

Quasikausale Modellierung des Standort-Leistung-Bezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestandsmodelle*

Modelling site dependent height growth as a basis for the design of growth-simulators for uneven-aged mixed species stands

Von M. KAHN

Zusammenfassung

Es wird ein Modell vorgestellt, mit dem die Entwicklung der Bestandesoberhöhe in Abhängigkeit vom Standort prognostiziert werden kann. In einem ersten Schritt wird ein System von Ursache-Wirkungsfunktionen aufgestellt, in das neben Klimavariablen auch CO₂ und NO_x sowie ursprünglich fachsprachlich kodierte Standortfaktoren wie Bodenfrische und Nährstoffversorgung mit aufgenommen werden. Zur Verdichtung der standörtlichen Wirkungswerte zu der gesuchten Höhenwachstumsgröße wird die Wachstumsdifferentialgleichung nach VON BERTALANFFY standortabhängig und auf breiter Datenbasis regressionsanalytisch parametrisiert. Das empirisch validierte Modell kann genutzt werden, um die Zuwachsreaktionskinetik von Einzelbäumen und Waldbeständen unter verschiedenen Klimaszenarien simulativ zu erschließen.

Summary

The design of a model is presented that can be used to predict forest and single tree height growth under varying climatic and site specific environmental conditions. In addition the model is designed to be implemented into a single tree growth simulator. In a first step a system of empirically parameterized response functions is developed that includes climate variables and soil characteristics as well as CO₂ and NO_x. The second step maintains the environment dependent formulation of the differential equation by VON BERTALANFFY to describe tree height growth as a factor of climate, soil and immissions. The model is empirically tested and examples of simulation results are given.

1 Motivation zur Standort-Leistung-Analyse

1.1 Leistungsschätzung im Mischbestand

Die Motivation zur quasikausalen Modellierung der Wuchsleistung von Bäumen und Beständen in Abhängigkeit vom Standort ist im wesentlichen auf zwei Problemfelder zurückzuführen, die einer dringenden Aufklärung bedürfen. Erstens ist im ungleichartigen und ungleichaltrigen Mischbestand wegen der abnehmenden Korrelation zwischen Alter und Baumhöhe bzw. zwischen Alter und z. B. mittleren Bestandeshöhen eine Leistungsschätzung, d. h. also eine Bonitierung über die Grundbeziehung Alter-Höhe, kaum mehr möglich. Demzufolge ist auch die mit der Bonitierung verbundene Schätzung von Zustandsgrößen wie dem Bestandesvolumen oder von Zuwachsgrößen wie dem Höhenzuwachs nur sehr ungenau. Hinzu kommt, daß die Begründung von strukturreichen Mischbeständen bereits heute von den Landesforstverwaltungen großflächig geplant und durchgeführt wird (vgl. OTTO 1989, 1991; PRETZSCH 1992a; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1993), was sogar von einer breiten Öffentlichkeit aufmerksam zur Kenntnis genommen wird (DER SPIEGEL 1994). Die waldwachstumskundlichen Kenntnislücken zum Wachstum im Mischbestand werden im Zusammenhang mit dem großflächigen Umbau unserer Wälder zum Problem, weil eine numerisch hinreichend genaue Quantifizierung und Modellierung der Wachstumsprozesse als Grundlage für ein ökonomisch und ökologisch erfolgreiches Mischbestandsmanagement nicht verfügbar ist.

* Langfassung eines Vortrags zur Forstlichen Hochschulwoche der LMU München 1994.

1.2 Standortänderungen

Ein zweites Problemfeld ergibt sich daraus, daß der forstliche Standort über der Zeit erheblichen Änderungen unterliegt, die zudem in relativ kurzen Zeiträumen ablaufen können. Gerade in Mischbeständen führen aber Standortänderungen zu komplizierten Verschiebungen im gegenseitigen Konkurrenzverhalten der Baumarten, welche die Planung der Mischbestandsbegründung und ihrer zukünftigen Pflege deutlich erschweren. Standortänderungen erschweren aber auch Planung und Kontrolle von Wirtschaftsmaßnahmen im Reinbestand. So weisen ULRICH und PUHE darauf hin, daß vor allem auf schwächeren und mittleren Standorten großflächig Leistungssteigerungen der Waldbestände beobachtet werden, die ganz besonders Jungbestände betreffen und wo „oftmals Zuwächse oberhalb der Ertragstafelgrenzen auftreten“ (ULRICH u. PUHE 1993, S. 91; vgl. HARI, RAUNEMAA u. HAUTOJARVI 1985; KELLER 1992).

1.3 Bestandeswachstumssimulatoren

Um diesen beiden Problemen entgegen treten und zu ihrer Lösung beitragen zu können, ist die Entwicklung von Analyse- und Prognoseinstrumenten für Rein- und Mischbestände eine Schwerpunktaufgabe der modellorientierten Waldwachstumsforschung (PRETZSCH 1992b). Künftige Wuchsmodelle sollten erstens im Hinblick auf die Bereitstellung der von der forstlichen Praxis benötigten Daten etwa für die Vorrats- und Nutzungsplanung in Rein- und Mischbeständen nutzbar sein und zweitens Entwicklungsszenarien für ein breites Spektrum von Standorten, Behandlungsvarianten, Baumartenzusammensetzungen und Mischungsformen der Bestände liefern. Um aber daneben auch interspezifische Konkurrenzverschiebungen in Mischbeständen aufgrund von Klimaverlagerungen und Schadstoffeinträgen modellhaft, aber wirklichkeitsnah simulativ nachbilden zu können, ist es erforderlich, Bestandeswachstumssimulatoren wie z. B. SILVA von PRETZSCH (1992a) durch Standort-Leistung-Modelle quasikausal zu untermauern. Dadurch ist die Entwicklung eines Standort-Leistung-Modells unmittelbar eingebunden in die aktuelle Mischbestandesforschung sowie in die ökologische und ökonomische Klimafolgenforschung. Unabhängig von den Standortänderungen, die über der Zeit ablaufen, und unabhängig von der damit verbundenen Motivation ist eine standortabhängige Parametrisierung der Modellfunktionen von Wachstumssimulatoren aber darüber hinaus auch noch aus einem weiteren, sehr pragmatischen Grund erforderlich: um nämlich die Wachstumssimulatoren großflächig für die forstliche Praxis einsatzfähig zu machen und nicht für beinahe beliebig viele Standorteinheiten voneinander unabhängige Modellparametrisierungen bereitstellen zu müssen.

