Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss foresty journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 140 (1989)

Heft: 3

Artikel: Computergestützte Simulation von Waldentwicklungen

Autor: Kienast, Felix

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-764218

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Computergestützte Simulation von Waldentwicklungen

Von *Felix Kienast*[1]
(Institut für Wald- und Holzforschung der ETH Zürich, Fachbereich Bodenphysik, CH-8092 Zürich)
und
Nino Kuhn
(Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf)

Oxf.: 182. 2: 228

1. Einleitung

Die Artenzusammensetzung forstlicher Ökosysteme ändert sich dauernd und ist das Resultat eines komplexen Zusammenwirkens natürlicher und menschlicher Einflüsse. Da die Prozesse grosse Zeiträume umfassen, fehlen systematische und konsequente Langzeitbeobachtungen. Immerhin hat *Ellenberg* (1982) die natürliche Baumartenzusammensetzung der mitteleuropäischen Waldgesellschaften begründet, indem er die wichtigsten Wachstumseigenschaften der Baumarten zueinander in Beziehung setzte. Zu diesen Eigenschaften gehören zum Beispiel die maximale Höhe und die maximale Lebensdauer auf günstigen Standorten, die Fähigkeit, als Bestand Schatten zu erzeugen und als Jungwuchs Schatten zu ertragen, sowie die Empfindlichkeit gegen Dürrezeiten im Sommer und Frost im Frühjahr oder Winter. So hat zum Beispiel die Rotbuche *(Fagus silvatica)* wegen ihrer grossen Spätfrostempfindlichkeit sowie der grossen Dürre- und Winterfrostempfindlichkeit in kontinental beeinflussten Gebieten geringe Chancen, neben den längerlebigen und witterungsharten Eichen bestandesbildend aufzutreten. In dem von ozeanischer Witterung beherrschten nordwestlichen Alpenvorland und im Jura wird hingegen ihre Überlegenheit im Wettbewerb mit anderen Baumarten in zahllosen Beispielen bestätigt. Hier kommt vor allem ihre Fähigkeit zum Zug, als Bestand Schatten zu erzeugen und als Jungwuchs Schatten zu ertragen. In Teilen der Randalpen erreichen Fichte *(Picea abies)* oder auch Tanne *(Abies alba)* höhere Bestandesanteile, weil sie, mit sonst manchen ähnlichen Eigenschaften, infolge grösserer Baumhöhen die Bestände überragen und so der Konkurrenz der Buche entgehen.

[1] Jetzige Adresse: Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Abt. Landschaft, CH-8903 Birmensdorf.

Bislang wurde die Frage nach der natürlichen Baumartenzusammensetzung an einem Standort vorwiegend durch Kombination waldbaulich-ertragskundlicher Ergebnisse sowie geobotanischer Analysen und Synthesen beantwortet. In den letzten 10 bis 15 Jahren wurden jedoch verschiedene Computermodelle entwickelt, welche die Sukzessionsdynamik unter Zuhilfenahme artspezifischer Konstitutions- und Wachstumseigenschaften sowie ihrer Beziehungen zu Standortsfaktoren simulieren *(Dale et al.,* 1985; *Fries,* 1974; *Shugart,* 1984; *Slatyer,* 1977; *VanHulst,* 1980; *West et al.,* 1981). Ein auf zentraleuropäische Klimaverhältnisse angepasstes Sukzessionsmodell (FORECE: *FORE*sts of *C*entral *E*urope) steht seit 1987 zur Verfügung *(Kienast,* 1987). Es wurde am Oak Ridge National Laboratory (USA) entwickelt und baut auf Sukzessionsmodellen des Typs JABOWA/FORET auf (Shugart, 1984). Mit dem Computermodell wurden natürliche Waldsukzessionen für das Schweizerische Mittelland und den Alpenbereich simuliert (Kienast und *Kuhn,* 1989). Ähnliche Anwendungen liegen von Dale und *Gardner* (1987), *Pastor* und *Post* (1985), Shugart und West (1980), *Solomon* (1986) und West *et al.* (1980) vor. Der vorliegende Artikel soll einen Überblick über die Grundlagen des Modells geben und anhand einiger Beispiele mögliche Anwendungen illustrieren.

2. Modellgrundlagen

Das forstliche Sukzessionsmodell FORECE gehört zur Gruppe der «gap»-Modelle (Shugart und West, 1980). Bei diesem Konzept werden die Verjüngung sowie das Wachstum und Absterben von Einzelbäumen auf vielen kleinen Bestandesflächen (englisch: plots) von $^1/_{12}$ ha stochastisch simuliert, wobei verschiedene Umwelteinflüsse modifizierend wirken *(Abbildung 1).* Die durchschnittliche Stammzahl- und Biomassenentwicklung dieser Flächen erlaubt Aussagen über die Entwicklung der Baumartenzusammensetzung auf regionaler Stufe. Dieses Konzept basiert auf Sukzessionsstudien, welche zeigen, dass ein forstliches Ökosystem mit Hilfe vieler kleiner Flächen unterschiedlicher Entwicklungsstufen beschrieben werden kann *(Bray,* 1956; *Forman* und *Godron,* 1981; *Watt,* 1947). Die Fläche von $^1/_{12}$ ha wurde in Übereinstimmung mit Modellen aus den Appalachen gewählt. Sie stellt ungefähr jene Lücke (englisch: gap) dar, die entsteht, wenn ein herrschender Baum in einem geschlossenen Kronendach abstirbt (Shugart und West, 1981).

