



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL

Evaluation eines klimasensitiven Waldwachstums- und Behandlungsmodells für die Schweiz

Schlussbericht an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Projektnummer: 2011.15

Juli 2013

Verfasser: Clemens Blattert und Renato Lemm

Durchführung:

Eidg. Forschungsanstalt WSL
Gruppe Forstliche Produktionssysteme
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf

Projektleitung: Dr. Renato Lemm

Projektbearbeiter: Clemens Blattert

Förderung:

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Wald
CH-3003 Bern

Sachbearbeiter: Werner Riegger

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung.....	6
2 Ziel des Projektes.....	8
3 Methoden.....	8
3.1 Sichtung.....	9
3.2 Vorauswahl.....	10
3.3 Endauswahl	10
4 Modellsichtung.....	12
4.1 Vom System zum Modell.....	12
4.2 Arten von Waldwachstumsmodellen	14
4.2.1 Managementbasierte Ertragsmodelle.....	15
4.2.2 Prozessmodelle.....	16
4.2.3 Hybridmodelle	17
4.2.4 Ökologische Sukzessionsmodelle (Gap Modell)	18
4.2.5 Biommodelle (Vegetation Distribution Model).....	19
4.2.6 Ökologische Prozessmodelle	19
4.2.7 Welche Modellansätze sind geeignet?.....	20
4.3 Struktur von Waldwachstumsmodellen.....	20
4.3.1 Zuwachsfunktionen	21
4.3.2 Eingriffs- und Mortalitätsmodelle	22
4.3.3 Konkurrenz	25
4.3.4 Kronenmodelle	26
4.3.5 Mass für die Standortsgüte	26
4.3.6 Verjüngungsmodelle.....	28
4.3.7 Fehlende Ausgangsinformationen	28
4.4 Nutzen von Waldwachstumsmodellen	29
4.5 Zukünftige Schwerpunkte in der Modellierung.....	29
4.6 Ergebnis der Modellsichtung.....	30
5 Vorauswahl.....	31
5.1 Beschreibung der Modelle	31
5.1.1 FBSM.....	31
5.1.2 SiWaWa	32
5.1.3 MASSIMO.....	33

5.1.4	ForClim	34
5.1.5	SILVA	36
5.1.6	PrognAus	37
5.1.7	MOSES	39
5.1.8	BWINPro	40
5.1.9	PICUS	41
5.1.10	STAND	43
5.1.11	MOTTI	44
5.1.12	FVS	45
5.1.13	FORECAST	47
5.1.14	TASS	48
5.2	Bewertung und Vorauswahl	49
6	Endauswahl	53
6.1	Klimasensitivität in den Modellen	53
6.1.1	PrognAus	53
6.1.2	SILVA	55
6.1.3	MOTTI	59
6.1.4	FVS	63
6.1.5	Fazit	70
6.2	AHP-Analyse	71
6.2.1	Nutzenkriterien und Entscheidungshierarchie	72
6.2.2	Nutzenprioritäten mittels paarweiser Vergleiche	84
6.2.3	Konsistenz und Sensitivität	87
6.2.4	Bewertung der AHP-Analyse	91
6.2.5	Fazit	93
7	Nächste Schritte	94
8	Literatur	96
	Anhang	106
	A1 Paarweiser Vergleich der Kriterien	107
	A2 Paarweiser Vergleich der Modelle	111

Zusammenfassung

Mit dem stetigen Anstieg der Nachfrage nach Holz sowie nach ökologischen und sozialen Leistungen des Waldes und dem Engagement für das Konzept der Nachhaltigkeit, steigt auch die Notwendigkeit nach glaubwürdigen Prognose der wahrscheinlichen Folgen alternativer waldbaulicher Behandlungsstrategien auf das Waldwachstum.

Ein nachhaltiges Ökosystemmanagement bedingt jedoch eine strategische forstliche Planung, welche ihrerseits verlangt, Waldstrukturen und -entwicklungen über den operativen Planungshorizont hinaus zu prognostizieren und zu beurteilen.

Um solche langfristigen Prognosen zu erstellen, ist ein Computersimulationsmodell unerlässlich, das die relevanten biologischen Wachstumsprozesse, die Bewirtschaftungsstrategien und Störungen sowie deren mengenmässige und monetäre Auswirkungen für die wichtigsten Baumarten und Bestandesformen auf unterschiedlichen Standorten abbildet. Zukünftig rücken zunehmend auch Fragen bzgl. der Auswirkungen des Klimawandels immer stärker in den Mittelpunkt der Waldbewirtschaftung. Ein solch „umfassendes“ Simulationsmodell, ist für die Schweiz bislang nicht vorhanden. Weltweit sind jedoch schon diverse Ansätze und Methoden bekannt.

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, ein geeignetes klimasensitives Wachstums- und Behandlungsmodell zu evaluieren, das zur Unterstützung der Entscheidungsprozesse eines Forstbetriebes auf Bestandesebene, wie auch in der Wissenschaft eingesetzt werden kann. Anhand vorhandener Daten aus langfristigen Versuchsflächen sowie Daten des Landesfortinventars (LFI) soll dieses zudem für die Schweiz parametrisiert werden können. Zur Erreichung dieses Ziels wurde ein Evaluationsprozess gestaltet, anhand dessen vorhandene Modellösungen aus dem In- und Ausland einheitlich erfasst, miteinander verglichen und bewertet werden können. Der Prozess unterteilt sich in drei Stufen: in die Sichtung von Modellen, in eine Vorauswahl und eine Endauswahl. Anhand dieser drei Stufen hinweg, wurde der Kreis der potentiell geeigneten Modelle schrittweise eingeschränkt und ein geeignetes Waldwachstumsmodell für die Schweiz ermittelt.

Sichtung: Im ersten Schritt wurde ein Überblick über die Systematik und den Nutzen von Waldwachstumsmodellen sowie über die verschiedenen Modellansätze erarbeitet. Diese Hintergrundinformationen tragen wesentlich zum Verständnis des Sinn und Zwecks von Modellen bei und sind für alle weiteren Schritte des Evaluationsprozesses von Bedeutung. Darauf aufbauend wurden Schlüsselanforderungen definiert, anhand derer eine erste Auswahl von 14 potenziell geeigneten Modellen stattgefunden hat.

Vorauswahl: Für eine Beurteilung und Vergleichbarkeit der 14 verschiedenen Modelle wurden im nächsten Schritt deren Eigenschaften erfasst. Hierzu fand eine Definition von Grobanforderungen statt, anhand derer die Modelle untersucht wurden – z.B. sind die wesentlichen Wachstumsprozesse sowie die in der Praxis gängigen Durchforstungs- und Behandlungsarten berücksichtigt und lassen sich mit dem Modell ungleichaltrige Mischbestände abbilden. Durch die Betrachtung der Modelle anhand der Grobanforderungen ergibt sich ein Einblick in die jeweilige Struktur und die Grundannahmen, die den verschiedenen Modellansätzen zugrunde liegen. Ausgehend von den erhobenen Modelleigenschaften wurden die Modelle bewertet und auf vier Modelle eingeschränkt. Diese gehen in die Endauswahl über. Bei den in der Endauswahl betrachteten Modellen handelt es sich um BWIN-Pro, MOSES, SILVA und PrognAus.

Endauswahl: Mit Hilfe einer AHP-Analyse (Analytical Hierarchy Process) wurden die verbleibenden vier Modelle systematisch bewertet. Das Ziel war die Ermittlung des am besten geeigneten Modells. Die AHP-Analyse ist der zentrale Teil der Endauswahl und wurde mit der Software CelsiEval durchgeführt.

Im ersten Schritt wurden hierzu die verbleibenden Modelle vertiefend analysiert. Dazu wurde ein detaillierter Anforderungskatalog definiert, anhand dessen die Modelle untersucht und ihr Leistungsspektrum ermittelt werden kann. Ein besonderes Augenmerk galt dabei auch den Ansätzen zur Abbildung der Klimasensitivität im jeweiligen Modell. Von den vier in die Endauswahl übernommenen Modellen sind PrognAus und SILVA klimasensitiv. Die Modelle MOSES und BWINPro sind in der aktuellen Version nicht klimasensitiv. Daher wurden zusätzlich die Ansätze aus den Managementmodellen MOTTI und FVS untersucht, welche in der Vorauswahl ausgeschieden sind. Daraus lassen sich wichtige Erkenntnisse über Ansätze und Methoden gewinnen, wie der Einfluss des Klimas in Modellen berücksichtigt werden kann. Dieses Wissen kann eventuell dazu verwendet werden, die beiden Modelle BWINPro und MOSES nachträglich zu einer klimasensitiven Variante weiterzuentwickeln.

In einem weiteren Schritt erfolgte die Definition der für die AHP-Analyse notwendigen Kriterien- und der Entscheidungshierarchie. Dies bildet die Grundlage für den paarweisen Vergleich, anhand dessen die vier verbleibenden Modelle betrachtet wurden und mittels dessen der Nutzenwert für die Modelle berechnet wird. Das Modell mit dem höchsten Nutzenwert gilt als das am besten geeignete Modell.

Im Rahmen der hier durchgeführten AHP-Analyse erhält das Modell BWINPro den höchsten Nutzenwert. Es ist dementsprechend das Modell, welches für die festgesetzten Zielvorgaben die beste Eignung verspricht. Dieses Ergebnis wird zusätzlich mittels einer Konsistenz- und Sensitivitätsanalyse überprüft. Das distanzabhängige Einzelbaummodell deckt eine ganze Reihe von in der Praxis gängigen Behandlungsvarianten und ein Grossteil der in der Schweiz vorkommenden Baumarten ab, wodurch es sehr gut für waldbauliche Variantenstudien geeignet ist. Zudem bietet es gegenüber den anderen Modellen den entscheidenden Vorteil, dass es frei zugänglich und kostenlos über das Internet zur Verfügung gestellt wird. Der Sourcecode ist für alle einsehbar, wodurch das Modell relativ leicht an eigene Bedürfnisse angepasst werden kann. Dies ist aus wissenschaftlicher Sicht von grosser Bedeutung.

Im Rahmen dieses Projektes hat sich gezeigt, dass der hier durchgeführte Evaluationsprozess, einschliesslich der in der Endauswahl angewandten AHP-Analyse gut für die Auswahl eines klimasensitiven Waldwachstum- und Behandlungsmodells geeignet ist. Es gilt jedoch festzuhalten, dass der Evaluationsprozess auf subjektiven Entscheidungen der Entscheidungsträger dieses Projektes basiert und dass bei abweichenden Entscheidungsträgern andere Resultate zu erwarten sind.

Die Ergebnisse und das gewonnene Wissen aus dem Evaluationsprojekt bilden den Ausgangspunkt für eine Reihe weiterer Projekte. So dient die Vorauswahl u.a. als Basis für das Projekt „Parametrisierung eines klimasensitiven Waldmanagementmodells für die Schweiz“, welches durch das Programm „Wald und Klima“ gefördert wird. Ziel dieses Projektes ist es, BWINPro für das forstliche Management in der Schweiz zu parametrisieren, sodass es für Prognoserechnungen (Volumen, erntekostenfreie Erlöse, Struktur) auf Bestandesebene verwendet werden kann.

Darauf aufbauend soll in einem weiteren Projekt ein multikriterielles Decision Support System (DSS) entwickelt werden. Ein solches System ermöglicht es einem Forstbetrieb auf der Ebene des Bestandes, die optimale waldbauliche Behandlungsstrategie zu ermitteln, um die Zielvorgaben einer nach-

haltigen Waldbewirtschaftung bestmöglich zu berücksichtigen und die ökonomischen Auswirkungen auf den Betrieb abzuschätzen.