2 Untersuchungsziel, Datenmaterial und Modellansatz

2.1 Untersuchungsziel

Im folgenden wird ein Modell vorgestellt, mit dem für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie die Entwicklung der Bestandesoberhöhe (der Spitzenhöhe h_{100}) über dem Alter in Abhängigkeit vom Standort prognostiziert werden kann. Aus biologischer Sicht ist die Wahl der Bestandesoberhöhe als eine erste Schnittstelle zwischen Standort und Wuchsleistung begründet durch die im Konkurrenzkampf der Baumindividuen um Raum und Licht entscheidende Bedeutung der Baumhöhe. Aus empirischer Sicht ist zu berücksichtigen, daß aus dem forstlichen Versuchswesen hauptsächlich bestandesbezogene Informationen zur Verfügung stehen. Dabei gilt die Entwicklung der Höhe bzw. der Oberhöhe als der Grundflächenmittelhöhe der 100 stärksten Bäume des Bestandes weitgehend als behandlungsunabhängig, auch wenn sie bei Hochdurchforstungen eine negative rechnerische Verschiebung erfahren kann (KRAMER u. AKÇA 1987; NEBE 1966). Ebenso orientiert sich an der Bestandeshöhe traditionell die standortbezogene Leistungsschätzung, indem sie bei gegebenem Alter die ausschließliche Eingangsgröße zur Ertragstafelbonitierung ist. Es ist

zudem relativ leicht möglich, die Bestandesoberhöhe unter bestimmten Einschränkungen auf ein potentiell mögliches Höhenwachstum des Einzelbaumes umzurechnen (vgl. KAHN 1994).

Mit der durch den Rückgriff auf den Standort quasikausalen Untermauerung von Wachstumsmodellen ist das Ziel verbunden, Waldwachstumssimulatoren wie z. B. SILVA von PRETZSCH (1992a) oder NEWS von NAGEL (1994) großflächig zu Managementzwecken und für die Ökosystemforschung weiter nutzbar zu machen. Aus Gründen der Praktikabilität sollen dazu Standortdaten verwendet werden, die ebenfalls großflächig verfügbar sind. Neben relativ hoch aggregierten langjährigen Mittelwerten aus Niederschlagssummen und Temperaturdaten der Wuchsbezirke werden auch ursprünglich fachsprachlich kodierte Standortcharakteristika, wie Bodenfrische und Nährstoffversorgung, in den Standort-Leistung-Kalkül mit einbezogen.

2.2 Datenmaterial

Das für die Standort-Leistung-Analyse zur Verfügung stehende Datenmaterial setzt sich aus insgesamt 277 Versuchspartzellen der Baumarten Buche (*Fagus silvatica*), Eiche (*Quercus robur* und *Quercus petraea*), Fichte (*Picea abies*), Kiefer (*Pinus silvestris*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) zusammen. Das Datenmaterial stammt mit 200 Versuchspartzellen zu dem größten Teil aus dem ertragskundlichen Versuchsflächenetz der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt in Göttingen. Es wird ergänzt durch sechs für diese Untersuchung äußerst wertvolle Buchenversuche aus der Schweiz, die von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf betreut werden. Hinzu kommen 71 Kiefernversuchspartzellen, die vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München geführt werden, so daß insgesamt 277 Versuchspartzellen für den Standort-Leistung-Kalkül zur Verfügung stehen.

2.3 Modellansatz

Die Modellierung des Standort-Höhenleistung-Bezuges steht unter der Prämisse, Extrapolierbarkeit über den zugrundeliegenden Datenbereich hinaus und biologisch gut interpretierbares Modellverhalten zu gewährleisten. Diese Prämisse ist programmatisch und impliziert beispielsweise für das Standortmodell, daß die Standortvariablen Bodenfrische und Nährstoffversorgung im Modell enthalten sein sollen, auch wenn ihr Einfluß auf die abhängige Variable (das Höhenwachstum) bei gegebenem Datenmaterial statistisch nicht signifikant ist. Für den Zusammenhang zwischen Ursache (die Ausprägung eines Standortfaktors) und Wirkung (eine Bestandesoberhöhe in einem bestimmten Alter) könnte dies bedeuten, daß nur ganz bestimmte Wirkungsfunktionen zulässig sind. Wird etwa eine Parabel als Wirkungsfunktion gewählt, so muß sie ein negatives Vorzeichen tragen, d. h., sie muß nach unten geöffnet sein, und ihr Maximum muß in einem relativ eng beschränkten Intervall liegen. Ist z. B. die Wirkung der Jahresniederschlagssumme auf die Höhenentwicklung der Fichte in einer (monokausalen) Funktion nachzubilden, so wäre es unplausibel, das Maximum der nach unten geöffneten Parabel bei weniger als 500 mm Niederschlag pro Jahr anzusetzen.

Im folgenden wird ein Vorgehen gewählt, das unter dem Ziel einer möglichst treffgenauen Nachbildung wirklicher Zusammenhänge und unter Nutzung der vorhandenen Daten bewußt bestimmte Annahmen über biologische Plausibilität im Zusammenhang zwischen Standort und Höhenwuchsleistung mit einschließt. Diese Annahmen betreffen erstens die Variablen, die im Modell enthalten sein sollen und zweitens die Art, wie jede dieser Variablen funktional in ihrer Wirkung auf das Höhenwachstum quantifiziert wird. Drittens schließen diese Annahmen aber auch den Ansatz mit ein, über den die Variablen in ihrer Gesamtheit zu einem Prognosemodell für das Höhenwachstum in Abhängigkeit vom Standort zusammengefaßt werden.

3 Standortvariablen und Wirkungstransformationen

Wenn auch die Zahl der wachstumsrelevanten Standortfaktoren prinzipiell sehr groß ist, so wird doch die Anzahl modellrelevanter Variablen aus zwei Gründen wesentlich eingeschränkt: erstens bleibt unter der Voraussetzung, daß das Höhenwachstum auf allen Versuchsflächenstandorten über den gleichen Satz von Standortfaktoren beschrieben wird, nur noch eine sehr begrenzte Menge an Variablen übrig. Das ist nämlich die Schnittmenge der Variablen, die auf allen Versuchsflächen erhoben wurden. Zweitens sollen diese Variablen identisch sein mit jenen, die im Rahmen der Standortkartierung großflächig erfaßt werden. Die regional gültigen Klimavariablen sind für alle Versuchsflächen über ihre Zugehörigkeit zu den Wuchsbezirken gegeben.

3.1 Bodenfrische und Nährstoffversorgung

Die beiden Variablen, für die aus den Standortbeschreibungen in den Versuchsakten zu allen Versuchspartellen Informationen vorliegen, sind die Nährstoffversorgung und die Bodenfrische. Diese beiden sind daher die einzigen lokalen Standortfaktoren, die in das Standort-Leistung-Modell eingehen.

Die Variablen Nährstoffversorgung und Bodenfrische sind ordinal skaliert, denn die verbalen Standortcharakterisierungen sind fachsprachlich kodiert. Aus diesem Grund müssen sie zunächst quantifiziert, d. h. auf metrisches Skalenniveau gebracht werden. Diese Transformation der ursprünglich ordinal skalierten Standortfaktoren Nährstoffversorgung und Bodenfrische auf metrisches Skalenniveau wird mittels des Konzeptes der linguistischen Variablen im Sinne der Theorie unscharfer Mengen bewältigt, was hier im einzelnen nicht näher erläutert wird (vgl. z. B. CHEN und HWANG 1992).