Jede Simulation kann entweder auf kahlen Bestandesflächen oder mit einer vorgegebenen Baumartenzusammensetzung beginnen. Im ersten Fall wird die Anzahl Jungpflanzen mit einem durchschnittlichen BHD von 1,27 cm (= 0,5 inch) stochastisch bestimmt, wobei je nach Umweltbedingungen gewisse Arten ausgeschlossen werden. Die Verjüngung der Bestände findet generell zu jedem Zeitpunkt der Sukzession statt, falls die Lichtverhältnisse eine Keimung und

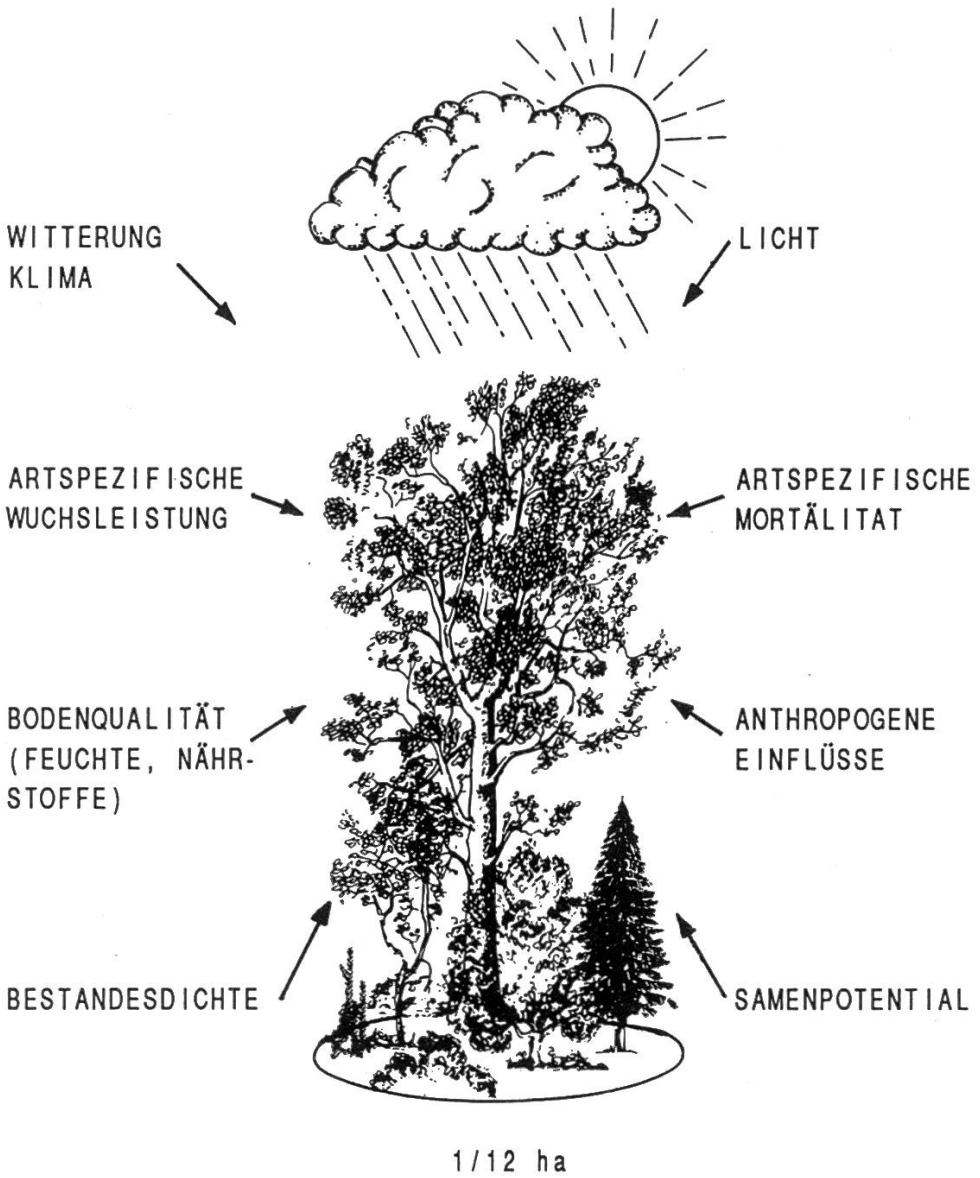

Abbildung 1. Das Simulationskonzept eines Sukzessionsmodells vom Typ JABOWA/FORET. Die Bestandesentwicklung wird auf vielen kleinen Bestandesausschnitten zu je $^1/_{12}$ ha simuliert. Die dabei berücksichtigten wachstumsbestimmenden Faktoren sind stichwortartig wiedergegeben.

ein Jugendwachstum erlauben. Das Wachstum jedes Einzelbaumes wird simuliert, indem die maximal mögliche Zuwachsrate bei entsprechendem Durchmesser mit Hilfe verschiedener wachstumslimitierender Faktoren reduziert wird. Letztere werden für verschiedene Umweltbedingungen ermittelt. Der optimalen Zuwachskurve jeder Baumart liegt eine theoretische Wachstumsfunktion zugrunde *(Botkin et al.,* 1972), die mit Hilfe von ertragskundlichen Daten geeicht wurde. Die theoretische Wachstumsfunktion basiert auf der Annahme, dass der maximale Biomassenzuwachs in einem Jahr proportional zur eingestrahlten Energie ist und sich lediglich um die Atmungsverluste reduziert (Botkin *et al.,* 1972). Das Absterben von Bäumen wird von altersabhängigen und altersunabhängigen Faktoren gesteuert. Die altersabhängige Komponente stützt sich auf eine artenspezifische Mortalitätsrate. Danach können lediglich 1% des Jung-

wuchses einer Art das physiologisch mögliche Alter erreichen. Die altersunabhängige Komponente besteht darin, dass Bäume absterben, wenn sie während mehrerer Jahre eine vom Programmbenützer vorgegebene Minimalwuchsleistung unterschreiten. Die Auswahl der absterbenden Bäume erfolgt schliesslich mit Hilfe eines Zufallgenerators. Die baumartenspezifischen Daten wie zum Beispiel Lichtbedürfnis, Ansprüche an die Bodenfeuchtigkeit, maximales Alter usw. basieren auf dendrologischen, ertragskundlichen und pflanzensoziologischen Studien *(Amann,* 1954; *Bernatzky,* 1978; Ellenberg, 1982; *Mitscherlich,* 1970). Eine gegenüber JABOWA/FORET-Modellen wesentliche Änderung ist der Einbezug verschiedener Zeigerwerte nach Ellenberg (1982). Sie dienen der ökophysiologischen Charakterisierung der Baumarten.