Weiterhin bildet das Modell BWINPro den zentralen Kern des geplanten Rahmenprojektes zum Thema „Mit internetbasierten, IT-gestützten Entscheidungsgrundlagen die Planung und Steuerung des Forstbetriebes verbessern“. Ziel dieses Rahmenprojektes ist die Entwicklung einer Sammlung von internetbasierten und softwaregestützten Entscheidungsgrundlagen für eine adaptive bestandesbezogene Planung und Steuerung des Forstbetriebes. Dabei sollen alle wesentlichen forstlichen Prozesse abgebildet werden, angefangen von der Inventur, über die Waldbewirtschaftung bis hin zur Holzernte und den Transport des Holzes sowie einer Bewertung der vorhandenen Waldstrukturen.

1 Einleitung

Mit dem stetigen Anstieg der Nachfrage nach Holz sowie nach ökologischen und sozialen Leistungen des Waldes und dem Engagement für das Konzept der Nachhaltigkeit, steigt auch die Notwendigkeit nach glaubwürdigen Prognose der wahrscheinlichen Folgen alternativer waldbaulicher Behandlungsstrategien auf das Waldwachstum. Für fast zwei Jahrhunderte waren die Ertragstafeln die Grundlage, anhand derer Förster die zukünftige Wertentwicklung ihrer Bestände vorausgesagt haben (Kimmins et al. 1999).

Das „aktuelle“ Ertragstafelwerk der Schweiz gilt für die vier Baumarten Fichte, Buche, Tanne und Lärche (EAFV 1966-). Es entstand Ende der sechziger Jahre und wurde als Ersatz für die Ertragstafeln von Flury (1907) auf Basis der langfristigen Versuchsflächen der WSL erarbeitet. Dies war begründet, da die schweizerische Forstwirtschaft seit Ende der 40er Jahre von der schwachen Niederdurchforstung zur Hoch- bzw. Auslesedurchforstung nach der Vorstellung der Waldbaulehre von Schädelin (1934) übergegangen war (Schütz J.P. et al. 2008).

Ertragstafeln gelten jedoch nur für die in den zugrundeliegenden Datensätzen enthaltenen Baumarten und bilden lediglich die biotischen und abiotischen Verhältnisse sowie Behandlungsstrategien ab, welche diese während ihres Wachstums erfahren haben. Bei Änderungen in der Bewirtschaftungsstrategie oder durch den menschlichen Einfluss auf die Umwelt (z. B. Klimawandel) oder bei Änderungen in der Bodenfruchtbarkeit treten jedoch Veränderungen in den zukünftigen Wachstumsbedingungen der Waldbestände auf. In diesem Fall sind die Vorhersagen der Ertragstafeln nicht mehr ausreichend genau und flexibel (Kimmins et al. 1999).

Daneben kommt erschwerend hinzu, dass Waldentwicklungen sehr langsam ablaufende Prozesse sind. Viele Entscheidungen bei der Waldbewirtschaftung müssen über Prozesse oder Abläufe gefällt werden, die erst in ferner Zukunft realisiert werden. Das erfolgreiche Einführen eines nachhaltigen Ökosystemmanagements bedingt jedoch eine strategische forstliche Planung, welche ihrerseits verlangt, Waldstrukturen und -entwicklungen über den operativen Planungshorizont hinaus zu prognostizieren und zu beurteilen (Davis et al. 2001). Es sind daher Methoden und Instrumente notwendig, welche helfen, diese Zeiträume zu verkürzen. Dabei sind der Einsatz von Computersimulation und Optimierung naheliegende Methoden.

Hierzu fehlen in der Schweiz bislang „geeignete“ Simulationsmodelle, die es ermöglichen, Auswirkungen von natürlichen und anthropogenen Einflüssen auf die Waldentwicklung ökologisch und ökonomisch zu verfolgen. Man will zum Beispiel wissen, wie viele Bäume es in einem Entwicklungsstadium minimal braucht, um einen qualitativ gesicherten Endbestand zu garantieren oder wie die Struktur aussehen soll, damit der Bestand auch in Zukunft seine Funktionen (Schutz, Wohlfahrt, Nutzen) erfüllen kann. Wie stark darf der Vorrat gesenkt werden, um keine Zuwachsverluste zu erleiden? Wann ist der optimale Verjüngungszeitpunkt? Wie reagieren Bäume oder ganze Bestände langfristig auf die Durchforstungseingriffe?

Während zurzeit die Art und Weise der Bewirtschaftung den größten Einfluss auf den Wald hat, ist zu erwarten, dass in Zukunft auch Faktoren wie Sturmereignisse und Klimaveränderungen zunehmend an Bedeutung gewinnen werden. Hierzu müssen idealerweise schon heute Strategien entwickelt werden, um auf solche in der Zukunft liegenden Ereignisse reagieren zu können (Seidl et al. 2011). Speziell im Kontext des Klimawandels spielen forstliche Aktivitäten wiederum selbst eine wichtige Rolle. Denn eine nachhaltige Waldbewirtschaftung kann wesentlich zum Klimaschutz beitragen. Es ist allgemein anerkannt, dass der Kohlenstoffvorrat in Waldökosystemen durch Aktivitäten der Wald-

bewirtschaftung massgeblich beeinflusst werden kann und durch die stoffliche und energetische Verwendung von Holz, Kohlenstoff langfristig gespeichert und fossiler Brennstoff substituiert werden kann (Gower 2003, Canadell and Raupach 2008, Köhl et al. 2010).

Um solche langfristigen Prognosen zu erstellen, ist ein Computersimulationsmodell unerlässlich, das die relevanten biologischen Wachstumsprozesse, die Bewirtschaftungsstrategien und Störungen sowie deren mengenmässigen und monetären Auswirkungen für die wichtigsten Baumarten und Bestandesformen auf unterschiedlichen Standorten abbildet. Ein solches „umfassendes“ Simulationsmodell ist für die Schweiz jedoch bislang nicht vorhanden.

Die in der Schweiz vorhandenen Managementmodelle FBSM (Lemm 1991, Erni and Lemm 1995), MASSIMO (Kaufmann 2001b, a, Kaufmann 2011) und SiWaWa (Schütz J.P. and Zingg A. 2007) unterstützen entweder jeweils nur Teilaspekte der an das Management eines Forstbetriebes gestellten Anforderungen (bestimmte Waldtypen, Baumarten, Prozesse, Regionen) oder erfordern zu aufwendige Eingangsdaten. Gleichzeitig sind die Modelle in ihrer aktuellen Version nicht in der Lage, klimatische Einflüsse abzubilden.

Daneben gibt es in der Schweiz eine Reihe von klimasensitiven Waldwachstumsmodellen, wie z.B. ForClim (Bugmann 1996), LandClim (Schumacher et al. 2004, Schumacher and Bugmann 2006), TreeMig (Lischke et al. 2006) oder WoodPaM (Gillet 2008). Dabei handelt es sich jedoch in erster Linie um Modelle zur Beschreibung der langfristigen Sukzessionsdynamik von naturnahen Waldbeständen in Abhängigkeit von grossräumigen Störungen, verschiedenen Nutzungsformen, Bodeneigenschaften und der Topografie. Als Ausgabewerte liefern die Modelle vor allem ökologisch relevante Zielgrößen, die für das forstliche Management von Beständen unzureichend sind. Sie werden daher vor allem zur Simulation der Auswirkungen langfristiger Klimaveränderungen auf die Waldentwicklung verwendet. Eine Ausnahme bildet das Modell ForClim, es enthält zudem ein Teilmodul zur Simulation der gängigen waldbaulichen Behandlungsmethoden in der Schweiz, wie Durchforstung, Kahlschlag, Saumschlag, Zielstärkennutzung, Femelschlag, Schirmschlag, Plenterung und Pflanzung (Rasche et al. 2012).

Daneben existieren in Europa wie auch im nordamerikanischen Raum eine Vielzahl weitere Waldwachstumsmodelle. Allgemeine Literaturübersichten, bei denen die verschiedenen Modelltypen behandelt werden, findet man bei Porté A. and Bartelink H.H. (2002), Monserud (2003), Pretzsch et al. (2008), Larocque (2009) und Fontes et al. (2010). Daneben gibt es auch verschiedene Literaturübersichten zu bestimmten Modelltypen, z.B. für Gap Modelle (Bugmann 2001), für Prozessmodelle (Mäkelä et al. 2000) oder Modelle, die speziell zur Entscheidungsunterstützung in einer sich verändernden Umwelt geeignet sind (Fontes et al. 2010).

Weiterhin beschreibt Hasenauer (2006b) in seinem Buch „Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe“ sechs bestehende europäische Einzelbaumwachstumsmodelle, die im Rahmen eines mit EU-Mitteln geförderten Projektes zusammengetragen wurden. Bei den Modellen handelt es sich um MOSES, PROGNAUS, SILVA, BWINPro, CORKFITS und STAND. Das EU-Projekt hatte zum Ziel, Forschungslücken in der Theorie der Waldwachstumsmodellierung aufzuzeigen, die Modellierungstheorie weiter zu verbessern und Problemlösungen für die waldbauliche Entscheidungsunterstützung zu erschließen.

Es existieren also eine ganze Reihe von Modellen mit unterschiedlichen Funktionen, räumlichen Auflösungen und regionalen Gültigkeitsbereichen. Die Evaluation eines geeigneten Modells für die Schweiz, das zur Unterstützung der Entscheidungsprozesse eines Forstbetriebes auf Bestandesebene

wie auch in der Wissenschaft eingesetzt werden kann und zudem klimasensitiv ist, stellt dementsprechend eine zentrale Aufgabe dar. Diese soll im Rahmen dieses Projektes bearbeitet werden.

2 Ziel des Projektes

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, ein geeignetes klimasensitives Waldwachstums- und Behandlungsmodell zu evaluieren, das anhand vorhandener Daten aus langfristigen Versuchsflächen sowie Daten des Landesfortinventars (LFI) für die Schweiz parametrisiert werden kann und folgende Grobanforderungen, die noch im Detail zu spezifizieren sind, erfüllt:

Inhaltliche Aspekte

- Abbildung der Standorte und der Waldtypen in der Schweiz
- Berücksichtigung von klimatischen Einflüssen
- Abbildung relevanter Prozesse wie Waldwachstum, Mortalität, Waldbehandlungsstrategien

Eignung, um mit vorhandenen Schweizer Daten parametrisiert werden zu können

Technische Aspekte

- Moderne IT-Architektur, Web-Services, Komponenten-basiert
- Kombinierbarkeit mit andern Modellbausteinen der Waldbewirtschaftung
- Einfach zu verändern und mit anderen Modellbausteinen zu erweitern
- Benutzerfreundlichkeit

3 Methoden

Zur Erreichung des genannten Zieles werden vorhandene Wachstums- und Behandlungsmodelle im In- und Ausland evaluiert. Der Begriff der Evaluation bezeichnet in diesem Fall die Überprüfung der Eignung eines gewählten Modellansatzes und der Eignung der Software, in welcher das biometrische Modell für die speziell vorgegebenen Ziele und Zwecke umgesetzt ist. Ein weiterer Aspekt der Evaluation ist die Überprüfung der Gültigkeit eines biometrischen Modells, auch als Validierung bezeichnet. Die Validierung gibt den Grad der Genauigkeit an, mit dem ein Modell die Realität wiedergibt (Pretzsch and Ďurský 2001). Die Validierung der untersuchten Wachstums- und Behandlungsmodelle ist nicht Teil dieses Projektes. Im Rahmen dieser Untersuchung beschränkt sich die Evaluation auf den Modellansatz und die Software. Dabei unterteilt sich der Prozess der Evaluation in drei Stufen; in die Sichtung von Modellen, in eine Vorauswahl und eine Endauswahl. Über diese drei Stufen hinweg wird der Kreis der potentiell geeigneten Modelle schrittweise eingeschränkt (Abbildung 1).