Es sei lediglich hinzugefügt, daß es sich hierbei nur darum handelt, die verbalen Fachbegriffe so zu transformieren, daß sie ebenso wie etwa Niederschlagssummen oder Temperaturmittelwerte zahlenmäßig in das Standort-Leistung-Modell eingehen können. Die sogenannten numerischen Approximationswerte der Fachbegriffe sind noch kontextfrei, d. h. mit ihnen ist noch keine Wirkung in bezug auf das Höhenwachstum verbunden. So wird einem trockenen Boden der numerische Wert 0,125 zugeordnet, unabhängig davon, ob auf dem Standort z. B. Buche, Eiche, Fichte oder Kiefer stockt (ebenso sagt eine Niederschlagssumme von 300 mm in der Vegetationszeit noch nichts darüber aus, inwieweit diese vorteilhaft für das Höhenwachstum von z. B. Buche oder Fichte ist). Welche Wirkung mit diesem Wert für die Baumarten in bezug auf das Höhenwachstum verbunden ist, wird durch die Wirkungstransformation zum Ausdruck gebracht (Abb. 1). Diese Wirkungstransformation soll, wie in Kapitel 2 bereits dargelegt worden ist, nicht nur zu treffgenauen Nachbildungen einer Wirklichkeit führen, wie sie aufgrund des vorliegenden Datenmaterials unter eingeschränkter statistischer Repräsentativität gegeben ist. Sondern sie soll darüber hinaus auch bei Extrapolationen biologisch plausible Resultate liefern.

Als Wirkungstransformationen werden daher unimodale Funktionen gewählt, die in dem Bereich einer optimalen Ausstattung eines Standortes mit einem bestimmten Standortfaktor ein Maximum aufweisen und im Hinblick auf mangelnde oder überreichliche Ausstattung mit fallenden Kurvenverläufen reagieren. Die Vorgehensweise zur Parametrisierung dieser Wirkungsfunktionen wird in Abschnitt 3.3 näher erläutert.

3.2 Klimavariablen sowie CO₂- und NO_x-Gehalt der Luft

Die regional gültigen Standortfaktoren, die in das Standort-Höhenleistung-Modell einbezogen werden, liegen auf metrischem Skalenniveau vor. Es sind dies Temperaturmittel und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit sowie der aus beiden Variablen errechnete Ariditätsindex nach DE MARTONNE, die Jahrestemperaturamplitude sowie die Dauer der Vegetationszeit in Tagen (vgl. ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1985). Zusätzlich zu

diesen Klimavariablen werden CO₂- und NO_x-Gehalt der Luft in das Modell integriert (IPCC 1990), so daß das Standortmodell einschließlich der beiden Bodenvariablen neun Standortvariablen umfaßt. CO₂- und NO_x-Gehalt der Luft können nur mit globaler Genauigkeit in das Modell einfließen, weil darüber kaum lokale Informationen vorhanden sind. Ebenso wie die Klima- und ggf. die Bodenvariablen können sie allerdings als zeitvariable Größen berücksichtigt werden.

3.3 Wirkungsfunktionen

Die Wirkungsfunktionen sind ein zentraler Bestandteil des Standort-Leistung-Modells. Über diese Funktionen werden die Standortvariablen monokausal auf ein dimensionsloses, auf [0;1] normiertes Höhenwachstum abgebildet. Dabei werden unimodale Funktionen verwendet, die z. B. bezogen auf die Niederschlagssumme in der Vegetationszeit folgenden biologisch plausiblen Zusammenhang wiedergeben sollen: wenn die Niederschlagssumme sehr niedrig ist, dann ist damit nur eine sehr niedrige positive Wirkung auf das Höhenwachstum verbunden. Steigen die Niederschläge, so soll auch das Höhenwachstum besser werden, bis ein Optimalbereich der Niederschlagsversorgung erreicht ist. Bei weiter steigenden Niederschlägen soll sich dann wieder das Höhenwachstum verschlechtern. Dieser Zusammenhang gilt analog auch für alle anderen Standortfaktoren, ungeachtet dessen, daß monokausale Darstellungen der Beziehungsgefüge zwischen Ursache (Ausprägung des Standortfaktors) und Wirkung (Höhenwachstum) nur unzureichende Nachbildungen der hochkomplexen Wirklichkeit sind.

Zur Parametrisierung dieser Wirkungsfunktionen wird ein dreistufiges Verfahren gewählt: Auf einer ersten Stufe wird das gesamte vorhandene Datenmaterial der Alters-Höhenbeziehungen für jede betrachtete Baumart durch die Wachstumsfunktion nach VON BERTALANFFY (vgl. KAHN 1994) regressionsanalytisch ausgeglichen (Abb. 2). Diese Wachstumsfunktion definiert ein sogenanntes Referenzwachstum h_{ref} .

Auf einer zweiten Stufe wird jeder wirkliche Oberhöhenwert durch den bei gegebenem Alter entsprechenden Referenzwert h_{ref} dividiert, womit relative, zeitinvariante Oberhöhen vorliegen. Für jede Baumart wird dann das Maximum dieser relativen Oberhöhen bestimmt, wonach alle relativen Oberhöhenwerte durch dieses Maximum dividiert werden. Damit