3. Programmstruktur

Das Programm FORECE besteht aus einem Hauptprogramm und verschiedenen Unterprogrammen *(Abbildung 2).* Das Unterprogramm INPUT veranlasst den Einlesevorgang der Eingangsdaten (Klimaverhältnisse und Standortseigenschaften der zu simulierenden Probeflächen sowie artspezifische Daten). Jede Simulation kann auf Kahlflächen oder mit vorgegebenen Arten- und Stammzahlzusammensetzungen begonnen werden. Diese Steuerung erfolgt mit dem Unterprogramm PLOTIN. Die Unterprogramme TEMPE, MOIST und LINIT simulieren die Witterungsbedingungen und die Bodenfeuchtigkeit in jedem Jahr der Modellierung. Der Mittelwert und die Standardabweichung der langjährigen Temperatur- und Niederschlagsmessungen einer Station geben dabei die Schwankungsbreite an, innerhalb welcher die simulierten Monatswerte stochastisch variieren. Das pflanzenverfügbare Bodenwasser und die Anzahl Tage mit ungenügender Wasserversorgung pro Vegetationsperiode (Trockentage) werden mit Hilfe eines einfachen Evapotranspirationsmodells berechnet (Pastor und Post, 1985). Anschliessend wird geprüft, ob die einzelnen Baumarten den simulierten Witterungsverlauf und die Anzahl Trockentage tolerieren können. Je nach physiologischer Amplitude ergeben sich verschieden grosse Wachstumsreduktionen, die in Form von Wachstumsmultiplikatoren ausgedrückt werden (Unterprogramm GMULT). Der Ansatz von Pastor und Post (1985) setzt die Kenntnis des pflanzenverfügbaren Bodenwassers eines Standorts voraus. In den vorliegenden Simulationen wurden diese Grössen geschätzt. Zusätzlich wurde die Feuchtezahl nach Ellenberg (1982) verwendet, um den Wasserhaushalt des zu simulierenden Bodens qualitativ zu beschreiben. Die Standortsdifferenzierung nach verschiedenen Nährstoffverhältnissen und Substraten ist nicht berücksichtigt. Dieser Umstand bewirkt, dass die Simulationen immer einen Mittelwert aller Gegebenheiten darstellen. Das Unterprogramm BIRTH modelliert die natürliche und, falls erwünscht, die anthropogen

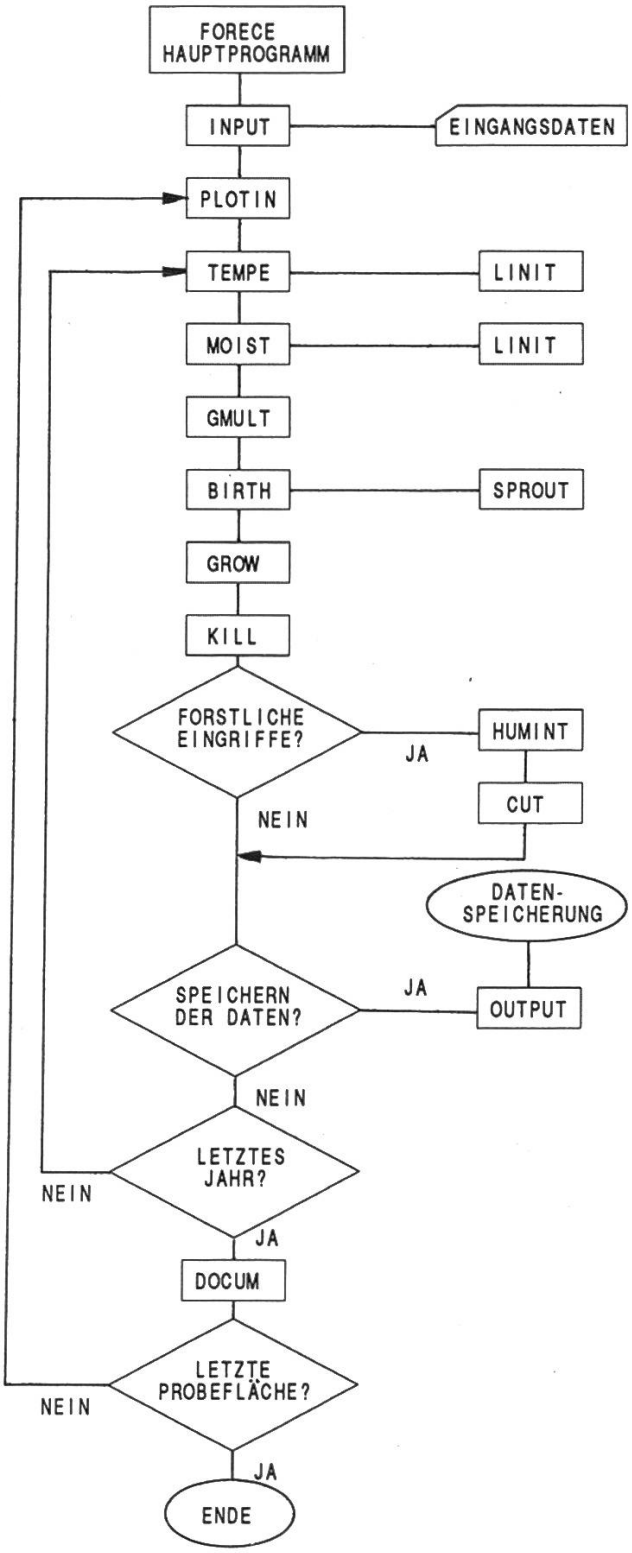

Abbildung 2. Flussdiagramm des Programms FORECE *(FOREsts of Central Europe)* mit Angaben über die Unterprogramme.