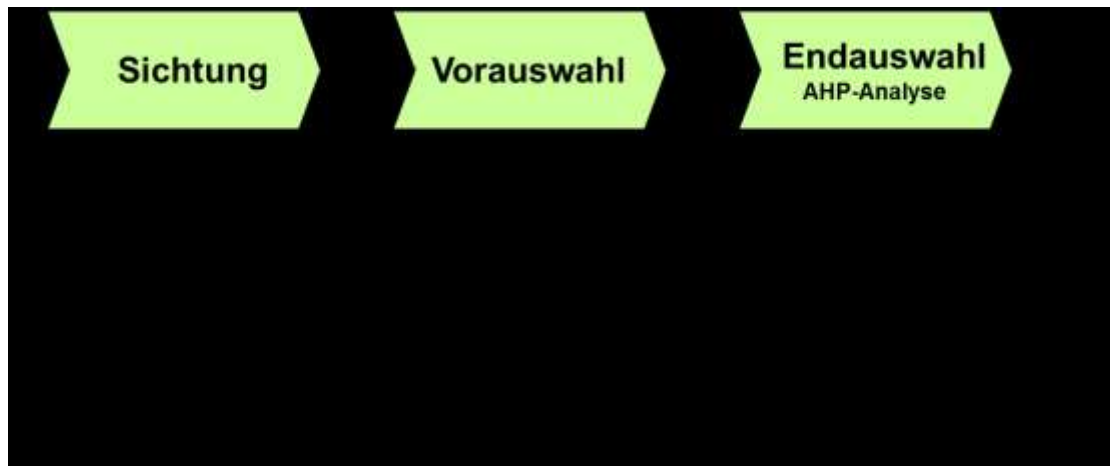


Abbildung 1: Darstellung des Projektablaufs.

3.1 Sichtung

Erlangung einer Übersicht über die verschiedenen Modellansätze zur Abbildung von Waldökosystemen:

Im ersten Schritt wird ein Überblick über die Systematik und den Nutzen von Waldwachstumsmodellen erarbeitet. Diese Hintergrundinformationen tragen wesentlich zum Verständnis des Sinn und Zwecks von Modellen bei. Im Anschluss werden die verschiedenen Modellansätze zur Abbildung von Waldökosystemen beschrieben. Es gibt eine ganze Reihe von verschiedenen Ansätzen zur Simulation des Waldwachstums. Davon eignet sich jedoch nur ein Teil für den Einsatz im forstlichen Management.

Definition von Schlüsselanforderungen und erste Auswahl von potenziell geeigneten Modellen

Anhand von Recherchen im Internet und der Literatur (Modell-Reviews, wissenschaftliche Publikationen) werden Modelle gesucht, die den Zielvorstellungen entsprechen. Bei der Auswahl der Modelle wird im ersten Schritt insbesondere auf die Erfüllung folgender Schlüsselanforderungen geachtet:

- Management Modell: Lassen sich wesentliche Behandlungsstrategien abbilden?
- Anwendungsgebiet / Bekanntheitsgrad: Wo wird das Modell eingesetzt und wird es in der Literatur/Internet behandelt?
- Verfügbarkeit und Qualität der schriftl. Dokumentation: Gibt es schriftliche Dokumentationen zu dem Modell und ist darin der Modellaufbau beschrieben?

In Anbetracht der Fülle an Modellen die weltweit vorhanden sind, erfolgt die Auswahl nach einem „geografischen Filter“. Dabei wird zwischen Modellen aus der Schweiz, den angrenzenden Ländern (Deutschland, Österreich und Frankreich) sowie dem skandinavischen und angelsächsischen Raum unterschieden. Aus der Schweiz werden alle wesentlichen Modelle berücksichtigt, insofern die oben genannten Schlüsselanforderungen erfüllt werden. Aus den angrenzenden Ländern werden hingegen nur die bekanntesten Modelle in den Evaluationsprozess aufgenommen. Aus dem skandinavischen und angelsächsischen Raum werden wiederum nur die bekanntesten und gut dokumentierten Modelle berücksichtigt.

3.2 Vorauswahl

Erfassung der jeweiligen Modelleigenschaften

Für eine Beurteilung und Vergleichbarkeit der verschiedenen Modellansätze werden im nächsten Schritt die Eigenschaften der Modelle erfasst. Hierzu werden verschiedene Punkte definiert. Anhand der Modelldokumentationen wird untersucht, inwiefern die einzelnen Modelle diese erfüllen. Die Ergebnisse werden tabellarisch festgehalten. Dadurch ergibt sich ein Einblick in die jeweilige Struktur und die Ansätze, die den verschiedenen Modellen zugrundeliegen. Folgende Punkte zur Erfassung der Modelleigenschaften werden berücksichtigt:

- Wachstumsprozesse (v.a. Dicken- und Höhenwachstum der Bäume, Konkurrenz zwischen den Individuen, Mortalität und Verjüngung/Einwuchs)
- Berücksichtigung von Standortseigenschaften
- Altersabhängigkeit (z.B. Oberhöhenbonität im Alter 100)
- Behandlungs-/Durchforstungsarten
- Abbildung von Störungen (z.B. Sturmereignisse, Käferkalamitäten, Trockenstress)
- Abbildung von Wirkungen und Leistungen (z.B. ökonomische Bewertungen wie Berechnung der Holzerntekosten und Sortimentierung sowie ökologische Bewertungen wie Biodiversitätsindex und Kohlenstoffhaushalt)
- Berücksichtigte Baumarten (v.a. wesentliche Hauptbaumarten der Schweiz)
- Abgebildete Waldtypen (Rein- / Mischbestände, gleichaltrige / ungleichaltrige Bestände)
- räumliche Auflösung (Einzelbaum, Bestand)
- Berücksichtigung von Klimaeinflüssen
- Zugrundeliegende Datenbasis für Parametrisierung

Grobbewertung der Modelle und Auswahl von ca. 4-5 Modellen für eine detaillierte Betrachtung

Ausgehend von den erhobenen Modelleigenschaften werden die Modelle bewertet und auf ca. 4-5 Modelle eingeschränkt. Für die Auswahl werden die Modelle anhand der Modelleigenschaften überprüft und bewertet. Hierzu werden aufbauend auf den oben genannten Betrachtungspunkten Anforderungen formuliert. Die Modelle, welche nach Einschätzung der Projektverantwortlichen die Anforderungen am besten erfüllen, kommen in die engere Wahl.

3.3 Endauswahl

Mit Hilfe einer AHP-Analyse (Analytical Hierarchy Process) werden die verbleibenden 4-5 Modelle systematisch bewertet. Das Ziel ist die Ermittlung des am besten geeigneten Modells. AHP ist eine multikriterielle Entscheidungsmethode und wurde ursprünglich in den 70er Jahren von Saaty (1995, 2005) eingeführt. Sie dient vor allem zur Lösung komplexer Entscheidungen, an denen mehrere Parteien beteiligt sind oder, wie in diesem Fall, mehrere Modelle zur Auswahl stehen. Die Methode ist „analytisch“, weil sie eine Problemkonstellation (Welches ist das ideale Modell?) in all ihren Abhängigkeiten umfassend zu analysieren vermag. Gleichzeitig wird sie „Prozess“ genannt, weil sie einen Ablauf vorgibt, wie Entscheidungen strukturiert und analysiert werden (Lemm and Thees 2009).

Die Methode basiert auf den drei Prinzipien der (i) Dekomposition, der (ii) vergleichenden Bewertung und der (iii) Synthese von Prioritäten (Okudan 2006). Das Dekompositionsprinzip erfordert, dass das Entscheidungsproblem zerlegt wird und die Kriterien zu dessen Lösung in eine hierarchische Struktur gebracht werden. Das Prinzip von Vergleich und Bewertung fordert den paarweisen Vergleich der Kriterien auf jeder Hierarchiestufe. Dabei wird jedes Kriterium jedem anderen gegenübergestellt und seine relative Wichtigkeit ermittelt. Das Prinzip der Synthese der Prioritäten führt zu einer Rangfolge der Kriterien nach ihrer Wichtigkeit. Die Methode bietet dabei den Vorteil, dass quantitative Kriterien mit qualitativen Kriterien in einer einheitlichen Bewertungstechnik zusammengefasst und einem transparenten, mathematischen Gesamtergebnis dargestellt werden können.

Aufgrund seiner Flexibilität und Anwendungsfreundlichkeit hat die AHP-Analyse mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden. Die Methode wurde bereits in zahlreichen Gebieten, Disziplinen und Ländern erfolgreich eingesetzt. Zur Evaluation eines forstlichen E-Business-Systems wurde es unter anderem von Lemm and Thees (2009) verwendet. Zur Unterstützung der AHP-Analyse gibt es eine ganze Reihe von Softwareangeboten. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Software CelsiEval der Firma CELSI AG¹ aus Winterthur verwendet.

Der Ablauf der AHP-Analyse, so wie sie auch im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wird, lässt sich grob in vier Stufen unterteilen:

1. Definition eines Anforderungskataloges und vertiefende Analyse der Modelle

Im ersten Schritt werden die verbleibenden Modelle vertiefend analysiert. Hierzu wird ein Anforderungskatalog definiert, anhand dessen die Modelle untersucht und ihr Leistungsspektrum ermittelt werden kann. Der Anforderungskatalog orientiert sich dabei massgeblich an den Empfehlungen von Pretzsch et al. (2002b) zur standardisierten Beschreibung von Waldwachstumssimulatoren und umfasst acht Rubriken: Modellansatz, Anwendungsbereich, Gültigkeitsbereich, Eingabemöglichkeit, Wachstum, Ausgabe, Umwelteinflüsse und Software. Diese Rubriken unterteilen sich wiederum in eine Reihe von Unterkriterien. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei dem Ansatz zur Abbildung der Klimasensitivität im jeweiligen Modell.

Die gewonnenen Informationen zum Anforderungskatalog ergänzen die bereits vorhandene Informationslage aus der „Vorauswahl“ und bieten einen detaillierteren Einblick in die Modellfunktionalitäten.

2. Nutzenkriterien und Entscheidungshierarchie festlegen

Im zweiten Schritt erfolgt die Definition der Kriterien- und der Entscheidungshierarchie, anhand derer die Modelle miteinander verglichen werden. Es werden alle Kriterien, die zur Lösung der Fragestellung als wichtig erscheinen, benannt und die Entscheidungshierarchie wird festgelegt. Sie besteht aus einem Entscheidungsbaum von mehreren Ebenen: dem Evaluationszweck, den Kriterien und den zugehörigen Unterkriterien sowie den Lösungsalternativen (zur Auswahl stehende Modelle). Dieser Festlegungsprozess kann einzeln oder im Team jeweils in einem oder mehreren Durchgängen erfolgen. Diese Entscheidungshierarchie bildet im Anschluss die Grundlage für den paarweisen Vergleich (Lemm and Thees 2009).

