieten Afrikas verwiesen.

3.2 FORSKA-M, naturnahe Fichtenwälder im Nationalpark Bayerischer Wald

Im Nationalpark Bayerischer Wald riss ein kurzer, aber heftiger Sturm am 1.8.1983 größere Lücken in das bestehende Waldkleid; insbesondere waren die naturnahen Fichtenwälder der vernässten und von Kaltluft beeinflussten Tallagen (pnV: *Calamagrostio villosae-Piceetum*) davon betroffen. In Teilen des Nationalparks wurden die Flächen geräumt, unterlagen danach aber keinerlei Eingriff des Menschen mehr; in der Reservatszone des Nationalparks blieben die Sturmwurfflächen von Beginn an völlig sich selbst überlassen. Im Jahre 1988 wurde ein Set von Dauerflächen installiert, auf dem - in einem fünfjährigen Rhythmus wiederholt - Vegetationserhebungen durchgeführt werden. Die Erhebungen umfassen (1) die pflanzensoziologische Dokumentation der Bodenvegetation (nach Braun-Blanquet) und (2) die genaue Dokumentation des Gehölzbestandes auf Individuenebene: Für jedes Baumindividuum größer 1 m werden die Position auf der Dauerfläche, die Höhe, der BHD und bei größeren Bäumen die Kronenansatzhöhe bestimmt, ergänzend für die Gehölzverjüngung kleiner 1 m die Zahl der Verjüngungspflanzen auf der Fläche ermittelt (FISCHER et al. 1990, FISCHER 1992, 1996). Die Ersterhebung fand 1988 statt, die bisherigen Wiederholungserhebungen 1993 und 1998.

Grundsätzlich lassen sich bisher zwei Entwicklungsgänge unterschieden (FISCHER & JEHL 1999): (1) auf den *geräumten* Flächen eine Abfolge von einer Schlagflur zu einem Birken-Vorwald sowie neuerdings Aufkommen der Schlusswaldbaumart Fichte, (2) auf den *belassenen* Flächen dagegen im Wesentlichen sofort eine Regeneration der Schlusswaldbaumart Fichte; Schlagflur und Vorwald sind hier räumlich stark begrenzt und auf die Wurzelteller der beim Sturmereignis gefallenen Bäume konzentriert.

Die mittlerweile eine 15-jährige Bestandesentwicklung nach Sturmwurf umfassende Dauerbeobachtungsstudie stellt eine einmalige Datensammlung zur Waldentwicklung vergleichend *völlig freie* und *forstlich beeinflusste* Bestandesentwicklung dar. - Hier bietet sich jetzt die Möglichkeit, mittels geeigneter Modelle (1) die bisher beobachtete Entwicklung „fortzuschreiben“ und mit den Erwartungen zu vergleichen, (2) den Einfluss ökosystemarer Interaktionen zu testen, z.B. die Bestandesentwicklung auf Basis der zu einem gewählten Zeitpunkt vorhandenen Bäume größer 1 m im Vergleich mit Bestandesentwicklung unter Einbezug der zusätzlich vorhandenen Verjüngung kleiner 1 m, (3) die simulierte mit der tatsächlich beobachteten Entwicklung zu vergleichen (für einen Wald ist der 15-jährige Zeitraum allerdings noch sehr kurz, die Option wächst aber mit der Zeit) und (4) den Einfluss des Standortes auf die Bestandesentwicklung (z.B. „global change“) zu testen. - Da die Datenbasis den Zustand auf der Ebene der einzelnen Baumindividuen erfasst ist hier ein *individuenbasiertes Modell* zielführend.

FORSKA-2 ist ein solches für boreale Wälder Skandinaviens entwickeltes individuenbasiertes Simulationsmodell (PRENTICE et al. 1993). Am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung wurde es unter dem Namen FORSKA-M für Wälder des temperaten Mitteleuropas adaptiert, entsprechend kalibriert sowie erweitert (LASCH et al. 1999, LINDNER 2000). Es simuliert die langfristige Entwicklung der Baumartenzusammensetzung unter dem Einfluss von klimatischen und edaphischen Standortfaktoren. Jeder Baum wird durch Höhe, BHD, Kronenansatz, Alter und Artzugehörigkeit definiert. Die Entwicklung des Waldbestandes wird auf