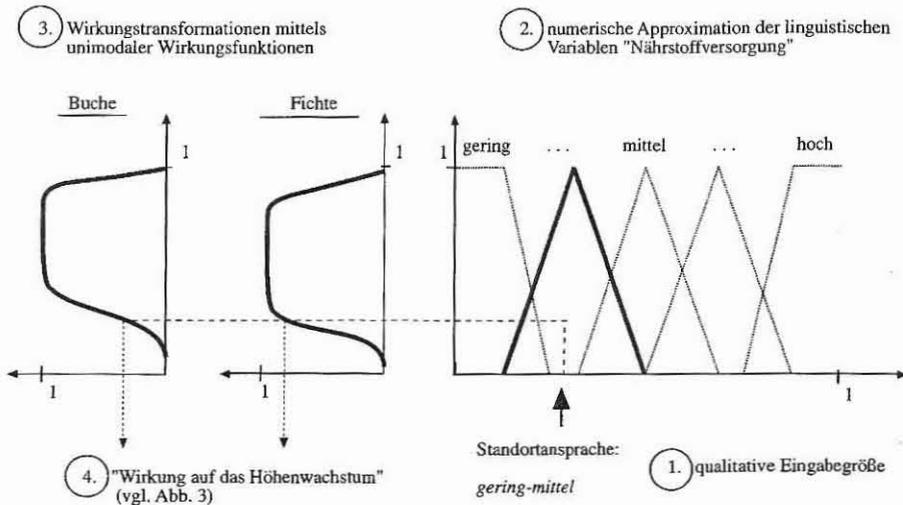


Abb. 1. Die Wirkungstransformation von primär verbalen Standortvariablen

Fig. 1. Transforming ordinal scaled input data into numerical response values

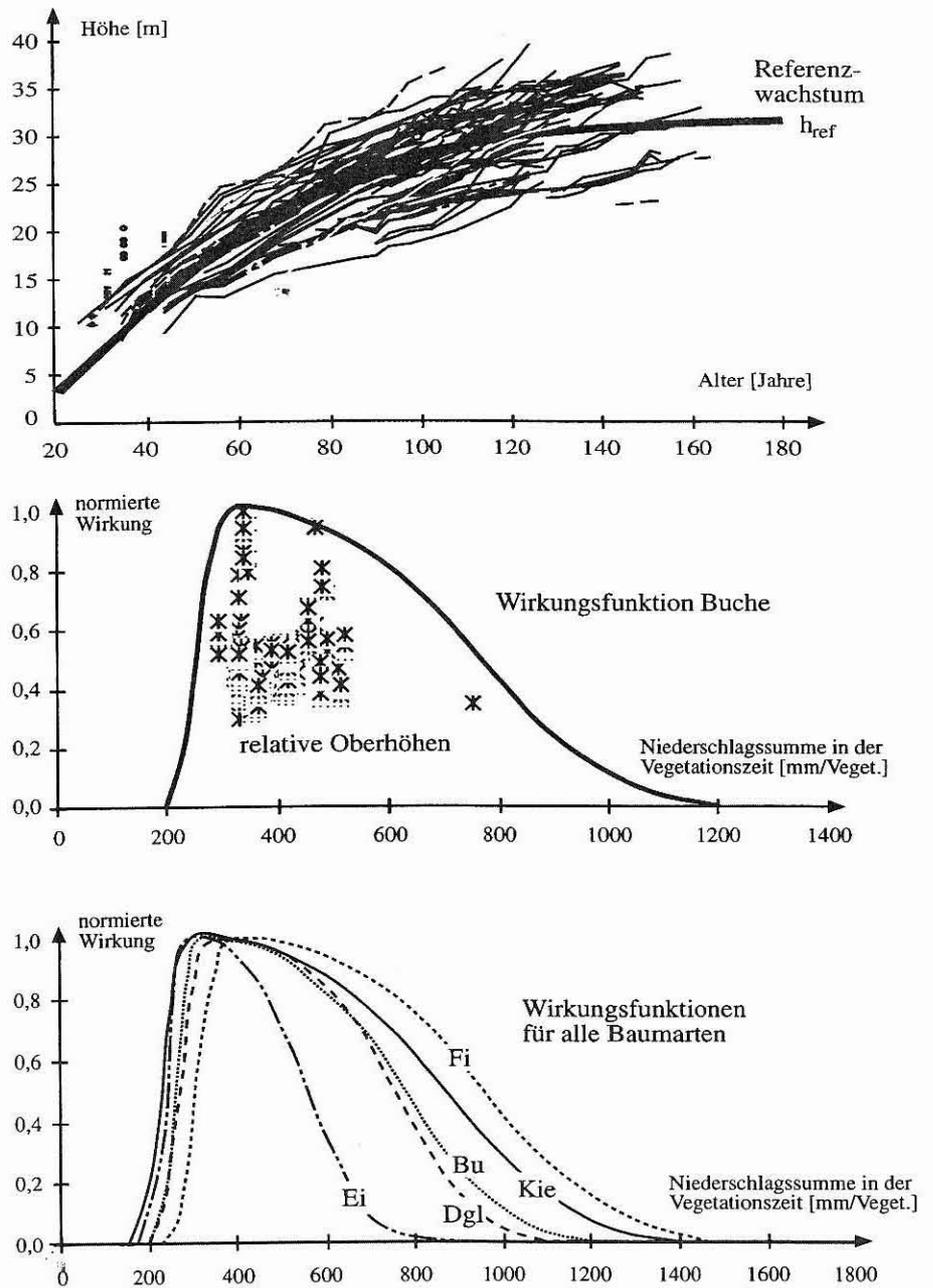


Abb. 2. Empirisch gestützte Parametrisierung von Wirkungsfunktionen. Oben: Berechnung einer Referenzfunktion für alle Alter-Oberhöhen-Wertepaare der Buche. Mitte: Die relativen Oberhöhen werden über der Standortvariablen aufgetragen, und eine Wirkungsfunktion wird angepaßt. Unten: Vergleich der Wirkungsfunktionen für alle Baumarten

Fig. 2. Empirical aided design of response functions. Top: Calculation of a reference function for beech. Centre: Fitting of a response function over the relative top height values. Bottom: Comparison of the response functions for all tree species

nimmt die größte relative Oberhöhe den Wert 1 an. Nun werden diese relativen Oberhöhen für die Baumarten getrennt über den einzelnen Standortvariablen graphisch dargestellt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Informationen aus dem wissenschaftlichen Schrifttum wird schließlich die Wirkungsfunktion so parametrisiert, daß der Verlauf des Funktionsgraphen biologisch möglichst plausibel ist und zugleich die Punktwolkendarstellung der relativen Oberhöhen weitgehend abdeckt.

Auf der dritten und letzten Stufe werden schließlich die Wirkungsfunktionen für alle betrachteten Baumarten miteinander verglichen. Dabei erfolgt gegebenenfalls eine Anpassung der Funktionsparameter, so daß die Wirkungsfunktionen in gegenseitiger Relation der Baumarten plausibel sind (vgl. Abb. 2). Es ist wichtig, diese Vorgehensweise zur Erzeugung einer gewünschten Modellstruktur vor dem Hintergrund einer biologisch plausiblen Modellierung zu interpretieren. Bei einer rein statistischen Vorgehensweise, die sich nur auf das vorhandene Datenmaterial gestützt hätte, wäre es kaum möglich gewesen, für eine einzelne Baumart und auch nur eine Standortvariable eine unimodale Wirkungsfunktion zu parametrisieren, die einer Vorstellung von biologischer Plausibilität nahe gekommen wäre. Ebenso wenig hätte sich eine plausible Wirkungsrelation der Baumarten in bezug auf bestimmte Standortfaktoren realisieren lassen.

Die Wirkungsfunktionen bilden die Standortvariablen baumartenspezifisch auf einen auf [0;1] normierten Wirkungsraum ab. Beispielsweise führt eine durchschnittliche Niederschlagssumme von 300 mm in der Vegetationszeit bei der Buche zu einem Wirkungswert von 0,944 und bei der Fichte zu 0,383. Ebenso führen auch die Ausprägungen der übrigen Standortfaktoren zu Wirkungswerten, die zwischen 0 und 1 liegen.