beeinflusste Verjüngung. Die verfügbare Anzahl Jungpflanzen pro Art wird von den aktuellen Umweltbedingungen und anthropogenen Faktoren bestimmt. Besonders prägend sind dabei Frost, verfügbares Licht auf dem Waldboden sowie die Witterung während der Vegetationsperiode. Die Simulation des Lichteinfalls durch das Kronendach beruht auf der Annahme, dass die Strah-

lung negativ exponentiell zur Blattoberfläche abnimmt (Botkin *et al.*, 1972). Im Unterprogramm SPROUT wird die Verjüngung durch Stockausschläge simuliert. Das Unterprogramm GROW berechnet den jährlichen Durchmesser-, Volumen- und Biomassenzuwachs jedes Baumes, der an der Modellierung beteiligt ist. Zu diesem Zweck werden zuvor zusätzliche Wachstumsmultiplikatoren berechnet, so zum Beispiel die Überschattung jedes Baumes durch die ihn überragenden Individuen oder die Konkurrenz um Nährstoffe. Der tatsächliche Durchmesserzuwachs jedes Baumes ergibt sich schliesslich durch Multiplikation des maximal möglichen Zuwachses beim jeweiligen Gesamtdurchmesser mit demjenigen Wachstumsfaktor, der das Wachstum am stärksten einschränkt (Gesetz vom Minimum nach Liebig). Das Unterprogramm KILL lässt Bäume absterben (siehe dazu Details in Kapitel 2). Waldbauliche Eingriffe wie zum Beispiel Femelschlag, Plenterung, künstliche Verjüngung und Bevorzugung einzelner Baumarten können in den Unterprogrammen HUMINT und CUT simuliert werden. Die Unterprogramme OUTPUT und DOCUM sind Datenverwaltungs- und Dokumentationsprogramme. Jede Simulation liefert die folgenden standorts- und artspezifischen Daten in Intervallen von fünf Jahren:

- Artspezifische Biomassen- und Stammzahlentwicklung
- Simulierte Anzahl Trockentage pro Vegetationsperiode
- Simulierte Temperatursummen aller Monate mit Durchschnittstemperatur
- >5,55 °C (42 °F)
- Blattflächenindices
- Stammzahl und totale Biomasse aller Baumarten

4. Resultate

Die in diesem Aufsatz vorgestellten Simulationen erstrecken sich über 1200 Jahre und repräsentieren die mittlere Entwicklung eines Kollektivs von 41 Flächen zu je $^1/_{12}$ ha. Die Modellrechnungen für das Walliser Trockental beschreiben Waldentwicklungen entlang eines Höhenprofils und berücksichtigen nur natürliche Konkurrenzbedingungen. Als Klimadaten dienen die Stationen Sion, Montana, Zermatt und Cleuson *(Tabelle 1)*. Die Simulationen aus dem Mittelland schliessen waldbauliche Eingriffe sowie Störungen durch Windwurf und Feuer ein. Grundlage für das klimatische Szenario ist die Station Bern *(Tabelle 1)*.

4.1 Sukzessionen unter natürlichen Konkurrenzbedingungen im Mittelwallis

Die Simulation eines forstlichen Ökosystems mit trockenen Bodenverhältnissen in der kollinen Stufe *(Abbildung 3a)* ist charakterisiert durch eine Domi-

Tabelle 1. Jahresmitteltemperaturen und Niederschlagssummen der berücksichtigten Klimastationen (*: extrapoliert auf Grund der Daten von Zermatt).

Klimastation	*Höhe (m)*	*Jahresmitteltemperatur (°C)*	*Niederschlagsmenge (mm)*
Sion	549	9,9	590
Montana	1453	5,7	860
Zermatt	1610	3,6	700
Cleuson	2120	1,6*	900
Bern	572	8,3	1000

nanz von Waldföhre *(Pinus sylvestris)*. Flaumeiche *(Quercus pubescens)* und Vogelbeere *(Sorbus aucuparia)* nehmen bezüglich Biomasse nur eine untergeordnete Stellung ein. Analysiert man jedoch die Stammzahlen und die Baumhöhenverteilung, so zeigt sich, dass die beiden Baumarten eine ökologisch äusserst wichtige Rolle im Unterwuchs einnehmen.

Die Simulation für die montane Stufe *(Abbildung 3b)* zeigt eine deutliche Aufteilung in vier Sukzessionsstadien (0 bis 150 Jahre; 150 bis 300 Jahre; 300 bis 700 Jahre; 700 bis 1200 Jahre). Die Anfangsphase ist charakterisiert durch Dominanz von Fichte, Waldföhre, Lärche *(Larix decidua)* und Aspe *(Populus tremula)*. Die zweite Phase (150 bis 300 Jahre) ist dominiert von Lärche und Waldföhre. Bergföhre *(Pinus mugo)* und Fichte sind aber auch signifikant beteiligt. Bereits während dieser Phase zeichnet sich die kontinuierliche Ausscheidung von Lärche und Bergföhre ab, die in Phase 3 zum Abschluss kommt. Parallel dazu vermindert sich die gesamte Biomasse deutlich und pendelt sich auf einem tieferen Niveau ein. Auch die Waldföhre verzeichnet einen Rückgang. Nutzniesser dieses Rückganges sind Fichte und Bergahorn *(Acer pseudoplatanus)* und in geringerem Mass die Weisstanne. Während der Phase 4 bleibt die in Phase 3 erreichte Baumartenzusammensetzung weitgehend erhalten.

Die Simulation für die hochmontane Stufe *(Abbildung 3c)* umfasst Standorte, die in der Pionierphase von Lärche, Bergföhre und Fichte besiedelt werden. Aber auch die Alpenerle *(Alnus viridis)* ist ein typischer Begleiter, verschwindet aber mit zunehmendem Alter der Bestände. Die Arve *(Pinus cembra)* ist von untergeordneter Bedeutung, aber dauernd vertreten. Dem Verschwinden der Bergföhre nach etwa 450 Jahren folgt die fast gänzliche Elimination der Lärche ums Jahr 1000. Hier findet eine eigentliche Substitution von Lärche und Bergföhre durch Fichte statt. Ähnliche Phänomene wurden sowohl von *Huston* und *Smith* (1987) als auch von Ellenberg (1982) beschrieben.