¹ <http://www.celsi.ch/index.php>

3. Berechnung der Nutzenprioritäten mittels paarweiser Vergleiche

Die Berechnung der Nutzenprioritäten stellt den nächsten Schritt in der AHP-Methode dar. Dies erfolgt in drei Stufen. In der ersten Stufe wird jedes Kriterium jedem anderen Kriterium gegenübergestellt und verglichen. Dabei notiert der Entscheider, welches der Kriterien für ihn jeweils wichtiger erscheint (relative Wichtigkeit). In einer zweiten Stufe legt der Entscheider für jedes Nutzenkriterium fest, welches der Modellalternativen das jeweilige Kriterium besser erfüllt. Anschliessend wird in der dritten Stufe der Nutzenwert der Alternativen berechnet, indem die relativen Prioritäten der Alternativen mit den relativen Wichtigkeiten der Nutzenkriterien multipliziert und über alle Nutzenkriterien summiert werden. Über die daraus errechneten Nutzenwerte ergibt sich die Rangfolge der Modellalternativen.

4. Ermittlung der Konsistenz und der Sensitivitäten der paarweisen Vergleiche

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann zusätzlich eruiert werden, wie stabil die errechneten Nutzenwerte bleiben, wenn die Prozentwerte der Kriterien, die durch paarweise Vergleiche ermittelt wurden, sich nachträglich verändern würden. Diese Sensitivitätsanalyse wird von der AHP-Software CellEval unterstützt. Ebenso besitzt die Software die Möglichkeit, den sogenannten Inkonsistenzfaktor festzustellen. Dieser ermittelt einen Wert, der als Mass für die Logik der Bewertungen zueinander gilt. Je niedriger der Inkonsistenzfaktor ist, desto bestimmter sind die Bewertungen und desto weniger Widersprüche tragen sie in sich. Er liefert somit einen Hinweis auf die Qualität der ermittelten Entscheidungen (Lemm and Thees 2009).

4 Modellsichtung

In den nachfolgenden Kapiteln 4.1 bis 4.4 wird ein kurzer Einblick in den Themenbereich der Waldwachstumsmodellierung gegeben. Die Kenntnis und das Verständnis über den notwendigen Abstraktionsprozess zur Abbildung der komplexen Realität in einem vereinfachten Modell (Kapitel 4.1), über die unterschiedlichen Modelltypen (Kapitel 4.2), die wesentlichen Bestandteile eines Modells (Kapitel 4.3) sowie über den Nutzen (Kapitel 4.4) von Waldwachstumsmodellen sind als Hintergrundwissen für die erste Modellsichtung (Kapitel 4.5) sowie für alle weiteren Schritte des Evaluationsprozesses von Bedeutung.

4.1 Vom System zum Modell

Die Konstruktion von Waldwachstumsmodellen bedeutet in der Regel die Organisation waldwachstumskundlichen Wissens und Synthese des Kenntnisstandes über Einzelaspekte des Waldwachstums zu einer Vorstellung vom Gesamtsystem. Das System ist dabei definiert durch seine Systemelemente, deren Beziehung untereinander sowie durch seine Systemgesetzmässigkeiten. Die Gesetzmässigkeiten werden jedoch erst im Gesamtsystem wirksam und entstehen durch die Beziehungen der einzelnen Systemelemente zueinander. In einem Waldökosystem können z.B. die Elemente Boden, Bodenvegetation und Bäume mit Wurzeln, Stämmen, Ästen, Nadeln und Laub betrachtet werden. Durch die Beziehungen zwischen den Systemelementen entsteht eine charakteristische Systemstruktur; so beeinflusst beispielsweise der Altbestand die Bodenvegetation durch seine Beschattung, oder die Blattfläche des Baumes beeinflusst die Versorgung des Baumes mit Bau- und Betriebsstoffen über die assimilierte Biomasse (Pretzsch 2001). Diese strukturellen Eigenschaften folgen dabei festen Gesetzmässigkeiten.

Waldökosysteme weisen jedoch zusätzlich eine Reihe von Besonderheiten auf, die sie u.a. gegenüber technischen Systemen abgrenzen. Diese Besonderheiten müssen bei der Konstruktion von Waldwachstumsmodellen berücksichtigt werden. Waldökosysteme sind (Pretzsch 2001):

- **langlebige Systeme:** Bäume und Waldbestände haben eine Lebenserwartung, die im Vergleich zu den meisten tierischen und pflanzlichen Organismen wie auch im Vergleich zum Menschen, sehr viel höher ist. Diese Langlebigkeit erfordert Lösungsansätze, die sich von Organismen mit kürzerer Lebenserwartung unterscheiden.
- **offene Systeme:** Waldökosystemen sind abhängig von der Umwelt. So beeinflussen z.B. Strahlung, Temperatur, Nährstoffe, Wasserversorgung, CO₂-Konzentration und Störgrößen das Wachstum der Bäume. Die Reaktionen auf diese Umwelteinflüsse reichen von Wachstumsverbesserungen bis zu Zuwachsverlusten und tiefgreifenden Destabilisierungen.
- **strukturdeterminierte Systeme:** Wälder können durch ihre Bestandesstruktur wesentliche Faktoren des Wachstums wie z.B. Licht, Temperatur, Niederschlag selbst beeinflussen. Die Baum- und Bestandesstrukturen von Waldökosystemen üben daher einen grossen Einfluss auf alle innerhalb eines Bestandes ablaufenden Prozesse aus.
- **geschichtlich geprägte Systeme:** Die an Bäumen, Waldbeständen und Waldökosystemen beobachteten Prozesse und Strukturen werden nicht allein von den aktuell auf sie einwirkenden Faktoren (u.a. Standortsfaktoren, abiotische und biotische Stressoren), sondern auch durch ihre Vorgeschichte bestimmt.
- **kybernetische Systeme:** Kybernetische Systeme streben einen Gleichgewichtszustand an. Die Fähigkeit zur Selbstorganisation und Stabilität wird vor allem durch das Funktionsprinzip der Rückkopplung erreicht. Dies gibt Waldbeständen die Fähigkeit zur Selbstorganisation, was gerade für offene und von vielfältigen Störungen betroffene Systeme relevant ist. Denn Rückkopplungsprozesse stabilisieren Waldbestände gegenüber Störungseinflüssen wie z.B. Durchforstung, Grundwasserabsenkung, saure Deposition oder Stickstoffeintrag.
- **hierarchisch organisierte Systeme:** Strukturen und Prozesse in Waldökosystemen können auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen untersucht werden. Die verschiedenen Prozessskalen können dabei mikroskalig sein, wie beispielsweise biochemische Reaktionen in Zellen und in Bodenkompartmenten, oder aber in grossen Zeit- und Raumskalen ablaufen, wie Sukzession und Evolution. Dabei beeinflussen Prozesse einer unteren Ebene (z.B. Assimilation, Allokation) die Strukturen der darüber liegenden Ebenen, wie beispielsweise der Verzweigung, des Belaubungszustandes oder des Zuwachses. Umgekehrt geben die Strukturen höherer Ebenen die Rahmenbedingungen für die ablaufenden Prozesse der untergeordneten Ebenen vor.
- **Systeme mit multikriteriellen Ausgabegrößen:** Die Veränderung der Nutzungsinteressen an Waldökosystemen führen zu einer Erweiterung des Informationsbedarfs forstwirtschaftlicher und umweltpolitischer Entscheidungsträger. Neben Baum- und Bestandesattributen wie Massenleistung, Sortenleistung und Wertleistung rücken zunehmend ökologische und sozioökonomische Leistungen in den Vordergrund.

Bei der Beschreibung von Waldökosystemen können nicht alle Systemelemente, Beziehungen, Gesetzmässigkeiten oder Besonderheiten berücksichtigt werden. Um den Blick für die eigentlich interessierenden Funktionen nicht zu verstellen, ist es sinnvoll, sich auf das Wesentliche zu beschränken.

Jeder Versuch das Waldökosystem zu beschreiben, führt dementsprechend zu einem Modell. Unter einem Modell wird eine vereinfachte Darstellung des Systems verstanden, die dessen Verständnis und Erforschung erleichtern soll. Modelle sind gewissermaßen Stellvertreter der Wirklichkeit. Für das reale Waldökosystem wird durch Abstraktion ein vereinfachtes, quantitatives Modell entwickelt. Dabei bestimmen das Ziel und der Zweck des Modells sowie der Kenntnisstand den notwendigen bzw. möglichen Komplexitätsgrad des Modellansatzes. Die Modellierung des Waldwachstums kann dabei mit unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfolgen. Je nach Zweck des Modells kann eine Zeitskala von Sekunden bis Jahrtausenden und eine Raumskala von Zell- / Mineraloberflächen bis zu Vegetationszonen gewählt werden. Welche Funktionen in dem System besonders in den Vordergrund gerückt wird, hängt im Wesentlichen vom Betrachter und Nutzer des Systems ab (Pretzsch 2001).

Diese Tatsache führt auch dazu, dass es kein einzelnes „Super-Modell“, sondern eine Reihe von unterschiedlichen Modelltypen gibt. Obwohl sich jedes Waldwachstumsmodell mit der Entwicklung des Waldökosystems beschäftigt, gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Modelltypen. Diese Unterschiede sind abhängig vom regionalen Anwendungsgebiet, der Verfügbarkeit von Daten über die Waldentwicklung, der Bedürfnisse der Endnutzer sowie der Philosophie, die der Modellentwickler zur Lösung der Probleme im Rahmen der Modellentwicklung verfolgt hat (Hasenauer 2006b).

Wird ein Modell in mathematische Gleichungen und diese in ein Computerprogramm überführt, entsteht ein Simulationsmodell, mit dem das Systemverhalten am Rechner nachgebildet werden kann. Die Computerprogramme, die der Nachbildung des Wachstums von Bäumen und Beständen dienen, werden als Waldwachstumssimulatoren bezeichnet (Pretzsch 2001).

Aufgrund des Abstraktionsprozesses bei der Modellentwicklung gelten ein paar allgemeine Regeln, die es auch im Rahmen der Evaluation zu berücksichtigen gilt. Erstens ist es unmöglich, ein Modell mit absoluter Bestimmtheit als das Modell zu benennen, welches die Realität am besten wiedergibt. Zweitens sind alle Modelle falsch, aber einige Modelle sind nützlich. Die Aufgabe dieser Untersuchung besteht daher darin, das Modell zu identifizieren, welches am nützlichsten ist. Drittens kann kein Modell in der Abwesenheit von klar definierten Zielen bewertet werden. Viertens bleibt bei der Bewertung von Modellen auch immer ein Element der Subjektivität des Entscheiders erhalten (Monserud 2003).

4.2 Arten von Waldwachstumsmodellen

In der Literatur wird eine ganze Reihe von unterschiedlichen Modellansätzen beschrieben, die zur Modellierung von Waldökosystemen verwendet werden. Diese lassen sich auf vielfältige Art und Weise charakterisieren. Aufgrund ihrer theoretischen Wissensbasis, ihrem Komplexitätsgrad und ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung können sie in Anlehnung an Monserud (2003) und Pretzsch (2001) in sechs Modellkategorien eingeteilt werden:

1. Managementbasierte Ertragsmodelle
2. Prozessmodelle
3. Hybrid Modelle
4. Ökologische Sukzessionsmodelle (Gap Models)
5. Ökologische Prozessmodelle
6. Biommodelle (Vegetation Distribution Models)

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Modellkategorien kurz erläutert.