einer Fläche definierter Größe, hier jeweils 10 x 10 m, mittels der Prozesse des Wachstums, der Verjüngung und der Mortalität beschrieben. Die Bäume konkurrieren im Modell um Licht sowie um den pflanzenverfügbaren Stickstoff und unterliegen einem definierten Bodenwasserhaushalt. Wesentliche meteorologische Parameter (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) gehen in täglicher Auflösung ein und beeinflussen die jährlichen Zuwachsraten; die meteorologischen Daten basieren auf Monatsmitteln des Referenzzeitraums 1931-60, wurden unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit auf das Untersuchungsgebiet interpoliert und mittels eines Wettergenerators (BÜRGER 1997) zu Tageswerten disaggregiert. Parameter des Bodens sind horizontbezogen und werden mittels Übertragungsfunktionen abgeleitet; als Bezug dienen dabei die bodenphysikalischen Eigenschaften der Horizonte des Wassersinzugsgebietes der Großen Ohe im Nationalpark Bayerischer Wald (KENNEL 1998), woraus auch die Stickstoffverfügbarkeit abgeleitet wurde (mittlere jährliche Mineralisationsrate von $3,6 \text{ kmol ha}^{-1}$). Erste Ergebnisse der Simulation der Daten des Nationalparks Bayerischer Wald wurden auf der IAVS-Tagung in Nagano 2000 präsentiert (FISCHER et al. im Druck)

Die Bestandesentwicklung wird in Jahresschritten gerechnet. Da einige dieser eingehenden Parameter mit Zufallsvariablen verknüpft sind, werden jeweils 30 Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Dargestellt wurde bisher vorzugsweise die Biomasse im Zeitverlauf, wobei 100 Simulationsjahre zu Grunde gelegt werden. Die in Abb. 3 und 4 dargestellten Biomasseanteile der Baumarten sind kumulativ dargestellt, d.h. die obere Kurve gibt die Gesamtbiomasse an, aufgeteilt auf die beteiligten Baumarten.

Mit dem Modell kann also die Waldbestandesentwicklung simuliert werden abhängig von (1) der initialen Bestandeszusammensetzung, (2) den Wachstumsparametern der beteiligten Gehölze und (3) den Standortfaktoren (Boden, Klima).

Simulierte Entwicklung ab Zustand 1998

Ausgehend vom Zustand des Gehölzbestandes (alle Gehölze größer 1 m) im Jahre 1998, also 15 Jahre nach dem Sturmereignis, wurde die Bestandesentwicklung getrennt für jede belassene und geräumte Fläche à 10 x 10 m Größe berechnet (eine geräumte Fläche wegen Dominanz von Fichten-Überhältern nicht berücksichtigt; insgesamt 24 belassene und 12 geräumte Flächen berechnet). Da innerhalb der geräumten bzw. belassenen Bestände die Entwicklung mit wenigen Ausnahmen (z.B. wenn ein Baum-Exemplar den Sturm überdauert hatte) sehr einheitlich verlief, wurden die Ergebnisse zu einem Diagrammpaar geräumt/belassen zusammengefasst (Abb. 3).

An der Bestandesentwicklung sind insgesamt vier Gehölzarten beteiligt. Zwei von ihnen (*Populus tremula* und *Sorbus aucuparia*) treten aber in so geringer Menge auf, dass sie - obwohl in die Simulationsläufe einbezogen - doch in den Diagrammen nirgendwo sichtbar werden: nur Birke (*Betula pendula* und/oder *B. pubescens*) und Fichte (*Picea abies*) bestimmen die Entwicklung.

- Auf den *geräumten* Parzellen startet die simulierte Entwicklung im Zustand „15 Jahre nach dem Sturmereignis“ mit einer Dominanz der Birke (Birken-Vorwald). Innerhalb der nächsten 5 Jahrzehnte nimmt die Biomasse der Birke zunächst noch deutlich zu, dann aber kontinuierlich ab; nach 100 Simulationsjahren ist die Birke viel weniger stark als heute, aber doch nennenswert am Bestandaufbau beteiligt.
- Auf den *belassenen* Flächen dagegen dominiert die Fichte von Beginn an; die zu Beginn nur mit geringer Menge (Biomasse) vertretene Birke nimmt nur wenig und für kurz Zeit zu und ist nach gut 5 Jahrzehnten bis auf Spuren, nach etwa 9 Jahrzehnten vollständig verschwunden.