4 Standort-Leistung-Modell

Geeignete mathematische Modelle zur Beschreibung der Höhenentwicklung sind z. B. Wachstumsfunktionen, Zuwachsfunktionen oder auch Differentialgleichungen. Im folgenden wird gezeigt, wie die Wirkungsfunktionen so verknüpft werden können, daß damit eine standortabhängige Parametrisierung einer Wachstumsdifferentialgleichung eine Höhenzuwachsprognose ermöglicht (zu alternativen Ansätzen vgl. KAHN 1994). Die Wachstumsdifferentialgleichung nach VON BERTALANFFY (vgl. RICHARDS 1959) lautet:

$$\frac{dh}{dt} = \eta \cdot h^m - \kappa \cdot h$$

Es sind:

$$\frac{dh}{dt} = \text{Höhenzuwachs}$$

h = Baum- bzw. Bestandeshöhe

η = Anabolismuskonstante

κ = Katabolismuskonstante

m = Allometrikoeffizient

Diese Gleichung hat drei Parameter, die Metabolismuskonstanten η und κ sowie den Allometrikoeffizienten m. Dieser bestimmt sich unter Überlegungen der Volumenproportionalität zu 2/3 und wird hier mit diesem Wert übernommen (vgl. z. B. WENK, ANTANAITIS, SMELKO 1990). Zur standortabhängigen Parametrisierung verbleiben also nur die beiden Metabolismuskonstanten η und κ , die demnach als Funktionen vom Standort zu modellieren sind. An dieser Stelle wird auf eine mathematische Notation dieser Funktionenmodelle verzichtet und eine graphische Repräsentation der Modellstruktur gewählt (Abb. 3): zunächst werden drei komplexe ökologische Faktoren „Nährstoffe“, „Wärme“ und „Feuchtigkeit“ gebildet (vgl. ANDERS 1988). „Nährstoffe“ setzt sich zusammen aus den Variablen Nährstoffversorgung des Bodens sowie NO_x - und CO_2 -Gehalt der Luft, „Wärme“ wird gebildet aus den Variablen Dauer der Vegetationszeit, Jahrestemperaturamplitude sowie Mitteltemperatur in der Vegetationszeit. „Feuchtigkeit“ schließlich ergibt sich aus den

Standortvariablen Bodenfrische und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit sowie einem Ariditätsindex nach DE MARTONNE.

Die komplexen Faktoren können nun unterschiedlich auf die Anabolismuskonstante η und die Katabolismuskonstante κ des Wachstumsdifferentials wirken. Daher ist zu formulieren

$$\eta = f(\text{Nährstoffe, Wärme, Feuchtigkeit})$$

und

$$\kappa = g(\text{Nährstoffe, Wärme, Feuchtigkeit}).$$

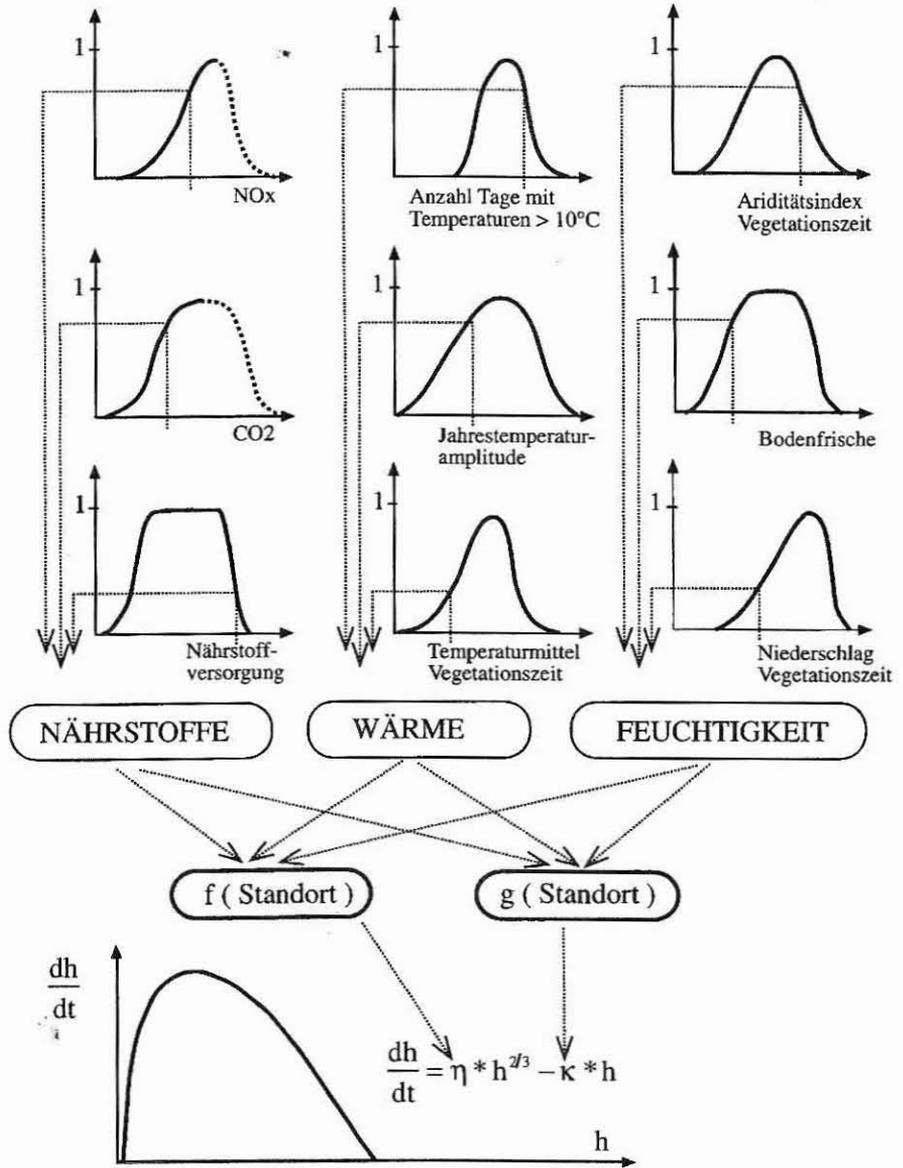


Abb. 3. Struktur des Modells zur standortgestützten Prognose der Höhenentwicklung
 Fig. 3. Structure of the model to predict height growth as a function of site conditions

Die Parameter der Funktionen f und g sowie der Funktionenmodelle, die zu den komplexen ökologischen Faktoren führen, können regressionsanalytisch unter Verwendung des umfangreichen Datenmaterials angepaßt werden. Diese Regressionskoeffizienten können als Kompensationsgrade im Sinne einer biologischen Wirkungskompensation interpretiert werden (vgl. KAHN 1994; ZIMMERMANN 1991). Das Phänomen der Kompensation äußert sich biologisch z. B. in der relativen Standortkonstanz. Denn für „die Pflanze ist es gleichgültig, ob günstige Wärmeverhältnisse am Standort durch das Großklima bedingt werden oder orographisch durch den Biotop, z. B. an einem Südhang, bzw. edaphisch durch leicht erwärmbaren Sandboden. Ebenso können günstige Wasserverhältnisse klimatisch auf hohe Niederschläge oder orographisch auf eine feuchte Tallage, bzw. edaphisch auf einen hohen Grundwasserstand zurückzuführen sein“ (WALTER 1979, S. 155). Die Grundmengen, über denen hier im Beispiel die Kompensation zu beobachten ist, sind „Wärme“ (Großklima vs. Südhang) bzw. „Wasserversorgung“ (Niederschlag vs. Grundwasser). Beispielhaft vermerkt NEBE für die Fichte, daß sie bei geringen Regensummen in der Vegetationszeit auch dann zu gedeihen vermag, „wenn die fehlenden Niederschläge durch Grund- oder Stauwassereinfluß ausgeglichen werden“ (NEBE 1968, S. 1231). In dem Standortmodell kommt diese Art der Kompensation in den komplexen Faktoren „Nährstoffe“, „Wärme“ und „Feuchtigkeit“ zum Ausdruck.