4.2.1 Managementbasierte Ertragsmodelle

Managementbasierte Ertragsmodelle auf Basis empirischer Beobachtungen bilden die klassische Form der forstwissenschaftlichen Wachstumsmodellierung für nachhaltig bewirtschaftete Waldbestände. Die Konstruktion der ersten Ertragstafeln begann im 18. und 19. Jahrhundert und hat mit der Entwicklung EDV gestützter, einzelbaumbasierter Wachstumssimulatoren seit Beginn der 80er-Jahre des 20. Jahrhunderts ihren heutigen Stand der Forschung erreicht. Ertragsmodelle existieren für nahezu alle nachhaltig bewirtschafteten Typen von Wäldern aller Klimazonen und stellen die am weitesten verbreitete Form der Wachstumsmodelle dar (Monserud 2003). Sie basieren auf der Annahme eines standortspezifischen Wachstums der Bäume. Als Maß für die Güte eines Standorts dient in der Regel die Oberhöhe in einem Bezugsalter, auch Bonität genannt. Die Ermittlung des Baumwachstums wird üblicherweise durch die baumartenspezifische Veränderung der Dimensionen des Durchmessers und der Höhe in Abhängigkeit von der Bestandesdichte ausgedrückt. Bei den Einzelbaumansätzen werden zusätzlich meist unterschiedliche Kronenparameter zur Schätzung der Konkurrenzsituation des Einzelbaums herangezogen. Um die Vorhersagen für das Bestandeswachstum zu verbessern, werden die modernen Wachstumsmodelle üblicherweise durch Mortalitätsmodelle und gegebenenfalls durch Einwuchsmodelle ergänzt, welche die Absterbe- bzw. Erneuerungsprozesse einer Bestandesentwicklungsphase entsprechend baumartenspezifisch und dichteabhängig schätzen. In Anlehnung an Pretzsch (2001) lassen sich die managementbasierten Ertragsmodelle hinsichtlich ihrer chronologischen Entwicklung in drei Unterkategorien gliedern. Diese lassen sich im Wesentlichen durch eine steigende räumliche Auflösung und zunehmende Flexibilisierung durch die Herleitung und Verwendung biometrischer Wachstumsfunktionen charakterisieren (Hinrichs 2006).

- *Ertragsmodelle auf Basis von Bestandesmittel- und Bestandessummenwerten*
Diese Modelle werden klassischerweise durch die Aufstellung von Ertragstafeln konstruiert. Über die Höhenbonität, welche die Höhenentwicklung des Bestandes in Abhängigkeit vom Alter für einen bestimmten Standort festlegt, kann die für das nachhaltige Management entscheidende Vorratsentwicklung in Form der Gesamtwuchsleistung abgeleitet werden. Dies wird über eine funktionale Beziehung zwischen der Gesamtwuchsleistung und der Höhe ermöglicht, die auf das Eichhornsche Gesetz zurückgeht.
- *Ertragsmodelle auf Basis von Stammzahlhäufigkeiten*
Die Modelle basieren alle auf der Beschreibung der zeitlichen Entwicklung von Merkmalsverteilungen. Für die Darstellung von Verteilungen einzelner Merkmalsausprägungen werden Klassen gebildet (i.d.R. Durchmesserklassen), die den zugehörigen einzelnen Individuen die Merkmalsausprägung der jeweiligen Klassenmitte zuordnen.
- *Ertragsmodelle auf Basis von Einzelbäumen*
Diese Modellvariante ist vor allem durch den Einzug der EDV in die Waldwachstumssimulation ermöglicht worden (Monserud 2003). Bei den Einzelbaummodellen erfolgt die Modellierung auf Grundlage empirisch abgeleiteter Ursache-Wirkungsbeziehungen auf der höchstmöglichen, managementrelevanten Abstraktionsebene. Einzelbaummodelle beschreiben das Wachstum des Einzelbaums in der Regel durch ein mehrschichtiges Gleichungssystem unter Berücksichtigung der vergangenen und aktuellen Wuchsumstände des jeweiligen Bestandes. Die Auswirkungen

der Wuchsumstände des Bestandes auf das Wachstum des Einzelbaumes werden durch Konkurrenzmaße ausgedrückt. Die Beschreibung der aktuellen Konkurrenzverhältnisse und möglicher Veränderungen aufgrund von Durchforstungen oder Mortalität erfolgt anhand spezifischer Konkurrenzindizes. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Konstruktion in positionsabhängige und positionsunabhängige Indizes unterscheiden. Positionsabhängige Modelle berücksichtigen die Lagekoordinaten der Einzelbäume und damit ihre räumliche Verteilung innerhalb der Bestände zur Herleitung der Konkurrenzverhältnisse. Positionsunabhängige Modelle verwenden dazu hingegen immer Bestandesmittelwerte (Hinrichs 2006). Dieser Unterschied in der Herleitung der Konkurrenzindizes wird in der Fachliteratur auch häufig zur Kategorisierung der Einzelbaummodelle verwendet (Pretzsch 2001, Porté A. and Bartelink H.H. 2002, Pretzsch et al. 2002a, Hasenauer 2006b).

Die Modellierung des Baumwachstums erfolgt ausgehend von einem Ausgangszustand. Anhand von diesem werden die Zustandsveränderungen der Einzelbaumattribute, wie z.B. des Durchmessers, der Höhe, der Kronenbreite und des Kronenansatzes, der Mortalität und des Einwuchses, für eine definierte Simulationsperiode durch unterschiedliche biometrische Funktionen bestimmt. Da die Auswirkungen der Zuwachsveränderungen in Folge von Durchforstungen für jeden einzelnen Baum bestimmt werden, ist es möglich, eine große Bandbreite unterschiedlicher Behandlungsvarianten zu erzeugen. Darüber hinaus können bei der Auswahl geeigneter Konkurrenzindizes, welche beispielsweise die Kronenmorphologie unterschiedlicher Baumarten berücksichtigen, auch baumartenspezifische Einflüsse auf die Konkurrenz in einem Bestand beschrieben werden. Dies ist insbesondere für die Modellierung des Wachstums von ungleichaltrigen Mischbeständen von Bedeutung (Hinrichs 2006).

Zur Beschreibung des Wachstums des Bestandes werden die Ergebnisse der Einzelbäume am Ende des Prognosezeitraums und als Zwischenergebnis nach jedem Simulationszyklus aufsummiert. Viele Simulatoren verfügen zusätzlich über Visualisierungsmöglichkeiten der Bestände zur Veranschaulichung von Konsequenzen forstlicher Eingriffe, was für die Verwendung des Simulators als Entscheidungsunterstützungssystem von großem Wert ist (Hinrichs 2006).

Das wohl bekannteste Beispiel eines managementbasierten Ertragsmodells ist der Forest Vegetation Simulator (FVS) (Dixon 2002). Das Modell wird vor allem in den USA und Kanada eingesetzt und bildet über zahlreiche Varianten die meisten der dort vorhandenen Waldregionen ab.

Ein wesentlicher Nachteil der Ertragsmodelle besteht darin, dass sie nicht mit den zugrundeliegenden kausalen Zusammenhängen der Produktivität, wie Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe, Bodenfeuchte und dem Klima, verknüpft sind. Die klassischen Ertragsmodelle basieren auf empirisch erhobenen Datengrundlagen, die in der Regel aus speziell angelegten Versuchsflächen stammen. Ihre Prognosen sind daher nur im Rahmen der zugrundeliegenden Daten gültig (Baumart, Standort, Alter, Bestandesdichte) und erfolgen unter der Annahme nicht wechselnder ökologischer Rahmenbedingungen. Zukünftige Auswirkungen von Klima- oder Standortsveränderungen können mit diesem retrospektiven Prognoseansatz daher nur unzureichend abgebildet werden (Monserud 2003, Fontes et al. 2010).

4.2.2 Prozessmodelle

Das Ziel von ökophysiologischen Prozessmodellen ist es, primäre Kausalzusammenhänge zwischen einzelnen, das Wachstum beeinflussenden Variablen aufzudecken, um allgemeingültige Schlüsse über die Entwicklung der Bäume ziehen zu können. Der Focus liegt dabei auf der Modellierung der

für das Wachstum verantwortlichen Schlüsselprozesse und den grundlegenden Ursachen ihrer Produktivität. Die Modelle stützen sich dabei häufig auf biologische Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung der Lichtabsorption, der Interzeption von Niederschlägen, der Evapotranspiration, der Nährstoffaufnahme, der Photosynthese, der Atmung, der Allokation und der Absterbeprozesse (Pretzsch 2001, Hinrichs 2006). Deshalb können in solchen Modellen auch Kombinationswirkungen berücksichtigt werden, über deren Auswirkungen es noch keine oder keine ausreichend langfristigen Erfahrungen gibt. Die zunehmende Beeinträchtigung der Waldökosysteme durch Störfaktoren wie Immissionen, Anstieg der CO₂-Konzentration der Luft, Klimaveränderungen und der Wunsch, die Reaktionen der Waldökosysteme zu verstehen und zu prognostizieren, geben den ökophysiologischen Prozessmodellen einen starken Auftrieb. Denn mit ihnen können am ehesten die Auswirkungen abgebildet werden, für die es noch keine experimentelle Absicherung gibt. Prozessmodelle bilden in einer sich verändernden Umwelt daher den am besten geeigneten Modellansatz für das Verständnis und die Prognose des Verhaltens von Waldökosystemen. Indem sie neben der Vorhersage der Naturalproduktion auch Berechnungen zum Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserkreislauf leisten, bilden sie zudem eine Entscheidungshilfen für ein umfassendes Ökosystemmanagement (Pretzsch 2001)

Die Bezeichnung „Prozessmodelle“ ist jedoch insofern irreführend, als natürlich alle Wachstumsmodelle Prozesse beschreiben. Lediglich die Zeit- und Raumskala der modellierten Prozesse verfeinern sich bei dieser Modellkategorie (Pretzsch 2001). Tatsächlich können keine rein vollständig prozessbasierten Modelle existieren, da sie sich wie jedes Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt auf statistische Schätzverfahren für «Prozess»-Funktionen verlassen müssen (Fontes et al. 2010).

Ihrer Entwicklung und Anwendung sind daher Grenzen gesetzt, da noch erhebliche Wissenslücken über die Prozesse im Baum und Boden bestehen und der Übergang von Einzelprozessen zum Verhalten des Systems insgesamt noch weitgehend ungelöst ist. Die bisher konstruierten Wachstumsmodelle dieses Typs enthalten daher noch viele ungeprüfte Hypothesen, etwa über das Wurzelwachstum oder die Verteilung der Assimilate auf Nadeln, Ästen, Stamm und Wurzeln und kommen nicht ohne statistische abgeleitete Vorgaben aus (Pretzsch 2001).

Eine detaillierte Übersicht über Prozessmodelle, die in Europa eingesetzt werden, gibt Fontes et al. 2010. Darin werden 25 Prozessmodelle im Hinblick auf ihre Eignung für das forstliche Management in ihrer Struktur sowie der benötigten Eingangs- und Ausgangsinformationen analysiert.

Trotz dieser Fülle an prozessbasierten Modellen, ist ihre Anwendbarkeit in der operativen Entscheidungsfindung noch begrenzt. Gründe für diese Einschränkung sind unter anderem die komplexe Struktur der prozessbasierten Modelle. Aber auch ihre Schwäche, waldbauliche Maßnahmen realistisch zu berücksichtigen sowie mit ausreichender Genauigkeit Ausgangsvariablen zu liefern, die für die Forstwirtschaft von Relevanz sind, tragen dazu bei (wie z.B. Volumen von handelsüblichen Holzsortimenten oder die Abmessungen der einzelnen Bäume – Höhe und Durchmesser). Darüber hinaus können nur wenige Modelle ungleichaltrige, mehrschichtige und gemischte Bestände simulieren. Das Haupthindernis, das eine breite Anwendbarkeit von Prozessmodellen in der forstlichen Planung erschwert, ist jedoch die Verwendung von detaillierten Eingabedaten, die nicht über die traditionellen Waldinventuren erfasst werden (Milner et al. 2003, Seidl et al. 2005, Fontes et al. 2010).