Die Entwicklung der Baumartenzusammensetzung wird in der subalpinen Stufe *(Abbildung 3d)* weitgehend durch die Arve dominiert *(Abbildung 3d)*. In der Pionierphase und nach etwa 500 Jahren ist die Alpenerle ständiger Begleiter. Sie fehlt lediglich in der Zwischenphase von 50 bis 450 Jahren. Bis etwa zum Jahr 500 ist die Lärche als codominante Baumart vertreten.

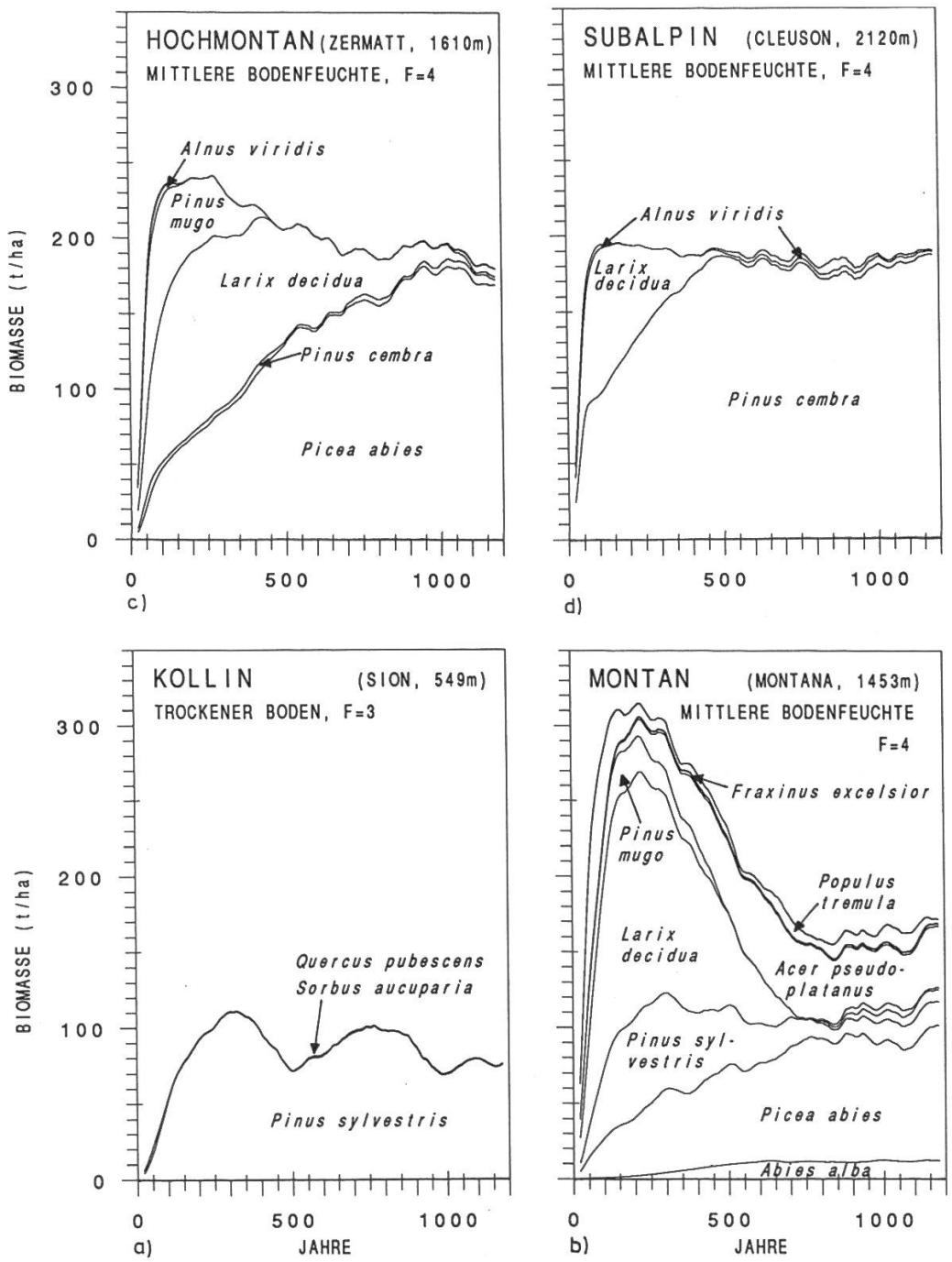

Abbildung 3. Simulierte Biomassenentwicklung der wichtigsten Baumarten in vier Höhenstufen des Mittelwallis. Die vertikale Distanz zwischen je zwei Kurven gibt die Biomasse einer Art wieder. Alle Simulationen beruhen auf Mittelwerten von 41 Bestandesflächen à $^1/_{12}$ ha. Die Bodenfeuchte der Standorte wird mit Hilfe der Zeigerwerte nach *Ellenberg* (1982) qualitativ beschrieben (F). Für alle Böden gilt ein gutachtlich festgelegter Wert für das pflanzenverfügbare Wasser von 100 mm. Die Daten für die Biomasse wurden jährlich berechnet und in Intervallen von fünf Jahren gespeichert. Für die Darstellung wurden gleitende Mittel über neun Datenpunkte berechnet.