Das biologische Phänomen der Kompensation zeigt sich aber auch über verschiedenen Grundmengen: die Buche stellt z. B. bei hohem Nährstoffangebot geringere Ansprüche an die Feuchtigkeit, und sie kann andererseits „bei zusagendem Klima auch noch auf chemisch recht armen Böden Gutes leisten (. . .), wenn eine ausreichende und ständige Wasserversorgung gewährleistet ist“ (WALDBAUISTITUT GÖTTINGEN 1987, S. 73). Diese Beobachtung der Kompensation über verschiedenen Variablen (Wärme vs. Wasserversorgung) machten auch RÖHE bei der Buche in Baden-Württemberg (RÖHE 1985) und z. B. NEBE bei der Fichte (NEBE 1966). In dem Standortmodell kommt diese Art der Kompensation in den Funktionen f und g (also zwischen den komplexen ökologischen Faktoren) zum Ausdruck.

5 Simulationen und Diskussion

Um das Prognoseverhalten des Standortmodells simulativ aufzuzeigen, wird beispielhaft für sämtliche betrachteten Baumarten untersucht, wie sich ihre Höhenentwicklungsverläufe bei Klimaänderungen verschieben werden. Als Vergleichsmaßstab bei der Simulation von Klimaschwankungen und damit möglicherweise verbundenen Änderungen in den Wachstumsrhythmen wird die Versuchsfläche Kasel 12 gewählt. Der Ertragsversuch Kasel 12 wird von der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen betreut. Es handelt sich um eine stark hochdurchforstete Traubeneichen-Ertragsprobefläche, die heute seit mehr als 90 Jahren unter waldwachstumkundlicher Beobachtung steht. Der Bestand war bei Anlage des Versuchs im Jahr 1903 bereits 98jährig, und er befindet sich im Wuchsbezirk Mittleres Moseltal.

Im Rahmen der Simulation mit dem Standortmodell wird in einem ersten Schritt prognostiziert, wie sich die Bestandesoberhöhen von Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie bei der gemäß den Versuchsakten vorliegenden Standortsituation über dem Bestandesalter entwickeln. In einem zweiten Schritt wird ein Klimaszenario unterstellt, bei dem ab einem Bestandesalter von 103 Jahren die Durchschnittstemperatur in der Vegetationszeit sowie die Jahrestemperaturamplitude um jeweils 1 °C fallen. Die Anzahl der Tage mit Temperaturen über 10 °C verringert sich zugleich um 20 Tage, und die Niederschlagssummen in der Vegetationszeit steigen um 70 mm. Es wird simulativ untersucht, wie die Baumarten in ihrer Höhenentwicklung auf diesen Klimaumschwung reagieren.

Die Simulationsrechnungen ergeben zunächst, daß das reale Höhenwachstum der Eiche auf der Versuchsfläche Kasel 12 gering unterschätzt wird (Abb. 4). Es ergibt sich zudem zwischen den Baumarten eine deutliche Staffelung der über dem Alter erreichten Höhen.

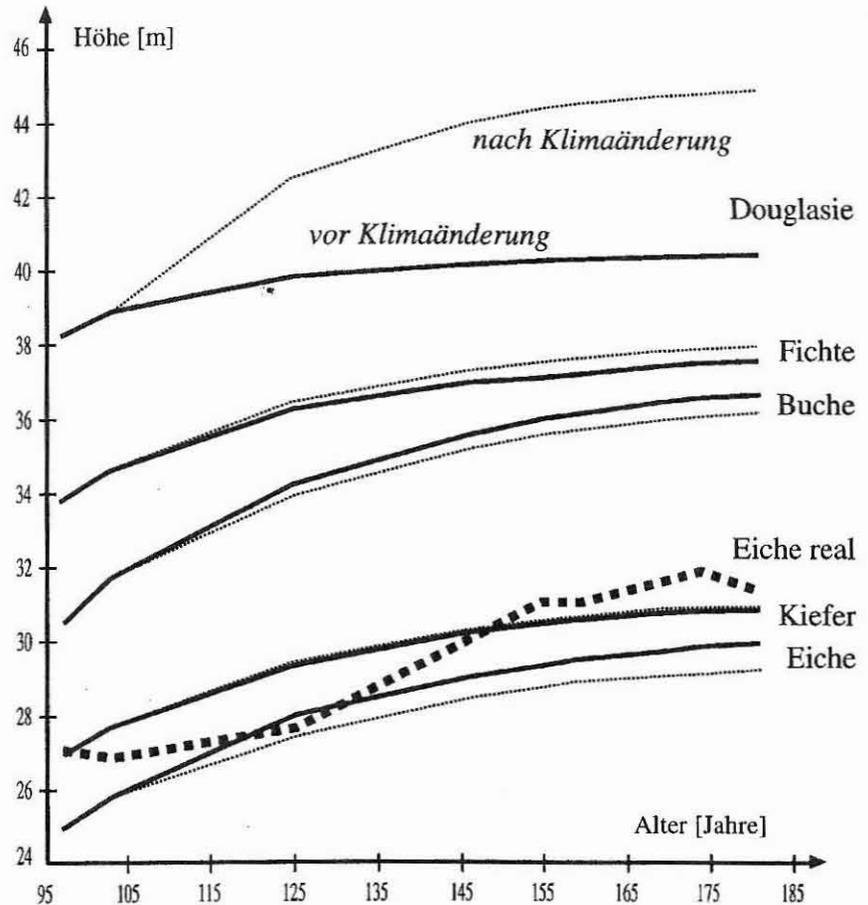


Abb. 4. Simulierte Verschiebung von Höhenentwicklungen bei Klimaänderung im Vergleich mit dem wirklichen Oberhöhenverlauf (Eiche real) auf der Eichen-Versuchsfläche Kasel 12

Fig. 4. Simulated changes in height growth as an effect of climatic changes in comparison with the real top height development of oak from the experimental plot Kasel 12

Die Höhendifferenz zwischen Fichte und Buche wird dabei mit zunehmendem Alter deutlich geringer, die Douglasie ist allen anderen Baumarten klar überlegen.