Diese unterschiedlichen Zukunftsoptionen sind derzeit (Jahr 2001) in den realen Beständen bereits zu erkennen: (1) Auf den geräumten Flächen wachsen unter dem dichten Birken-

schirm junge Fichten heran (aber keine Birken; diese können sich in geschlossenen Vegetationsbeständen nicht verjüngen). Die Entwicklung zum von Fichte dominierten Bestand scheint in der Realität sogar schneller zu verlaufen als vom Modell berechnet, da im Spätwinter 1999/2000 die Birke stark unter Schneebruch litt (eine Störung, die im Modell nicht vorgesehen ist!). (2) Auf der belassenen Fläche ist der Weg zum Fichten-Dominanz-Bestand schon jetzt weit fortgeschritten. Birken besiedeln im Wesentlichen nur die aufgeklappten Wurzelteiler („Störstellen“, safe sites für Keimung und Etablierung), aber mangels offener Stellen findet auch hier so gut wie keine weitere Birken-Verjüngung statt. - Insgesamt stimmt die Erwartung über die Bestandesentwicklung (externe Störungen ausgeschlossen) mit der Simulation gut überein; das Simulationsmodell bildet also anscheinend wesentliche Teile des Fichtenwald-Regenerationssystems adäquat ab.

Bestandesentwicklung mit bzw. ohne nachwachsende Verjüngung

Lässt man im Modell die im Jahre 1998 vorhandene Gehölzverjüngung (kleiner 1 m) in den Bestand einwachsen (Abb. 4), so ändert das den generellen Bestandesentwicklungsgang kaum (allenfalls geht der Aussterbeprozess der Birken auf den belassenen Parzellen unter Einbezug der Verjüngung kleiner 1 m etwas rascher als ohne sie). D.h. diejenigen Gehölzindividuen, die zu Beginn der Entwicklung präsent sind, bestimmen die mittel- bis langfristige Bestandesentwicklung maßgeblich; diese Feststellung konnte bereits für andere Regenerationssysteme, z.B. die Bodenvegetation in Wald- und Grünlandgesellschaften, aufgezeigt werden (FISCHER 1987). Die Birke vermag sich nur unmittelbar nach dem Sturmereignis auf offenen Stellen (belassen: Wurzelteiler; geräumt: Räumungsstörstellen) zu etablieren, aber nicht mehr später unter der heranwachsenden Gehölzschicht und in der dichter werdenden Bodenvegetation. Die Fichte kann besonders auf den belassenen Flächen eine große Population von

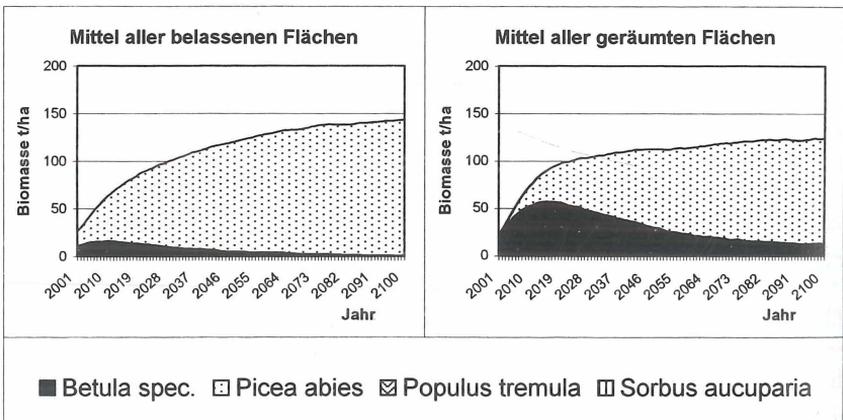


Abb. 3: 100jährige Simulation der Bestandesentwicklung in naturnahen Fichtenwald-Ökosystemen des Nationalparks Bayerischer Wald nach dem Sturmereignis vom 1.8.1983, ausgehend vom Gehölzzustand 1998 (berücksichtigt: Gehölzindividuen ab 1 m Höhe), im Vergleich belassen/geräumt; Mittel aus 24 belassenen bzw. 12 geräumten Flächen (aus: FISCHER et al. im Druck). Alle vier vorhandenen Gehölzarten in die Berechnung einbezogen, aber nur *Betula* und *Picea* mit darstellbaren Biomassewerten.

Fig. 3: One hundred years simulation of stand development of near-to-nature spruce forest ecosystems after the storm event from August 1st, 1983, starting with the 1998 situation of woody plants (more than 1 m height), comparing uncleared and cleared areas; mean from 24 uncleared and 12 cleared plots, respectively (from: FISCHER et al. in press). All woody species (4) included into the calculation, but only 2 (*Betula*, *Picea*) with significant values of biomass.

Verjüngungspflanzen etablieren, wodurch die Fichten-Biomasse unter Einbezug der Verjüngung nennenswert stärker ansteigt als ohne Einbezug dieser Verjüngung.