Die Verifikation der vier Simulationen erfolgte mit Hilfe eines qualitativen Vergleichs zwischen simulierten und beobachteten Baumartenzusammensetzungen in den betreffenden Klimaregionen. Letztere stützen sich auf Angaben von Ellenberg und *Klötzli* (1972). Dieser Vergleich muss allerdings vorsichtig interpretiert werden, da anthropogen unbeeinflusste Wälder, wie sie das Modell simuliert, in der Schweiz kaum mehr vorhanden sind. Eine mögliche Alternative zum beschriebenen Vorgehen wäre ein Vergleich der Simulationen mit pollenanalytischen Daten, wie sie für den nordamerikanischen Bereich von Solomon und Shugart (1984) und Solomon und *Webb* (1985) durchgeführt wurde. Die Simulation für die kolline Stufe *(Abbildung 3a)* kann als Agglomerat von Waldstandorten innerhalb der Verbände der trockenheitsertragenden Eichen-Mischwälder *(Quercion pubescenti-petraeae)* und der Schneeheide-Föhrenwälder *(Erico-Pinion)* angesehen werden *(Burnand,* 1976; *Stein,* 1978). Die Simulation für die montane Stufe *(Abbildung 3b)* ist relativ heterogen. Sie repräsentiert Assoziationen innerhalb des Verbandes der Heidelbeer-Fichtenwälder *(Vaccinio-Piceion),* wobei zu Beginn wegen der relativ trockenen Bodenverhältnisse Elemente des *Erico-Pinion* vorkommen. Am nächsten kommt die Simulation in den ersten 500 Jahren der Assoziation des *Larici-Piceetums.* Nach dem Jahre 500 verschiebt sich das Schwergewicht zu den Assoziationen des *Melico-Piceetum.* Die Simulation in der hochmontanen Stufe muss eindeutig zum *Larici-Piceetum* gezählt werden, während die subalpine Sukzessionssimulation dem *Larici-Pinetum cembrae* zuzurechnen ist.

4.2 Sukzessionen im bewirtschafteten Wald

Neben den beschriebenen Sukzessionen unter natürlichen Konkurrenzbedingungen können mit dem Waldentwicklungsmodell auch anthropogene Einflüsse simuliert werden. In der *Abbildung 4a* ist dazu ein Beispiel wiedergegeben. Es handelt sich um eine Simulation für die kolline Stufe des Schweizerischen Mittellandes (Klimastation Bern). Zwei verschiedene Bewirtschaftungsmethoden wurden modelliert, die auf folgenden Annahmen beruhen:

- Von 0 bis 600 Jahren keine anthropogene Beeinflussung.
- In den Jahren 600 bis 700 (schraffierte Zone A, *Abbildung 4a)* Beginn einer Niederwaldbewirtschaftung mit einer Umtriebszeit von mindestens zehn Jahren. Das Startjahr wird zufällig bestimmt.
- In den Jahren 900 bis 950 (schraffierte Zone B, *Abbildung 4a)* Beginn einer Femelschlagbewirtschaftung und Pflanzung von Fichten (9600 Jungpflanzen pro ha).

Die Pionierphase der Simulation ist geprägt durch eine Dominanz von Aspe und einen starken Anstieg der Biomasse von Buche. Ab dem Jahr 150 wird das forstliche Ökosystem von Buche, Fichte und Ahorn dominiert. Die Artenzahl

nimmt während dieser Periode stark zu, und weitere Arten wie Esche *(Fraxinus excelsior)*, Linde *(Tilia cordata* und *platyphyllos)*, Hagebuche *(Carpinus betulus)*, Stieleiche *(Quercus robur)*, Ulme *(Ulmus scabra)* und Weisstanne gewinnen an Bedeutung. Während der Phase von 150 bis 600 Jahren kann die Simulation dem Unterverband der anspruchsvollen Buchenwälder *(Eu-Fagion)* zugeordnet werden. Am nächsten steht sie den Assoziationen des *Milio-Fagetum* und des *Cardamino-Fagetum tilietosum*. Die Niederwaldbewirtschaftung bedingt einen markanten Einbruch in der gesamten Biomasse und eine Artenverschiebung zugunsten der schnellwachsenden und Stockausschläge bildenden Arten. Die geringe Biomasse ist durch die häufige Holzentnahme bedingt. Der Femelschlagbetrieb mit Pflanzung von Fichte ist mit einem markanten Rückgang der Artenzahl verbunden.