Aufgrund der fallenden Temperaturen und steigenden Niederschläge gemäß dem unterstellten Klimaszenario sinkt die Prognose für Eiche merklich, trotz des bereits fortgeschrittenen Bestandesalters. Die Kiefer zeichnet auf das Klimaszenario fast überhaupt nicht. Für die Buche, die der Eiche in der Höhenentwicklung deutlich überlegen ist, scheint das Klimaszenario die Standortbedingungen geringfügig zu verschlechtern, und die Fichte erfährt durch die Standortänderungen eine leichte Verbesserung. Am stärksten wirkt sich der Klimawechsel bei der Douglasie aus, denn sie verbessert ihre Höhenleistung ganz enorm.

Die Reagibilität der Baumarten auf die simulierte Klimaverschiebung hängt wesentlich davon ab, wie groß der Abstand zwischen der aktuellen Oberhöhe und der bei der neuen Klimasituation maximalen Oberhöhe ist. Wie aus der Wachstumsdifferentialgleichung nach VON BERTALANFFY leicht ersichtlich ist, ist der Höhenzuwachs altersunabhängig. Die Differenz zwischen „alter und neuer potentieller Oberhöhe“ selbst ist von der „Lage des alten

und neuen Standortes im Wirkungsraum“ abhängig. Eine große Änderung der Merkmalsausprägung eines Standortfaktors (z. B. der Niederschlagssumme) mag nichts bewirken, weil zufällig unterhalb und oberhalb des Wirkungsoptimums die gleichen Wirkungswerte getroffen wurden. Eine kleine Änderung kann indessen, wie im Beispiel bei der Douglasie, starke Wirkungen entfalten, weil die Steigung der Wirkungsfunktion in dem entsprechenden Bereich der Merkmalsausprägung hoch ist. Biologisch plausibel ist zudem, daß die Baumarten auf die gleiche Klimaänderung nicht in gleichem Maße reagieren. So führt die Niederschlagsserhöhung bei der Buche zu kaum meßbaren, bei der Fichte hingegen zu sehr starken Wirkungsänderungen (Abb. 5).

Es ist also möglich und vom Modell auch wiedergebbar, daß baumartenspezifische Reaktionsmuster als Folge von Standortänderungen auftreten. Diese baumartenspezifischen Reaktionsmuster haben zur Folge, daß etwa in Mischbeständen aufgrund von Klimaänderungen Verschiebungen in der interspezifischen Konkurrenz der Baumarten auftreten können, die mit dem Standortmodell simulativ sichtbar gemacht werden können. In dem Beispiel zeigt sich dies etwa daran, daß die Fichte durch den Klimaumschwung eine Verbesserung und die Buche eine Verschlechterung in ihrer Höhenentwicklung erfährt. In einem Buchen-Fichten-Mischbestand wären also Konkurrenzverschiebungen zwischen den Baumarten zu erwarten, auf die möglicherweise mit veränderten Pflegekonzepten zu reagieren wäre.

6 Abschließende Beurteilung des Standort-Leistung-Modells

Das Leitbild der biologischen Plausibilität ist von zentraler Bedeutung für das gesamte Modellierungsvorhaben. Es ist sozusagen ein Ersatz für eine auf der gewählten ökosystemaren Beschreibungsebene nicht erreichbare Kausalität und beinhaltet zwei Aspekte: zum einen eine biologisch plausible Methodik und zum anderen biologisch plausible Ergebnisse. Dieses Leitbild konnte auf weiter Strecke erfüllt werden. Die unimodalen Wirkungsfunktionen untermauern quasikausal das Ursache-Wirkungs-Gefüge zwischen Standort und Wachstum. Die Wirkungswerte werden unter Zuhilfenahme unscharfer Aggregationsoperatoren so verknüpft, daß z. B. auch Kompensation zwischen den Ausprägungen der Standortfaktoren nachbildbar ist, wie etwa das Phänomen der relativen Standortkonstanz. Auch das umfangreiche Datenmaterial konnte im Rahmen von Regressionsanalysen genutzt werden. Als Regressionsmodell wurde die Wachstumsdifferentialgleichung nach VON BERTALANFFY zugrunde gelegt, die ebenfalls den theoretischen Anforderungen an biologische Plausibilität und empirische Brauchbarkeit genügt.

Dabei ist im Hinblick auf die kausale Untermauerung von Waldwachstumssimulatoren und den gegebenen methodischen Möglichkeiten festzustellen, daß letztlich nur die öko-physiologischen, mechanistischen Wachstumsmodelle erstrebenswert sein können (vgl. PRETZSCH 1992a). Der Sinn qualitativer Modellierung, wie z. B. durch Entwicklung des Systems der Wirkungsfunktionen oder der Aggregationsmechanismen, ist doch weitgehend darin zu sehen, theoretisch oder auch z. B. experimentell auf Laborebene entwickelte Hypothesen ganzheitlich darzustellen, um Erkenntnisfortschritt zu ermöglichen. Fehlende Daten und fehlendes Systemwissen zwingen zu dieser Vorgehensweise und können dadurch vielleicht ergänzend simulativ erschlossen werden, wobei zusätzliche empirische Forschung unersetzlich ist. Denn der Informationsbedarf zur Konstruktion und Validierung mechanistischer Modelle unterscheidet sich noch stark von dem, was etwa im Rahmen der Forsteinrichtung oder Standortkartierung verfügbar ist und auf absehbare Zeit sein wird. Insofern ist der hier realisierte und dem Wachstumssimulator SILVA von PRETZSCH (1992a) implementierte Ansatz zur Standort-Leistung-Modellierung eine pragmatische Notwendigkeit, und er soll eine Brücke zwischen empirischer und theoretischer Forschung sein.