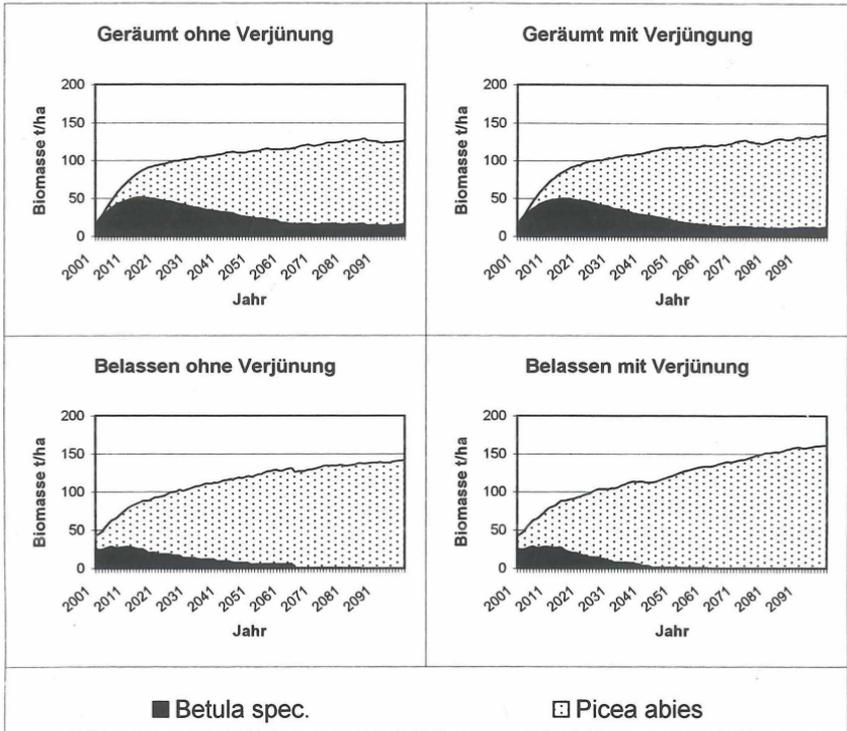


Abb. 4: Vergleich der Simulation (100 Jahre) ab 1998 ohne Berücksichtigung der Verjüngung (links) bzw. einschließlich der 1998 vorhandenen Verjüngung kleiner 1 m (rechts) für geräumte (oben) bzw. belassene Flächen (unten); Mittel aus jeweils 3 Beispielflächen (vergl. Abb. 3).

Fig. 4: One hundred years simulation using only trees more than 1 m high in 1998 (left) and additionally tree regeneration less than 1 m (right), respectively on cleared (above) and uncleared plots (below); mean of three plots each (see fig. 3).

Vergleich Simulation/Messung

Die bisher vorgestellten Daten zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation einerseits und im Gelände sichtbarer Entwicklung andererseits. Es gibt aber auch Diskrepanzen. Vergleicht man beispielsweise das simulierte und tatsächlich gemessene Wachstum der Bäume im Zeitraum 1988 bis 1998 (Abb. 5), so zeigt sich, dass die Simulation zwar das Höhenwachstum von Birke und Fichte relativ gut wiedergibt, den BHD-Zuwachs aber deutlich überschätzt. Hier setzt jetzt die Überprüfung des Modells an: Liegt die Diskrepanz lediglich an einer für die hier analysierten Sturmwurfflächen im Nationalpark Bayerischer Wald unzureichende Parametrisierung der Wachstumsparameter oder beschreibt das Modell auf konzeptioneller Ebene bestimmte Zusammenhänge noch nicht richtig?

Der Einfluss geänderter Standortbedingungen

Das Modell FORSKA war mit dem Ziel entwickelt worden, Aussagen über sich ändernde Umweltbedingungen auf Waldbestände zu testen. Gerade in der Diskussion um „global climate change“ ist es naheliegend, die Möglichkeit der Einflussnahme geänderter klimatischer

Rahmenbedingungen auf Waldbestände abzuschätzen. Hierzu können im Modell Parameter z.B. des Wasserhaushaltes verändert werden. Dies ist eine Aufgabe der nächsten Zukunft.

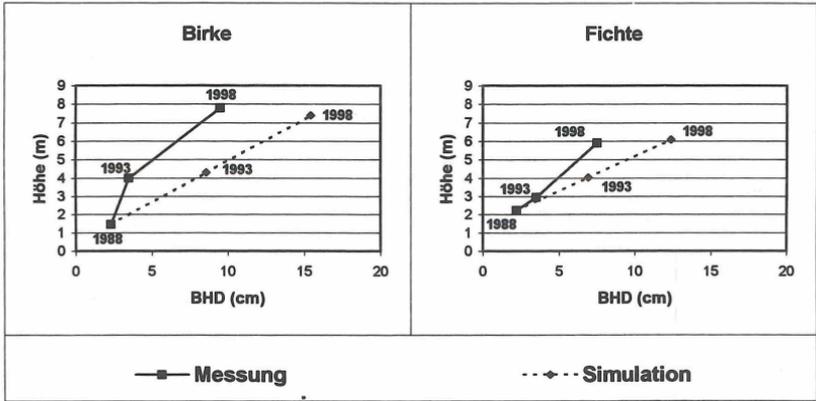


Abb. 5: Vergleich der realen und der simulierten BHD-Entwicklung von Fichte und Birke auf Sturmwurfflächen im Zeitraum 1988 bis 1998 (vergl. Abb. 3).