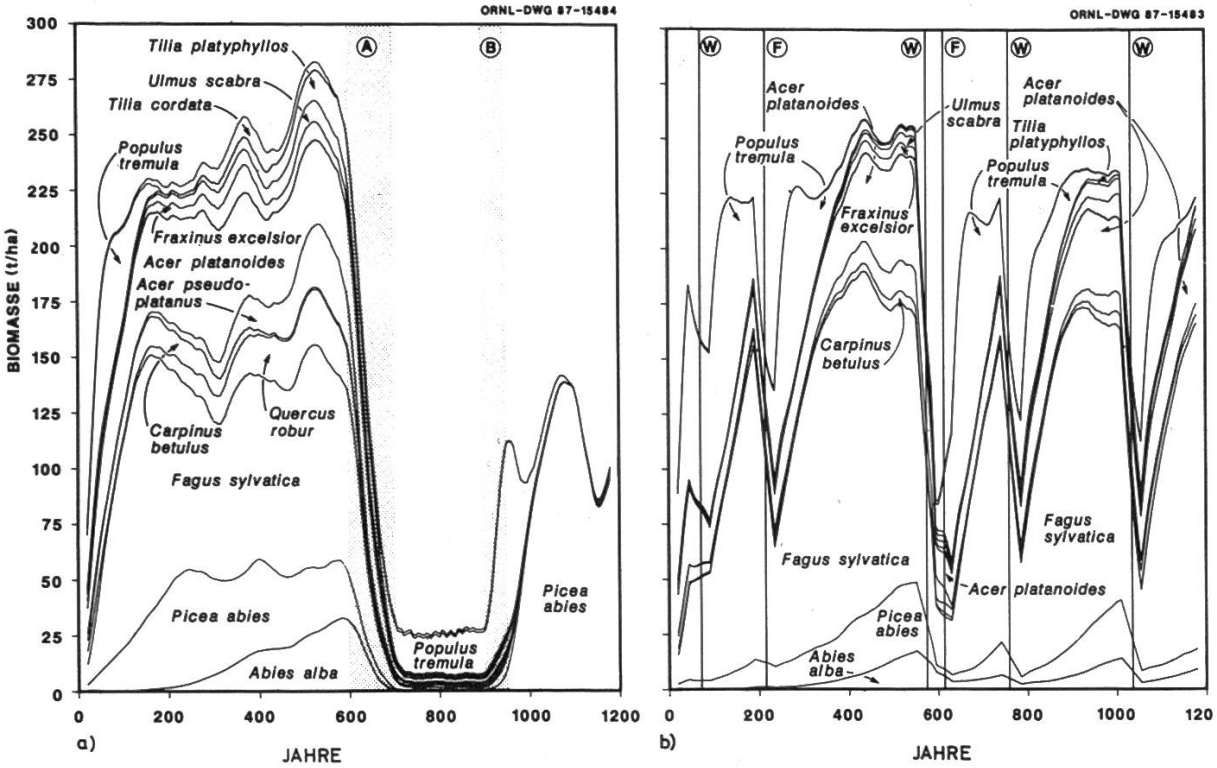

Abbildung 4. Simulierte Biomassenentwicklung der wichtigsten Baumarten in der kollinen Stufe des Schweizerischen Mittellandes unter dem Einfluss unterschiedlicher Waldbewirtschaftungen und natürlicher Störfaktoren. Die *Abbildung 4a* repräsentiert den Einfluss einer Niederwaldbewirtschaftung (ab A) und einer Femelschlagbewirtschaftung (ab B) auf ein natürliches Ökosystem. In der *Abbildung 4b* sind die Einflüsse von Wind (W) und Feuer (F) wiedergegeben. Die klimatischen und standörtlichen Bedingungen sind für beide Simulationen identisch (Klimastation Bern, mässig feuchte Bodenverhältnisse, Feuchtezahl = 5, pflanzenverfügbares Wasser = 100 mm).

4.3 Sukzessionen unter Wind- und Feuereinfluss

Der Einfluss von katastrophalen Wind- und Feuereinwirkungen auf eine natürliche Waldzusammensetzung der kollinen Stufe im Schweizerischen Mittelland ist in der *Abbildung 4b* dargestellt. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Windwurf mit katastrophalen Folgen ereignet sich zufällig einmal in 300 Jahren.
- Feuer mit katastrophalen Folgen ereignet sich zufällig einmal in 600 Jahren.
- 80% aller Probeflächen werden durch die Ereignisse betroffen.
- Ein katastrophaler Windwurf lässt alle Bäume mit BHD > 8 cm absterben.
- Ein katastrophales Feuer lässt alle Bäume auf der Probefläche absterben.

Die Biomassenentwicklung ist durch die externen Störungen geprägt und zeigt deutliche Einbrüche nach jedem Ereignis. Buche und Aspe vermögen sich nach einem katastrophalen Ereignis relativ gut durchzusetzen. Grundsätzlich durchlaufen die Probeflächen nach jeder Störung Pionierphasen, wie sie in den ersten Jahren bei der Simulation in *Abbildung 4a* festzustellen sind. Am deutlichsten ist dies in den Jahren 220 bis 550 und 800 bis 1000 ersichtlich, wo sich eine Baumartenzusammensetzung ergibt, die dem *Milio-Fagetum* sehr nahe steht.

5. Schlussfolgerungen und Diskussion

Die Anwendung des Waldentwicklungsmodells FORECE ergab plausible Baumartenzusammensetzungen und zeigte gute Übereinstimmungen zwischen simulierten und erwarteten Waldentwicklungen. Das Modell stellt somit ein geeignetes Arbeitsinstrument für waldökologische Fragestellungen dar und erlaubt es, Auswirkungen von getroffenen ökologischen Annahmen über lange Zeiträume objektiv abzuschätzen. In einem weiteren Schritt soll der Einsatz dieser Simulationstechnik in Waldschadenuntersuchungen und forstlichen Planungen geprüft werden. Ähnliche Ansätze sind bei *McLaughlin et al.* (1978), West *et al.* (1980) und Dale und Gardner (1987) zu finden. In der landschaftsökologischen Forschung kann das Modell zur Simulation natürlicher und anthropogener Veränderungen im Landschaftsgefüge herangezogen werden. Schliesslich ist der didaktische Gehalt des Simulationsmodells nicht zu unterschätzen. Obwohl die jetzige Version auf eine Grossrechenanlage ausgerichtet ist, wäre es denkbar, einfachere Fassungen auf kleiner dimensionierten Rechnern verfügbar zu machen und im Unterricht oder in der Forstpraxis einzusetzen.

Grenzen für die Interpretation ergeben sich aus der Tatsache, dass viele Prozesse stark vereinfacht simuliert werden. Dies ist teilweise beabsichtigt, um das Modell so einfach als möglich zu gestalten, rührt aber auch von einem Defizit an experimentellen Daten her. Oft mussten grobe Schätzungen durchgeführt

oder Eigenschaften von gut erforschten Baumarten gutachtlich auf weniger bekannte Arten übertragen werden. In diesem Bereich zeigt das Modell deutliche Lücken in der Waldökosystemforschung auf. Bei allen Simulationen ist zu beachten, dass das Modell die erste Jugendphase der Bäume bis zum durchschnittlichen BHD von 1,27 cm nicht einbezieht. Dabei bleiben aber wichtige Konkurrenzverhältnisse unberücksichtigt, die sich auf die später einstellende Waldzusammensetzung unter Umständen entscheidend auswirken können. Weiter tendiert das Modell in der jetzigen Form dazu, Baumarten mit grossen maximalen Höhen zu monopolisieren. Verantwortlich für dieses Phänomen ist die Formel für Lichtdurchlässigkeit durch das Kronendach, die in künftigen Simulationen zu überprüfen wäre. Schliesslich ist die Standortsdifferenzierung nach verschiedenen Nährstoffverhältnissen noch nicht durchgeführt, so dass die Simulationen immer einem Mittelwert aller Gegebenheiten entsprechen.