4.2.3 Hybridmodelle

In den letzten Jahren haben einige Modellierer von Prozessmodellen die Notwendigkeit erkannt, dass sie ihre Modelle auch für die Situationen und Probleme in der Waldbewirtschaftung zugänglich ma-

chen müssen. Dies wird versucht zu erreichen, in dem die positiven Eigenschaften eines physiologischen Prozessmodelles mit denen eines empirisch basierten Ertragsmodelles kombiniert werden. Das Ergebnis wird als Hybridmodell bezeichnet. Ein Hybridmodell ist dementsprechend ein Mix aus kausalen sowie empirischen Elementen auf einer Hierarchieebene (Monserud 2003, Fontes et al. 2010).

Derzeit gibt es zwei wesentliche Ansätze, wie die kausalen und empirischen Elemente zu einem Hybridmodell vereint werden können (Fontes et al. 2010):

- 1) Verknüpfung eines bestehenden managementbasierten Ertragsmodelles und eines physiologischen Prozessmodells, die für den gleichen Wald-Kontext entwickelt wurden. Diese Kopplung beruht auf der Entwicklung von Signal-Transfer-Funktionen. Dabei wird die Produktivität in Abhängigkeit von Umweltfaktoren im Prozessmodell simuliert und anschliessend über die Transferfunktionen in das empirische Modell übertragen; wie z.B. bei dem Modell FinnFor (PM) und Motti (EM) (Matala et al 2005, Matala et al 2006) sowie dem Modell MAESTRO (PM) und PTAEDA2 (EM) (Baldwin et al. 2001).
- 2) Entwicklung von Hybridmodellen im engeren Sinn, basierend auf Konzepten sowohl aus der empirischen wie auch der Prozessmodellierung, die in einem Computercode als ein Modell verkörpert werden; wie z.B. im Modell Forest v5.1 (Schwalm and Ek 2004).

Für viele sind Hybridmodellen die Zukunft der Wachstumsmodellierung, da einerseits die empirischen Ertragsmodelle durch die Einbindung kausaler Zusammenhänge in die Lage versetzt werden, Veränderungen der standörtlichen Rahmenbedingungen nachzubilden und andererseits Prozessmodelle durch die Einbeziehung von empirischen Elementen auf Systemebene den Schritt zur Ebene des Managements vollziehen können (Hinrichs 2006). Doch trotz dieser Vorteile sind Hybridmodelle bislang eher weniger für das forstliche Management geeignet. Für einen erfolgreichen Einsatz in der forstlichen Praxis müssen die Eingangsdaten eines solchen Modelles leicht zu erheben sein, anderenfalls kommen die Modelle nicht zur Anwendung. Gleichzeitig muss auch der Output den Ansprüchen der Praxis genügen (Monserud 2003).

In Anbetracht ihrer erst jungen Geschichte stellen Hybridmodelle einen sehr vielversprechenden Ansatz dar. Ihre Entwicklung könnte zukünftig noch massgeblich beschleunigt werden, vor allem wenn eindeutig nachgewiesen werden kann, dass sowohl das empirische Modell durch die Einbringung von mechanistischen Funktionen sowie das Prozessmodell durch die Nutzung von empirischen Elementen und Einschränkungen der übergeordneten Systemebene verbessert werden kann (Mäkelä et al. 2000). Dieser Fortschritt bedarf jedoch einer stärkeren Kooperation zwischen Modellierern und der forstlichen Praxis (Monserud 2003).

4.2.4 Ökologische Sukzessionsmodelle (Gap Modell)

Parallel zur managementbasierten Ertragsmodellierung wurden in den letzten 30 Jahren von Ökologen individuenbasierte Sukzessionsmodelle entwickelt, die den Waldbestand als Aggregation von Kleinflächen interpretieren, die durch den Standraum eines Einzelbaums definiert werden (Monserud 2003). Die Modellierung erfolgt auf der Analyse der dynamischen Entwicklung innerhalb dieser Kleinflächen (Gaps). Die Entwicklung der Kleinfläche beginnt dabei mit dem Umsturz oder der Nutzung eines Altbaums der herrschenden Bestandesschicht. Die dadurch frei gewordene Fläche wird durch eine neue Baumgeneration besiedelt, dessen Stammzahl sich im Laufe der Zeit durch Selbstdifferenzierung immer weiter reduziert, so dass am Ende des Zyklus nur noch ein Baum die herrschende Position einnimmt. Kleinflächenmodelle beschreiben das Wachstum der Bäume ebenfalls auf Einzel-

baumebene, aber ohne Berücksichtigung der Baumposition. Als unabhängige Variable zur Schätzung des Zuwachses verwenden sie jedoch die mittleren standörtlich-klimatischen Verhältnisse auf der Kleinfläche und keine von der Bestandesdichte abhängigen Einzelbaumparameter. Nahezu alle heute gebräuchlichen Kleinflächenmodelle zur Prognose des Wachstums von Rein- und Mischbeständen sind massgeblich vom Modell JABOWA (Botkin et al. 1972) inspiriert, sowie seiner Weiterentwicklung FORET (Shugart and West 1977).

Da die Veränderungen der kleinstandörtlichen Verhältnisse eher langsam und ihre Auswirkungen auf das Wachstum der Bäume noch einmal zeitlich verzögert abläuft, werden Kleinflächenmodelle in erster Linie zur Beschreibung der langfristigen Sukzessionsdynamik naturnaher Waldbestände verwendet. Als Ausgabewerte liefern die Modelle daher oftmals ökologisch relevante Zielgrößen, wie die Veränderung der Biomasseproduktion, die für das Management der Bestände unzureichend sind. Kleinflächenmodelle finden ihre praktische Anwendung daher vorrangig in der Klimaforschung, zur Beschreibung der Auswirkungen langfristiger Klimaveränderungen auf die Waldentwicklung (Hinrichs 2006). Aus diesem Grund scheiden Gap-Modelle für die Unterstützung des forstlichen Managements aus. Diese Schwäche wurde jedoch von den Modellieren erkannt und es sind teils Bestrebungen im Gang, die Modelle um Funktionalitäten zu erweitern, welche die Modelle in die Lage versetzen, auch gängige Behandlungsstrategien abzubilden (Rasche et al. 2011). Dennoch kann man davon ausgehen, dass Gap-Modelle die managementbasierten Ertragsmodelle nicht ersetzen werden, da sie in der Genauigkeit nicht an deren Resultate herankommen (Lexer and Hönninger 2001, Risch et al. 2005).

4.2.5 Biommodelle (Vegetation Distribution Model)

Eine weitere Gruppe innerhalb der Sukzessionsmodelle bilden die auf grossräumiger und globaler Ebene eingesetzten Biommodelle oder Vegetation Distribution Models (Prentice et al. 1992, Monserud 2003, Hinrichs 2006). Auf Basis von statistischen Beziehungen prognostizieren diese Modelle das Auftreten eines bestimmten Vegetationstyps oder Bioms für jeden Punkt in der Landschaft. Da Biommodelle die Eignung eines bestimmten Vegetationstyps mit den klimatischen und ökologischen Bedingungen an einem Ort verknüpfen, prognostizieren sie einen potenziell möglichen Vegetationstypen. Die meisten dieser Modelle, welche in den letzten Jahren entwickelt wurden, dienen daher vor allem zur Beantwortung der Frage, wie sich die Vegetation grossräumig unter dem Einfluss von Klimawandel entwickeln wird. Dabei werden alle diese Modelle in der Regel über klimatische Kenngrößen gesteuert. Einige berücksichtigten auch Faktoren wie Feuchtigkeitsstress und Bodeneigenschaften eines Standortes. Aufgrund ihrer grossräumigen Skalierung sind sie jedoch nicht dafür geeignet, forstliche Behandlungsstrategien abzubilden. Diese Modelle operieren auf einem hierarchischen Level, das weit über der für Managementzwecke relevanten Ebene des Einzelbaumes und Bestandes liegt. Gleichzeitig beginnen sie ihre Simulation nicht mit der am Standort tatsächlich vorhandenen Vegetation, sondern prognostizieren eine potentielle Vegetation (Monserud 2003). Aus diesen Gründen sind sie für das forstliche Management, das auf eher kleinräumigen und mit anthropogen behandelten Beständen operiert, nicht geeignet.

4.2.6 Ökologische Prozessmodelle

Eine weitere Klasse von ökologischen Modellen sind die Kompartimentmodelle oder auch ökologische Prozessmodelle genannt. Hierzu zählen z.B. CENTURY (Parton et al. 1987, Parton et al. 1988); FOREST-BGC (Running and Coughlan 1988) und PNET (Aber and Federer 1992). In gewissem Sinne sind dies Prozessmodelle, aber ihre Grundeinheiten sind einzelne Kompartimente des Ökosystems

und ihr Fokus liegt auf der Vorhersage der Prozesse zwischen den einzelnen Kompartimenten. Dabei sind die Modelle vielfach auf einen bestimmten Prozess spezialisiert, anstatt das ganze Ökosystem Wald zu betrachten. Sie werden daher nur selten für das forstliche Management eingesetzt. Eine Ausnahme bildet das Modell FORECAST, siehe Kapitel 5.1.13 (Kimmins et al. 1999, Kimmins et al. 2010). Obwohl bei FORECAST Bäume nicht die primäre Modellierungseinheit sind, kann mit dem Modell dennoch eine breite Palette von waldbaulichen Systemen, Behandlungsstrategien und natürlichen Störereignissen simuliert werden (Monserud 2003).

4.2.7 Welche Modellansätze sind geeignet?

Zur Unterstützung der Entscheidungsprozesse in einem Forstbetrieb eignen sich vornehmlich Modelle aus der Kategorie „managementbasierte Ertragsmodelle“. Mit Ertragsmodellen können relativ schnell Simulationen mit eigenen Daten durchgeführt werden, die wiederum in der Praxis leicht zu erheben sind. Gleichzeitig liefern sie genau die Ausgangsgrößen, die für das forstliche Management von Interesse sind. Ertragsmodelle sind jedoch nicht klimasensitiv. Dies hat zum Nachteil, dass ihre Ergebnisse langfristig nur bedingt glaubwürdig sind, wenn sich Umweltbedingungen ändern.

Prozessmodelle wiederum sind sehr gut geeignet, um sich verändernde Umwelteinflüsse abzubilden. Sie benötigen jedoch viele Eingabeinformationen für die Durchführung von Simulationen, die in der Praxis nur sehr schwer zu erheben sind. Weiterhin sind sie in Ihrem Aufbau und ihrem Wirkungsmechanismus recht kompliziert, was ihr Verständnis und somit ihren Einsatz im forstlichen Management erschwert.

Hybridmodelle versuchen die positiven Eigenschaften beider Modellkategorien zu verknüpfen (Management und Klimasensitivität). Diese Modellkategorie ist im Vergleich zu den beiden anderen Kategorien aber noch relativ jung und bedarf noch weitere Untersuchungen sowie erste Erfahrungen aus Anwendungsversuchen in der forstlichen Praxis (Fontes et al. 2010).

Die Modellkategorien der Kapitel 4.2.4 bis 4.2.6 wurden primär für ökologische Fragestellungen entwickelt, wodurch sie weniger für das forstliche Management geeignet sind. Lediglich im Bereich der Gap-Modelle gibt es einzelne Ansätze zur Abbildung von Behandlungsstrategien, wodurch die Modelle teilweise auch die für das Management von Forstbetrieben notwendigen Aussagen generieren können.