Fig. 5: Comparison of simulated and real DBH-development of spruce and birch in stormfelled eco-systems during 1988 and 1998 (see fig. 3).

4. Diskussion

Die Analyse der Vegetationsdynamik auf der Basis der fortlaufenden Dokumentation des Zustandes auf fest markierten Dauerflächen ist langwierig. Publizierbare Ergebnisse fallen erst nach längeren Untersuchungszeiträumen an. Dies gilt insbesondere für Wälder, wo auf Grund der langen potentiellen Lebensdauer der Bäume Untersuchungszeiträume in der Größenordnung von Jahrzehnten (oder gar Jahrhunderten) notwendig werden, um intern und/oder extern gesteuerte Entwicklungen fortlaufend zu dokumentieren. Deshalb sind vegetationskundliche Daueruntersuchungen gerade in Waldökosystemen nach wie vor eher selten (vergl. KLOTZ 1996). Simulationsmodelle ermöglichen, Bestandesentwicklungen unter bestimmten und frei wählbaren Rahmenbedingungen (sowohl was die Zielstellung als auch die untersuchten Bestandes- und Standortparameter angeht, soweit im Modell enthalten), ablaufen zu lassen, und zwar in einem Zeitraum, der nicht nach Jahrzehnten oder Jahrhunderten rechnet, sondern sogar im Rahmen von Diplomarbeiten realisierbar ist. Allerdings ist die Simulation als Methode der Prozessanalyse nur dann sinnvoll anwendbar, wenn es möglich ist, den simulierten Entwicklungsgang mit anderweitig ermittelten Daten der real ablaufenden Entwicklung (eben z.B. Dauerflächen-Datensätzen) zu vergleichen. Die Simulation soll zeigen, welche Entwicklung ein System nähme, wäre es so wie das Modell konstruiert. Finden sich mehr oder weniger große Kongruenzen zwischen Simulation und Realität, so sind im Modell anscheinend grundlegende Elemente und Zusammenhänge des Systems enthalten und in adäquater Form miteinander verknüpft. Das System ist dann anscheinend grundsätzlich richtig abgebildet.

Abweichungen von Simulation und Realität fordern die Suche nach den Gründen heraus: Handelt es sich „lediglich“ um unzureichende Parametrisierungen, oder sind entscheidende Elemente des Systems auf konzeptioneller Ebene nicht berücksichtigt oder falsch verknüpft?

Im Falle guter Übereinstimmung von Simulation und Realität hat das Modell seine wissenschaftliche Aufgabe, die Verbesserung des Kenntnisstandes über das untersuchte System.

erfüllt. Für die *Praxis* kann es dann z.B. genutzt werden, um die Folgen verschiedener Handlungsoptionen zu testen, z.B. forstlicher Behandlungsmaßnahmen (HANEWINKEL & PRETZSCH 2000). Zudem ist der Landnutzer auch an Prognosen interessiert. Eine Vorhersagbarkeit im Sinne der Trefferwahrscheinlichkeit (z.B. FRESCINO et al. 2001: Modell zur Voraussage von Waldtypen und Waldstrukturen in einem gegebenen Geländeausschnitt) ist der besseren Validierbarkeit wegen leichter realisierbar als die Vorhersagbarkeit auf der Zeitachse; die Simulation ist nie vorweggenommene Realität sondern lediglich Fortschreibung des Ausgangszustandes.

Ein Simulationsmodell kann nie sämtliche in der Realität auftretende, die Bestandesentwicklung möglicherweise beeinflussende Größen beinhalten. So ist bei FORSKA-M in der jetzigen Fassung Schneebruch nicht „vorgesehen“. Die Bestandesentwicklung auf den geräumten Sturmwurfflächen im Nationalpark Bayerischer Wald von einem Birken-Vorwald zu einem von Fichte dominierten Schlusswald wird real voraussichtlich schneller ablaufen als im Modell, da die Birken im Spätwinter 1999/2000 massiv durch Schneebruch in Mitleidenschaft gezogen wurden und deshalb die heranwachsenden Fichten günstigere Wachstumsbedingungen vorfinden als im Modell angenommen.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass Modellierung ein sehr nützliches Instrument der Prozessanalyse sein kann, eine gründliche und langfristige Geländearbeit aber keineswegs zu ersetzen vermag, im Gegenteil nur dann nutzbar ist, wenn Geländebefunde zur Validierung der Simulationsergebnisse existieren! Insofern ist das Dauerflächenset in naturnahen Fichtenwäldern des Bayerischen Waldes trotz aller methodischer Limitierungen (siehe dazu FISCHER et al. 1990) aus Sicht der Waldökosystemforschung von großer Bedeutung, liefert es doch die benötigten Referenzdaten, an Hand derer die simulierte Entwicklung validiert werden kann.