Verdankung

Die vorliegende Studie wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds (Gesuch Nr. 84 ZH 32) und durch das ETH-Projekt «Aménagement des forêts de montagnes endommagées» unterstützt. Der Fachbereich Bodenphysik des Instituts für Wald- und Holzforschung stellte in verdankenswerter Weise die Computeranlagen und andere Infrastruktur zur Verfügung. Prof. Dr. H. Flühler, Dr. B. Buchter und Dr. F. Schnider sei für die kritische Durchsicht des Manuskripts gedankt.

Résumé

Simulation de développements forestiers à l'aide de l'ordinateur

La mise au point d'un modèle d'ordinateur a permis de simuler différentes possibilités de l'évolution forestière dans deux régions suisses. Les simulations adaptées au Valais caractérisent des conditions de concurrence naturelles. Celles utilisées pour l'étage collinéen du plateau tiennent compte de l'exploitation forestière, ainsi que de perturbations dues au feu et au vent. Chaque simulation couvre une periode de 1200 ans. La régéneration, l'accroissement et le dépérissement d'arbres individuels sont simulés pour une multitude de petits échantillons d'une superficie de $^1/_{12}$ ha chacun. Le développement moyen de toutes les échantillons permet d'analyser les processus de succession au niveau régional. Toutes les simulations ont été comparées avec des compositions forestières observées dans la région correspondante. La vérification a montré que les évolutions forestières simulées sont plausibles et correspondent très bien aux compositions observées.

Literatur

Amann, G.,1954: Bäume und Sträucher des Waldes. Neumann, Neudamm.
Bernatzky, A., 1978: Tree ecology and preservation. Elsevier, Amsterdam.

Botkin, D. B., Janak, J. F., Wallis, J. R., 1972: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. J. Ecol., *60:* 849–872.

Burnand, J., 1976: *Quercus pubescens*-Wälder und ihre ökologischen Grenzen im Wallis (Zentralalpen). Veröff. Geobot. Inst. ETH Zürich, Stiftung Rübel, Nr. 59.

Bray, J. R., 1956: Gap-phase replacement in a maple-basswood forest. Ecology, *37:* 598–600.

Dale, V. H., Gardner, R. H., 1987: Assessing regional impacts of growth declines using a forest succession model. J. Environ. Manage., *24:* 83–93.

Dale, V. H., Doyle, T. W., Shugart, H. H., 1985: A comparison of tree growth models. Ecol. Modelling, *29:* 145–169.

Ellenberg, H., 1982: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. 3. Aufl. Ulmer, Stuttgart.

Ellenberg, H., Klötzli, F., 1972: Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt., *48:* 589–930.

Forman, R. T. T., Godron, M., 1981: Patches and structural components for a landscape ecology. BioScience, *31:* 733–740.

Fries, J, (ed.), 1974: Growth models for tree and stand simulation. Res. Notes 30, Department of Forest Yield Research, Royal College of Forestry, Stockholm.

Huston, M., Smith, T., 1987: Plant succession: life history and competition. Am. Naturalist. *130:* 168–198.

Kienast, F., 1987: FORECE – a forest succession model for Southern Central Europe. Report ORNL/TM-10575. Environmental Sciences Division. Publication No. 2989, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA.

Kienast, F., Kuhn, N. , 1989: Simulating forest succession along ecological gradients in Southern Central Europe. Vegetatio. (Im Druck).

McLaughlin, S. B., West, D. C., Shugart, H. H., Shriner, D. S., 1978: Air pollution effects on forest growth and succession: Applications of a mathematical model. In: H. B. H. Cooper (ed.), Proc. 71st Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, pp. 1–16.

Mitscherlich, G., 1970: Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Sauerländer, Frankfurt a. M.

Pastor, J., Post, W. M., 1985: Development of a linked forest productivity-soil process model. Report ORNL/TM-9519. Environmental Sciences Division. Publication No. 2455, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA.

Shugart, H. H., 1984: A Theory of Forest Dynamics. Springer, New York.

Shugart, H. H., West, D. C., 1980: Forest Succession Models. BioScience, *30:* 308–313.

Shugart, H. H., West, D. C., 1981: Long-term dynamics of forest ecosystems. American Scientist, *69:* 647–652.

Slatyer, R. O., 1977: Dynamic changes in terrestrial ecosystems: patterns of change, techniques for study and applications to management. MAB Technical Notes 4, Unesco, Paris.

Solomon, A. M., Shugart, H. H., 1984: Integrating forest-stand simulations with paleoecological records to examine long-term forest dynamics. In: G. I. Agren (ed.), State and Change of Forest Ecosystems – Indicators in current research, pp. 333–356, Swed. Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden.

Solomon, A. M., Webb, T., 1985: Computer-aided reconstruction of late-quarternary landscape dynamics. Ann. Rev. Ecol. Syst., *16:* 63–84.

Solomon, A. M., 1986: Transient response of forests to CO_2-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America. Oecologia (Berlin), *68:* 567–579.

Stein, N., 1978: Die standörtliche Verbreitung und klimaökologische Abgrenzung waldbildender submediterraner *(Quercus pubescens)*, subborealer *(Pinus silvestris)* und mitteleuropäisch-montaner Florenelemente *(Abies alba)* am Beispiel des mittleren Wallis (Zentralalpen). Geographica Helvetica, *33:* 93–112.

VanHulst, R., 1980: Vegetation dynamics or ecosystem dynamics: dynamic sufficiency in succession theory. Vegetatio, *43:* 147–151.

Watt, A. S., 1947: Pattern and process in the plant community. J. Ecol., *35:* 1–22.

West, D. C., McLaughlin, S. B., Shugart, H. H., 1980: Simulated forest response to chronic air pollution stress. J. Environ. Qual. *9:* 43–49.

West, D. C., Shugart, H. H., Botkin, D. B. (eds.) 1981: Forest succession: concepts and applications. Springer, New York.