4.3 Struktur von Waldwachstumsmodellen

Abbildung 1 zeigt das grundsätzliche Schema der Waldwachstumsmodellierung. Der Zuwachs des Baumes ist abhängig vom Ausgangszustand des Baumes, von Standortvariablen und von der Bestandesstruktur. Die Bestandesstruktur bestimmt massgeblich die gegenseitige Konkurrenz um Wasser, Nährstoffe und Licht. Sie verändert sich durch Eingriffe, natürliche Absterbeprozesse und durch das Baumwachstum. Der Zuwachs des Einzelbaumes wird durch Dicken- und Höhenwachstumsfunktionen beschrieben, welche von der gegenseitigen Konkurrenz, den Standortvariablen und den Startdimensionen des Baumes abhängen.

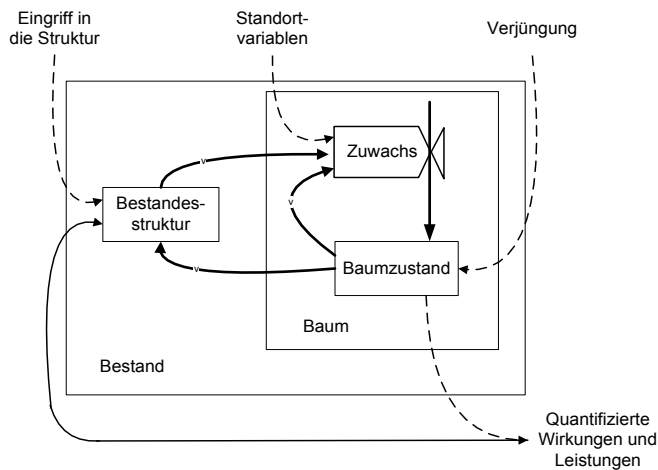


Abbildung 1: Modellierung der Bestandesdynamik (Pretzsch 2001)

Die Eingriffe in die Bestandesstruktur erfolgen über anthropogene Eingriffe (Durchforstungen und Endnutzungen) als auch durch natürliche Absterbeprozesse. Eingriffe werden durch geeignete Algorithmen modelliert. Weiter werden Einwuchs- oder Verjüngungsmodelle benötigt, um neue Bäume im System zu generieren. Will man zudem verlässliche Prognosen zum Baumvolumen- und zur monetären Ertragsentwicklung erzeugen, sind genaue Schaftform- und Sortimentierungsmodelle sowie spezifische Produktivitätsmodelle für die Holzernte unerlässlich. Aus den jeweiligen Zustandsgrößen der Bäume lassen sich weitere sekundäre Größen ableiten wie z.B. Biomasse von Astderbholz, Rinde, Feinäste, Nadeln und Blätter sowie deren Nährstoffgehalt, um daraus den Nährstoffentzug als Folge einer Vollbaumnutzung zu schätzen. Weitere Wirkungen und Leistungen, wie CO₂-Speicherung, Biodiversität (Index) oder Windwurfrisiko lassen sich ebenfalls aus den Baum-Zustandsgrößen modellieren.

4.3.1 Zuwachsfunktionen

Das Wachstum kann mittels potenzialbasierten oder potenzialunabhängigen Wachstumsfunktionen auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten modelliert werden (Hasenauer 2006a).

Potenzialbasierte Höhen- und Durchmesserzuwächse basieren auf einem begrenzten standorts- und baumartenabhängigen Wachstum eines freistehenden Baumes. Dieses Potenzial wird in der Folge um einen Faktor zwischen 0 und 1 reduziert, welcher die standorts- und situationsspezifische Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe erfasst.

$$y' = \text{Zuwachspot.} * CR^a * (1 - e^{(b * Konk)}) + \varepsilon$$

Formel 1

y'	= Zuwachs des Baumes
Zuwachspot.	= Potenzieller maximaler Zuwachs jedes Baumes
CR	= Crown Ratio beschreibt das Verhältnis von Kronenlänge zu Kronenbreite (< 1)
Konk	= bezeichnet einen Konkurrenzindex
a, b	= Parameter
ε	= Restfehler

Potenzialunabhängige Wachstumsfunktionen basieren auf einem Satz von unabhängigen Variablen, welche direkt aus den verfügbaren Daten geschätzt werden.

$$\ln y' = a + b * (\text{Baumzustand}) + c * (\text{Konkurrenz}) + d * (\text{Bonität}) + \varepsilon \quad \text{Formel 2}$$

y' = Zuwachs

Baumzustand = Definiert den Startwert des Baumes zur Zeit t_0 z.B. BHD (t_0)

Konkurrenz = bezeichnet einen Konkurrenzindex

Bonität = Mass für die Standortsgüte

a, b, c, d = Parameter

ε = Restfehler

Die Modellierung des Wachstums beruht wenn immer möglich auf Gesetzmässigkeiten. Ziel ist nicht die beste Anpassung an das vorhandene Datenmaterial, sondern die Reproduktion von bekannten Erscheinungen (Plausibilität). In den gleichförmigen gleichaltrigen Beständen werden für das Dicken- und Höhenwachstum in der Regel altersabhängige Wachstumsfunktionen verwendet. In ungleichaltrigen Beständen mit Bäumen unterschiedlichen Alters kann kein einheitliches Baumalter verwendet werden. Hier besteht die Möglichkeit, altersunabhängige Wachstumsfunktionen zu verwenden. Zeide (1993) beschreibt sowohl altersabhängige (Formel 3) als auch altersunabhängige (Formel 4) Wachstumsfunktionen, die für die Modellierung des Wachstums besonders geeignet sind.

$$\ln(y') = k_1 \cdot y^p \cdot t^q \quad \text{Formel 3}$$

$$\ln(y') = k_1 \cdot y^p \cdot e^{qy} \quad \text{Formel 4}$$

y = BHD, Baumhöhe oder Volumen

y' = erste Ableitung: Zuwachs

t = Alter

k_1, p, q = Parameter

Um die Konkurrenzsituation jedes Einzelbaumes abzubilden, werden Untermodelle eingesetzt (siehe Konkurrenz).

4.3.2 Eingriffs- und Mortalitätsmodelle

Eingriffsmodelle legen fest, wann in einem Bestand durchforstet wird, wie stark durchforstet wird und vor allem welche Bäume entnommen werden. Hauptaufgabe der Durchforstung ist es, die rein natürliche und damit zufallsbedingte Bestandsentwicklung durch gezielte und wiederholte Pflegeeingriffe im Hinblick auf das angestrebte Waldentwicklungsziel zu steuern. Dazu werden Durchforstungsalgorithmen entwickelt, welche sich bezüglich Durchforstungsart, -turnus und -stärke sehr stark unterscheiden. Die Durchforstungsalgorithmen können zeitgesteuert, zielstärkengesteuert oder regelbasiert sein. Eine Übersicht findet man bei Söderbergh and Ledermann (2003) und Duda (2006).

Die Entnahme von Bäumen kann stammzahl-, volumen- und grundflächengesteuert erfolgen. Die Durchforstungsart legt grundsätzlich das Ziel der Durchforstung fest, ob nur abgestorbene, zusätzlich schwache und fehlgewachsene oder auch schon schlagreife Bäume gefällt werden. Man unterscheidet:

- **Hochdurchforstung:** Eingriffe in die vorherrschende und herrschende Baumschicht;
- **Niederdurchforstung:** Eingriffe in die unteren Baumschichten;
- **Selektivdurchforstung:** Selektive Eingriffe in verschiedene Baumschichten;
- **Z-Baumdurchforstung:** Die Zukunftsbäume, die während eines Bestandeslebens auch die Wertträger bleiben sollen, werden bereits im Stangenholz ausgewählt;
- **Kurzumtriebsplantage:** Anbau von Baum-Monokulturen (z.B. mit Pappeln) mit schematischer Durchforstung und kurzem Produktionszeitraum;
- **Gebirgswalddurchforstung:** Auslesedurchforstung unter Beachtung natürlicher Gruppenstrukturen (Rottenstruktur);
- **Dauerwalddurchforstung:** Die Nutzung der Wälder soll so geschehen, dass das Ökosystem als Ganzes und auf Dauer erhalten bleibt (Dauerwald). Im Dauerwald bleibt der Waldboden dauernd bestockt. Geerntet werden einzelbaumweise hiebsreife Bäume, die den Zieldurchmesser erreicht haben, welcher in Abhängigkeit von Baumart, Standort und Qualität festgelegt wurde. Der Dauerwald ist das Resultat aus der Anwendung des Plenterprinzips.
- **Plenterdurchforstung (Plenterung):** Bezeichnet die einzelstammweise Nutzung hiebsreifer Stämme zur dauernden, kleinflächigen Strukturhaltung und Verjüngung der Bestände. Der Plenterwald ist ein Sonderfall des Dauerwaldes. Der Begriff Plenterwald ist jedoch aus historischen Gründen für die montanen bis subalpinen, nadelholzbetonten Wälder reserviert, während im Laubwaldgebiet der Begriff Dauerwald gebräuchlich ist.

Über den Durchforstungssturnus werden die Eingriffszeitpunkte gesteuert, welche sich nach dem Zustand des Waldes richten. Die Durchforstungsstärke bestimmt wie viel % des vorhandenen Bestandes durch den Eingriff entnommen werden soll. Die verschiedenen Baumarten weisen während einer Umtriebszeit Perioden mit unterschiedlichem Zuwachsverhalten auf. Es ist deshalb sinnvoll, die Durchforstungsstärke der altersabhängigen Wachstumsdynamik der Baumart und dem Standort anzupassen. Die Durchforstungsstärke kann sich auf den Holzvorrat, die Basalfläche oder die Stammzahl beziehen.

Die Modellierung der natürlichen Mortalität bei verschiedenen Baumarten, Standorten und Bestandesdichten ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Die meisten Mortalitätsmodelle stützen sich entweder auf maximal überlebensfähige Grenzwerte oder auf Mortalitätswahrscheinlichkeiten. Die maximal überlebensfähige Stammzahl (N) in Abhängigkeit von Mittelstamm (dg) bei unbehandelten Beständen dient dabei oft als Leitkurve für den absoluten Grenzwert. Liegt ein Bestand, beschrieben durch Stammzahl (N) und Grundflächenmittelstamm (dg) ausserhalb dieser Leitlinie, werden so viele Bäume natürlich absterben, bis sein (N , dg)-Wert wieder innerhalb dieser Leitlinie liegt (Reineke 1933).

Schütz J.P. (2008) weist in seinem Beitrag zur Ertragskundetagung der DVFFA auf die Problematik hin, die doppelt logarithmischen (N , dg)-Kurven linear auszugleichen. Es zeigt sich, dass ein Ausgleich mit $\ln(N) = a + b \cdot \ln(dg) + c \cdot (\ln(dg))^2$ viel bessere Ergebnisse erzielt. In welchen BHD-Dimensionen die Einzelbäume jedoch absterben, ist damit jedoch noch nicht geklärt. Dies hängt von der Konkurrenz um die Ressourcen Licht, Wasser und Nährstoffe ab.

Im Modell BWINPro (Kapitel 5.1.8) wird die Mortalität der Einzelbäume durch den maximalen Kronenschlussgrad bestimmt, der aus der maximalen Grundfläche (Reineke 1933, Sterba 1981) hergeleitet wird. Überschreitet der C66 eines Baums den maximalen Kronenschlussgrad, führt dies zu seinem Ausscheiden (Hinrichs 2006).