Ziel des Beitrages war es, exemplarisch die wachsende Bedeutung der Modellierung im Zuge der Analyse von Entwicklungsprozessen in Wäldern aus vegetationskundlicher Sicht darzustellen. Die Simulation der Gehölzverjüngung einschließlich der Frage der gap-Regeneration (PRENTICE & LEEMANS 1990) sowie die Wachstumssimulation von Bäumen in Forstbeständen (PRETZSCH 2001) sind weitere (hier nicht behandelte) derzeit verfolgte Anwendungsbereiche der Simulation von Walddynamik.

5. Zusammenfassung

Konzeptionelle Modelle stellen die wesentlichen Elemente eines Systems und deren grundsätzliche Verknüpfung miteinander im Hinblick auf eine bestimmte Fragestellung dar. Die Beziehungen sind nicht quantifiziert; damit sind konzeptionelle Modelle nicht validierbar. Durch Definition der beteiligten Elemente, ihre mathematische Verknüpfung und Parametrisierung lassen sich aus konzeptionellen Modellen Simulationsmodelle ableiten. In der forstlichen Vegetationskunde erhalten sie zunehmende Bedeutung im Zuge der Analyse der Waldentwicklungsprozesse. An Hand von zwei Beispielen („Buchenwaldmodell von NEUERT; FORSKA-M angewendet auf Waldregeneration nach Sturmwurf) werden die Möglichkeiten von Simulationsmodellen in der forstlichen Vegetationskunde dargestellt. Stimmen der simulierte und der real beobachtete Entwicklungsgang überein, so sind anscheinend die das System aufbauenden Elemente und ihre Interaktionen grundsätzlich richtig erfasst. Wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von Simulationsmodellen in der forstlichen Vegetationskunde ist das Vorhandensein geeigneter Datensätze realer Entwicklungen, mit denen die Simulationsergebnisse verglichen werden können.

Im Falle des Buchenwaldmodells lassen sich wesentliche Aussagen bezüglich der raumzeitlichen Phasendifferenzierung von Buchenwäldern und damit z.B. Aussagen zur Mindest-

flächengröße von Buchenwald-Schutzgebieten ableiten. Im Falle der Simulation der Entwicklung auf Sturmwurfflächen in naturnahen Fichtenwald-Ökosystemen zeigt der Vergleich, dass das Modell die Entwicklung in den Grundzügen plausibel und soweit bisher überprüfbar (15 Jahre Dokumentation der Entwicklung) entsprechend der real ablaufenden Entwicklung abbildet, bezüglich der BHD-Entwicklung aber noch deutliche Diskrepanzen zwischen Simulation und Realität bestehen. Simulationsmodelle, und dabei besonders die individuenbasierten, unterstützen den Schritt von der deskriptiven zur prozessanalytischen Vegetationskunde.