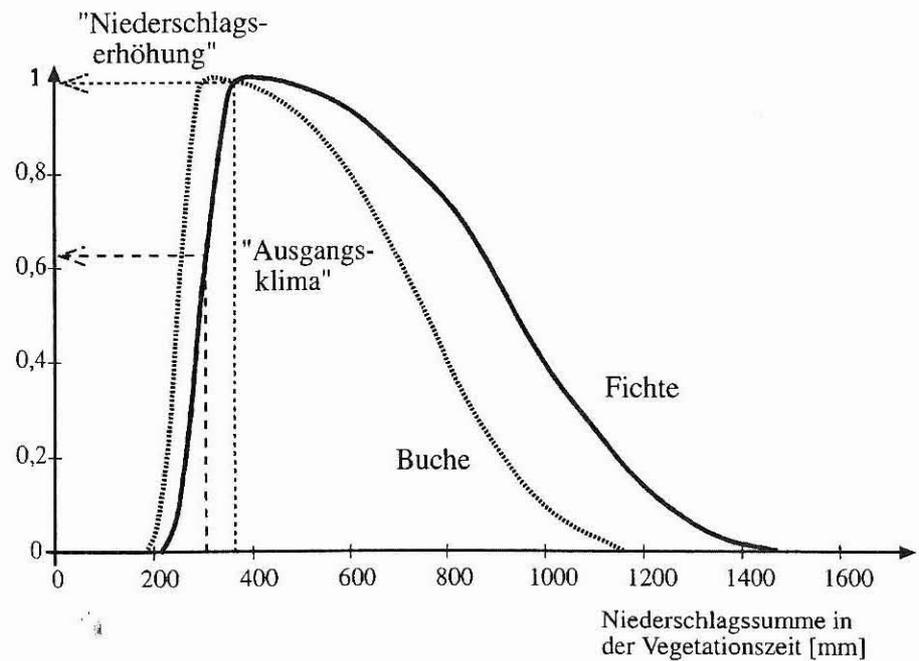
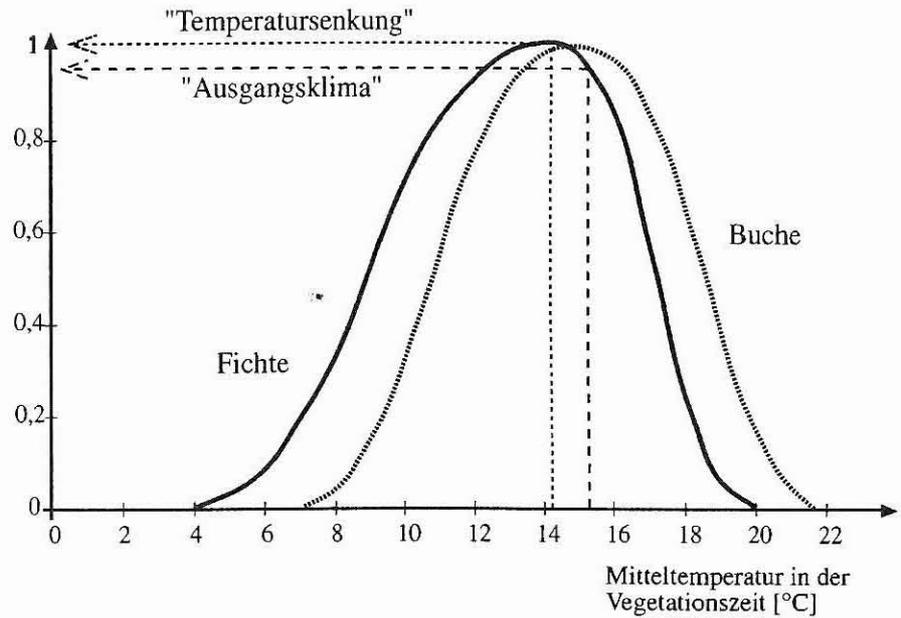


Abb. 5. Die Wirkungsänderung von Mitteltemperatur (Bild oben) sowie Niederschlagssumme (Bild unten) in der Vegetationszeit auf das Höhenwachstum von Buche und Fichte aufgrund von Klimaveränderungen

Abb. 5. Changes in the effect of mean temperature (upper fig.) and precipitation (lower fig.) during growing season on height growth of beech and spruce as a result of climate change

Literatur

- ANDERS, S., 1988: Modelle der ökofaktorabhängigen Stoffproduktion gleichaltriger Baumholzreinbestände von Kiefer und Buche. Dissertation (B), Technische Universität Dresden.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG, 1985: Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland, vom Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1993: Anlage zu den Grundsätzen für die waldbauliche Behandlung der Fichte im bayerischen Staatswald, Landesministerielles Schreiben Nr. F4-W 100-106 vom 15. 4. 1993.
- CHEN, S.-J.; HWANG, C.-L., 1992: Fuzzy Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 375. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- DER SPIEGEL, 1994: Der Öko-Wald. Rezept gegen das Baumsterben. Nr. 48, S. 54-70.
- HARI, P.; RAUNEMAA, A.; HAUTOJARVI, A., 1985: The effects on forest growth of air pollution from energy production. *Atmospheric Environment* 20, 129-137.
- IPCC, 1990: Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Report prepared for IPCC by Working Group I, edited by Houghton, J. T.; Jenkins G. J.; Ephraums, J. J. Meteorological Office, Bracknell. Cambridge: University Press.
- KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 141.
- KELLER, W., 1992: Bonität in Fichten-Folgebeständen ehemaliger Fichten-Versuchsflächen der WSL. Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung vom 1.6.-3.6.1992, Grillenburg/Sachsen.
- KRAMER, H.; AKÇA, A., 1987: Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Frankfurt/M.: Sauerländer's Verlag.
- NAGEL, J., 1994: Niedersächsischer Ertragskundlicher Waldwachstumssimulator NEWS. Unveröffentlichtes Manuskript aus der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt.
- NEBE, W., 1966: Über die Standortbedingungen optimal wachsender Fichtenbestände. *Die sozialistische Forstwirtschaft*, 268-271.
- NEBE, W., 1968: Über Beziehungen zwischen Klima und Wachstum der Fichte (*Picea abies*) in ihrem europäischen Verbreitungsgebiet. *Archiv für Forstwesen* 17, 1219-1238.
- OTTO, H.-J., 1989: Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten, Band 1. Mitteilungen aus der Niedersächsischen Landesforstverwaltung. Aus dem Walde, Heft 42.
- OTTO, H.-J., 1991: Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten, Band 2. Mitteilungen aus der Niedersächsischen Landesforstverwaltung. Aus dem Walde, Heft 43.
- PRETZSCH, H., 1992a: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 115.
- PRETZSCH, H., 1992b: Wuchsmodelle für Mischbestände als Herausforderung für die Waldwachstumsforschung. *Forstw. Cbl.* 111, 87-105.
- RICHARDS, F. J., 1959: A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10, 29, 290-300.
- RÖHE, P., 1985: Untersuchungen über das Wachstum der Buche in Baden-Württemberg. Dissertation 1984 Universität Freiburg, Selbstverlag der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart.
- ULRICH, B.; PUHE, J., 1993: Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderung auf mitteleuropäische Waldökosysteme und deren Rückkopplungen auf den Treibhauseffekt. Forschungszentrum Wald-Ökosysteme der Universität Göttingen, unveröffentlichter Studienbericht für die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages.
- WALDBAUINSTITUT GÖTTINGEN, 1987: Die einheimischen und die wichtigsten fremdländischen Baumarten. Aus dem Institut für Waldbau, Abteilung für Waldbau der Tropen und Naturwaldforschung, Universität Göttingen.
- WALTER, H., 1979: Allgemeine Geobotanik. 2. Aufl. UTB 284. Stuttgart: Ulmer, UTB 284.
- WENK, G.; ANTANAITIS, V.; SMELKO, S., 1990: Waldertragslehre. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- ZIMMERMANN, H.-J., 1991: Fuzzy set theory and its applications. 2nd ed. Lancaster, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Anschrift des Verfassers: Dr. MARKUS KAHN, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Forstliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München, Hohenbachernstraße 22, D-85354 Freising