6. Literatur

- BRANG, P., COURBAUD, B., FISCHER, A., KISSLING-NÄF, I., PETTENELLA, D., SCHÖNENBERGER, W., SPÖRK, J. & GRIMM, V. (in Vorb.): Developing meaningful indicators for the sustainable management of multi-purpose mountain forests using a modelling approach.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1931): Vegetationsentwicklung im Schweizer Nationalpark. Dokumente zur Erforschung des Schweizer Nationalparks. - Jahresber. Nat. Ges. Graubündens N.F. **69**: 1-82.
- BÜRGER, G. (1997): On the disaggregation of climatic means and anomalies. - *Climate Research* **8**: 183-194.
- DIERSCHKE, H. (1982): Struktur und Dynamik von Wäldern. - Berichte Int. Symposien Int. Vereinigung Veg.kunde, 736 S., Vaduz.
- EGLER, F.E. (1954): Vegetation science concepts. I. Initial floristic composition, a concept of old-field vegetation development. - *Vegetatio* **4**: 412-417.
- FISCHER, A. (1982): Mosaik und Syndynamik der Pflanzengesellschaften von Lößböschungen im Kaiserstuhl (Südbaden). - *Phytocoenologia* **10**: 73-256, Stuttgart, Braunschweig.
- FISCHER, A. (1987): Untersuchungen zur Populationsdynamik am Beginn von Sekundärsukzessionen. - *Diss. Bot.* **110**, 234 S., Cramer, Berlin, Stuttgart.
- FISCHER, A. (1992): Long-term vegetation development in Bavarian mountain forest ecosystems following natural destruction. - *Vegetatio* **103**: 93-104.
- FISCHER, A. (1996): Forschung auf Dauerbeobachtungsflächen im Wald. Ziele, Methoden, Analysen, Beispiele. - *Arch. Nat.-Landschaftsforsch.* **35**: 87-106.
- FISCHER, A. (1999): Sukzessionsforschung: Stand und Entwicklung. - *Ber. Reinh.-Tüxen-Ges.* **11**: 157-177, Hannover
- FISCHER, A. (im Druck): Kriterien für die Auswahl bundesweit bedeutsamer Waldgebiete in Süddeutschland aus vegetationsökologischer Sicht. - *Schr.r. Landschaftspflege und Naturschutz*.
- FISCHER, A., ABS, G. & LENZ, F. (1990): Natürliche Entwicklung von Waldbeständen nach Windwurf. Ansätze einer „Urwaldforschung“ in der Bundesrepublik. - *Forstwiss. Cbl.* **109**: 309-326.
- FISCHER, A. & JEHL, H. (1999): Vegetationsentwicklung auf Sturmwurfflächen im Nationalpark Bayerischer Wald aus dem Jahre 1983. - *Forstliche Forschungsber. München* **176** (Themenheft „Forschung in Sturmwurf-Ökosystemen Mitteleuropas“, hrsg. von A. FISCHER & R. MÖßNER), 93-101.
- FISCHER, A., LINDNER, M., ABS, C. & LASCH, P. (im Druck): Vegetation dynamics in Central European forest ecosystems (near-nature as well as managed) after storm events. - *Folia Geobotanica*.
- FRESCINO, T.S., EDWARD, T.C JR. & MOISEN, G. (2001): Modelling spatially explicit forest structural attributes using Generalized Additive Models. - *J. Veg. Sc.* **12**: 15-26.
- GRABHERR, G., MUCINA, L., WALLNÖFER, S & ELLMAUER, T. (Hrsg.) (1993): Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil I-III. - Zusammen 1.463 S., G. Fischer, Jena, Stuttgart, New York.
- HANWINKEL, M. & PRETZSCH, H. (2000): Modelling the conversion from even-aged to uneven-aged stands of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) with a distance-dependent growth simulator. - *Forest Ecology and Management* **134**: 55-70.
- HEGG, O. (1992): Long-term influence of fertilization on the *Nardetum* at the Schynige Platte above Interlaken (Swiss Alps). - *Braun-Blanquetia* **8**: 158-160.
- HEGG, O., FELLER, U., DÄHLER, W. & SCHERRER, C. (1992): Long-term influence of fertilization in a *Nardetum*. - *Vegetatio* **103**: 151-158.

- HÖLZEL, N., FISCHER, A. & SEIBERT, P. (1996): *Erico-Pinetea*. - Synopsis der Pflanzengesellschaften Deutschlands. Heft 1, 49 S., Göttingen.
- IPCC (2001): A report of working group I of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Summary for policymakers. Vorbericht Februar 2001. - www.ipcc.ch.
- JELTSCH, F., MILTON, S.J., DEAN, W.R.J. & VAN ROOYEN, N. (1995): Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener Umwelteinflüsse auf das Verbreitungsmuster von Savannenpflanzen - ein Modellierungsansatz. - Verh. Ges. Ökologie **24**: 45-53.
- JELTSCH, F., MILTON, S.J., DEAN, W.R.J., VAN ROOYEN, N. & MOLONEY, K.A. (1998): Modelling the impact of small-scale heterogeneities on tree-grass coexistence in semi-arid savannas. - J. Ecol. **86**: 780-793.
- KENNEL, M. (1998): Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Waldökosystemen. Fallstudien: Forsthydrologisches Forschungsgebiet Krodorf, Referenzeinzugsgebiet Große Ohe. - Forstliche Forschungsber. München **168**, 362 S.
- KLOTZ, St. (1996): Dauerflächenuntersuchungen: Ergebnisse einer Umfrage. - Arch. Nat.-Landschaftsforsch. **35**: 175-181.
- LASCH, P., LINDNER, M., EBERT, B., FLECHSIG, M., GERSTENGARBE, F.-W., SUCKOW, F. & WERNER, P.C. (1999): Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal State of Brandenburg, Germany. - Environmental Modelling and Assessment **4**: 273-286.
- LEJEUNE, O. & TLIDI, M. (1999): A model for the explanation of vegetation stripes (tiger bush). - J. Veg. Sc. **10**: 210-208.
- LINDNER, M. (2000): Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. - Tree Physiology **20**: 299-307.
- LEIBUNDGUT, H. (1959): Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. - Schweiz. Z. Forstwes. **110**: 111-124, Zürich.
- LÜDI, W. (1959): Versuche zur Alpweideverbesserung auf der Schynigen Platte bei Interlaken. - Beil. Jahresber. Ver. Alpengarten Schynige Platte, 8 S.
- NEUERT, Ch. (1999): Die Dynamik räumlicher Strukturen in naturnahen Buchenwäldern Mitteleuropas. - UFZ-Bericht 20/1999, 186 S.
- OBERDORFER E. (Hrsg.) (1977-92): Süddeutsche Pflanzengesellschaften. - 2. Aufl., Band 1-4, davon Bd. 4 in 2 Teilbänden, zusammen 1.983 S., G. Fischer, Jena, Stuttgart, New York.
- PREISING, E. et al. (1990 ff): Die Pflanzengesellschaften Niedersachsens. Bestandentwicklung, Gefährdung und Schutzprobleme. - Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen Bd. **20** (in 10 Teillieferungen, davon Nr. 7-10 erschienen), zusammen bisher 827 S.
- PRENTICE, I.C. & LEEMANS, R. (1990): Pattern and process and the dynamics of forest structure: a simulation approach. - J. Ecol. **78**: 340-355.
- PRENTICE, I.C., SYKES, M.T. & CRAMER, W. (1993): A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. - Ecol. Modelling **65**: 51-70.
- PRETZSCH, H. (2001): Models for pure and mixed forests. - In: EVANS, J. (ed.): The Forests Handbook, vol. 1, chap. 9, 210-228, Blackwell Science, London.
- REMMERT, H. (1991): An overview. - In: REMMERT, H. (ed.): The mosaic-cycle concept of ecosystems. Ecol. Studies **85**: 11-21, Berlin.
- RODWELL, J.S. (Hrsg.) (1991-2000): British Plant Communities. - 5 Bände, zusammen 2.358 S., Cambridge University Press, Cambridge.
- SCHAMINEE, J.H.J., STORTELDER, A.H.F., WEEDA, E., HOMMEL, P.W.F.M. & WESTHOFF, V. (Hrsg.) (1995-99): De Vegetatie van Nederland. - 5 Bde., zusammen 1.784 S., Opulus Press, Uppsala, Leiden.
- SCHIEFER, J. (1981): Bracheversuche in Baden-Württemberg. - Beih. Veröff. Naturschutz Landschaftspf. Bad.-Württ. **22**, 325 S., Karlsruhe.
- SCHMIDT, W. (1975): Sukzessionsforschung. - Berichte Int. Symposien Int. Vereinigung Veg.kunde, 622 S., Vaduz.
- SCHMIDT, W. (1981): Ungestörte und gelenkte Sukzession auf Brachäckern. - Scripta Geobotanica **15**, 199 S., Göttingen.
- SCHMIDT, W. 1993: Sukzession und Sukzessionslenkung auf Brachäckern. Neue Ergebnisse aus einem

Dauerflächenversuch. - *Scripta Geobotanica* **20**: 65-104.

- SCHREIBER, K.F. (1997): Grundzüge der Sukzession in 20-jährigen Grünland-Bracheversuchen in Baden-Württemberg. - *Forstwiss. Cbl.* **116**: 243-258.
- THIELE, K. (1978): Vegetationskundliche und pflanzenökologische Untersuchungen im Wimbachgries. - *Aus den Naturschutzgebieten 1* (Hrsg.: Bayer. LfU), 73 S. + Anhang.
- TÜXEN, R. & SOMMER, W.-H. (Hrsg.) (1979): Gesellschaftsentwicklung (Syndynamik). - *Berichte Int. Symposien Int. Vereinigung Veg.kunde*, 502 S., Vaduz.

Anschrift des Verfasser:

Prof. Dr. Anton Fischer, Fachgebiet Geobotanik, Department für Ökologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TU München, Am Hochanger 13, D 85354 Freising
e-mail: a.fischer@forst.tu-muenchen.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2001

Band/Volume: [13](#)

Autor(en)/Author(s): Fischer Anton

Artikel/Article: [Modellierung der Vegetationsdynamik in Wäldern
Simulationsmodelle in der forstlichen Vegetationskunde 169-182](#)