Für die Berechnung der Mortalitätswahrscheinlichkeiten wird oft auch ein verallgemeinertes lineares Modell mit LOGIT-Transformation verwendet, bei dem die Zielgrösse die erwartete Wahrscheinlichkeit des Absterbens darstellt. Die Mortalitätswahrscheinlichkeiten werden auf Grund mortalitätsbestimmender Variablen, die die Ausgangssituation des Baumes zu Beginn der Prognoseperiode charakterisieren, bestimmt und mittels einer dichotomen Entscheidung wird über das Fort- oder Ableben des Baumes im Modell entschieden.

Das LOGIT-Modell kann man allgemein formulieren als:

$$F(a_i, x_i) = \frac{1}{1 + e^{-(a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n)}} \quad \text{Formel 5}$$

wenn $F(a_i, x_i) \geq S (= \text{lebend})$

wenn $F(a_i, x_i) < S (= \text{tot})$

S = Schwellenwert für Gruppentrennung

$a_0 \dots a_n$ = die geschätzten Koeffizienten

$x_0 \dots x_n$ = die unabhängigen Variablen z.B. Brusthöhendurchmesser, Konkurrenzmass

Die prognostizierte Wahrscheinlichkeit $F(a_i, x_i)$ eines Baumes wird im einfachsten Fall mit einem Schwellenwert (0.5) verglichen. Bei starken Abweichungen der klassifizierten Bäume von der Realität kann dieser Schwellenwert leicht verändert werden.

Ist $F(a_i, x_i)$ kleiner als der Schwellenwert S , dann wird der Baum als tot klassifiziert. Eine Neuerung an dieser Modellkonstruktion stammt von Ďurský (1997). Zuerst wird ebenfalls ein dimensionsloser F-Wert aus der LOGIT Funktion berechnet. In einem zweiten Schritt wird die Mortalitätswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von $F(a_i, x_i)$ aus der Frequenzanalyse der Residuen der logistischen Regression abgeleitet. Die abgeleitete Mortalitätswahrscheinlichkeit (Mrt) kann dann in Form einer Funktion verallgemeinert werden (Abbildung 2).

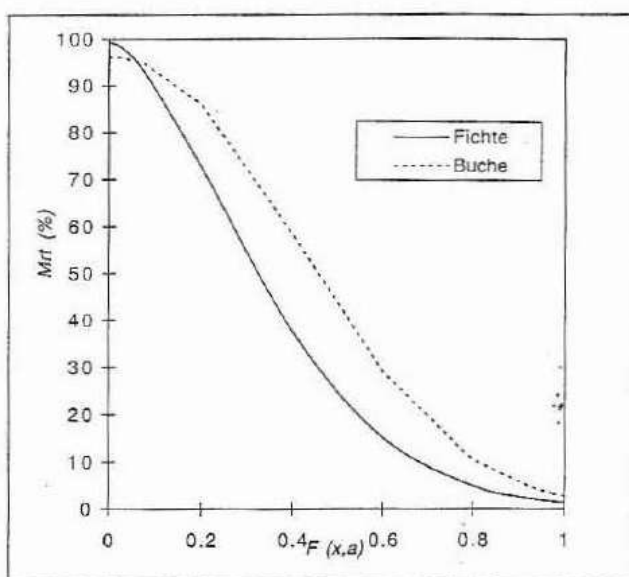


Abbildung 2: Entwicklung der Mortalitätswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von $F(x,a)$ (Ďurský 1997).

Die beste gefundene Beziehung lautet:

$$Fi: Mrt(\%) = \frac{99,4}{\exp^{(4,327 F^{1,628})}}$$

Formel 6

$$Bu: Mrt(\%) = \frac{96,155}{\exp^{(3,593 F^{2,15})}}$$

Die dichotome Klassifikation, ob ein Baum innerhalb einer Wachstumsperiode stirbt oder nicht, erfolgt mit einer stochastischen Komponente durch einen gleichverteilten Zufallsgenerator:

WENN Mrt (%) > Zu[(1...100) DANN T = 0 (tot)],

WENN Mrt (%) <= Zu[(1...100) DANN T = 1 (lebend)].

Monserud and Sterba (1999) zeigen für Fichte, Tanne, Lärche, Föhre, Buche und Eiche in Österreich aufgrund von 43'615 Bäumen eine Lösung, die eine recht gute Übereinstimmung mit realen Werten aufweist.

$$P = (1 + e^{(a_0 + \frac{b_1}{D} + a_2 * CR + a_3 * BAL + a_4 * D + a_5 * D^2)})^{-1}$$

Formel 7

P = Wahrscheinlichkeit der Mortalität (5-Jahre)

D = BHD (cm)

CR = Kronenverhältnis

BAL = Grundfläche der dickeren Bäume (m²/ha)

a₀ – a₅ = baumartenabhängige Parameter

Dabei entsprechen D, CR, und BAL jeweils dem Wert am Anfang einer 5-Jahres Periode

Zur Modellierung der konkurrenzbedingten Mortalität bieten sich als weitere Alternative „stand density management Diagramme“ mit baumartenspezifischen allometrischen Beziehungen und Verteilung auf die BHD- Klassen (Pretzsch and Biber 2005) an. Eine weitere Möglichkeit zur Schätzung der Baummortalität, als der konventionelle statistische Ansatz der LOGIT Modelle, erfolgt mit Hilfe „Neuronaler Netze“ (Hasenauer and Merkl 1999).

4.3.3 Konkurrenz

Die aktuellen Konkurrenzverhältnisse und mögliche Konkurrenzveränderungen als Folge von Durchforstungen oder Mortalität werden anhand spezifischer Konkurrenzindizes erfasst, deren Berechnung je nach Modelltyp positionsabhängig oder positionsunabhängig erfolgt.

Die Kronenlänge oder das Verhältnis von Kronenlänge zu Kronenbreite hat auf die Konkurrenz als auch auf die natürlichen Absterbeprozesse einen starken Einfluss (Hasenauer 2006b). Nach Hasenauer (1994) hat die Werteveränderung dieser Variablen vor und nach der Freistellung einen baumartenspezifischen Einfluss auf das Dicken- und Höhenwachstum. Modelle, die dies berücksichtigen, sind FOREST (Monserud 1975), SILVA (Pretzsch et al. 2002a), MOSES (Klopf et al. 2011) und BWINPro (Nagel 2009).

Es können dabei verschiedene methodische Ansätze eingesetzt werden (nicht lineare Regression, Fuzzy-Logic² und neuronale Netze, kNN-Methode, MS-Methode). „Zur Erfassung des Konkurrenzdrucks, dem ein bestimmter Baum ausgesetzt ist, gibt es mehr als 100 Verfahren. Die Möglichkeiten, neue Indizes zu erfinden, sind unbegrenzt“ (Mitteilung von Prof. Klaus von Gadow).

Zur Beschreibung der Konkurrenz wird in BWINPro beispielsweise der C66 verwendet, der die Schnittfläche von Kronen im Bestand ausgehend vom Einzelbaum darstellt. Dieser Index kann summarisch (C66) oder auch abhängig von der Distanz berechnet werden (C66c). Die Kronenmodellierung hängt ab von dem Kronenansatz, der Kronenlänge und der baumartenspezifischen Kronenform.

Verschiedene Autoren kommen zum Schluss (Ammer et al. 2005), dass es keinen besten Konkurrenzindex gibt, sondern deren Eignung hängt von den untersuchten Baumarten und den jeweiligen Verhältnissen ab. Die Berechnung und die notwendigen Variablen unterscheiden sich diesbezüglich jedoch beträchtlich. Burkhart and Tomé (2012) meinen in ihrem neusten Buch, dass das Erfassen der Bestandsdichte eine der drängendsten Probleme in der Waldmodellierung war und ist. Eine einwandfreie Methode dazu ist bislang noch nicht gereift.

4.3.4 Kronenmodelle

Die Visualisierung von Makrostrukturen auf Einzelbaumebene dient neben der Konkurrenz auch der Veranschaulichung und Analyse von Mess- und Simulationsdaten und der Vermittlung von forstwissenschaftlichen Forschungsergebnissen. Dies bedingt jedoch, dass man die dreidimensionale Struktur der Waldbäume kennt und somit Anhaltspunkte ihrer Kronenform hat.

Möglichkeiten zur Modellierung der Kronenform und deren Entwicklung wird in verschiedenen Literaturen dargestellt. Pretzsch and Seifert (2000) geben in ihrem Modell SILVA 2 Hinweise, wie die Kronen verschiedener Baumarten aussehen. Gadow (2003) beschreibt in seinem Buch „Waldstruktur und Wachstum“ auf den Seiten 55 – 69, wie man den Kronenraum modellieren kann. Auf die Unterschiede bei der Verwendung von statischen und dynamischen Kronenansatzmodellen geht Ledermann (2007) ein. Sprauer et al. (2011) stellen in ihrem Beitrag verallgemeinerte additive gemischte Modelle zur Schätzung der Kronenansatzhöhe und der Kronenprojektionsfläche am Beispiel der Baumart Buche in Nordwestdeutschland vor.

4.3.5 Mass für die Standortsgüte

Eine wichtige Frage besteht darin, die für das Wachstum wichtigen natürlichen Standortvariablen zu erfassen. D.h. es braucht einen Schlüssel zur Bestimmung der forstlichen Standortsgüte aus den Standortvariablen und Standortmerkmalen (Abbildung 3). Die Standortmerkmale Wärme, Feuchte und Trophie charakterisieren den Waldstandort und sind wachstumswirksam. Sie können sich verstärken oder abschwächen oder sogar aufheben. Zum Beispiel kann eine günstige Wasserversorgung eine mässige Nährstoffversorgung kompensieren. Die Standortvariablen sind einfache mess- oder herleitbare Grössen aus den Bereichen Lage, Boden, Klima und Vegetation, aufgrund derer sich Aus-

² Auch wenn – wie fast immer – das vorhandene Wissen Lücken aufweist oder teilweise veraltet ist, bietet sich der Einsatz von Fuzzylogik an, um noch zu einer fundierten Aussage über einen aktuellen oder künftigen Systemzustand zu gelangen. Dabei wird aus sprachlich formulierten Sätzen und Regeln mittels Fuzzylogik eine mathematische Beschreibung gewonnen, die in Rechnersystemen genutzt werden kann. Interessant ist, dass mit der Fuzzylogik auch dann Systeme sinnvoll gesteuert (bzw. geregelt) werden können, wenn ein mathematischer Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgabegrößen eines Systems nicht darstellbar ist oder nur mit großem Aufwand erfolgen könnte, so dass eine Automatisierung zu teuer oder nicht in Echtzeit realisierbar wäre. (<http://de.wikipedia.org/wiki/Fuzzylogik> 17.04.2013)

sagen über die Standortmerkmale treffen lassen (vgl. Abbildung 3). Ziel der Standortkunde ist nicht, die einzelnen Standortvariablen zu erfassen, sondern das Ergebnis ihres Zusammenwirkens möglichst in einer geeigneten Bezugsgröße, wie dGz oder Bonität festzuhalten. Am direktesten lässt sich die Standortsgüte über den durchschnittlichen jährlichen Volumenzuwachs (dGz) messen, entweder als dGz100 oder als dGzmax. Leider lassen sich diese Größen nicht einfach bestimmen.

Will man jedoch den Effekt von klimatischen Einflüssen direkt modellieren, so müssen die Klimavariablen, wie Niederschläge, Jahresdurchschnitts- oder Durchschnittstemperatur während der Vegetationsperiode (Mai – September) oder Dauer der Vegetationsperiode in Tagen, als Eingangs- und Bezugsgrößen aufgenommen werden (wie z.B. in Silva).

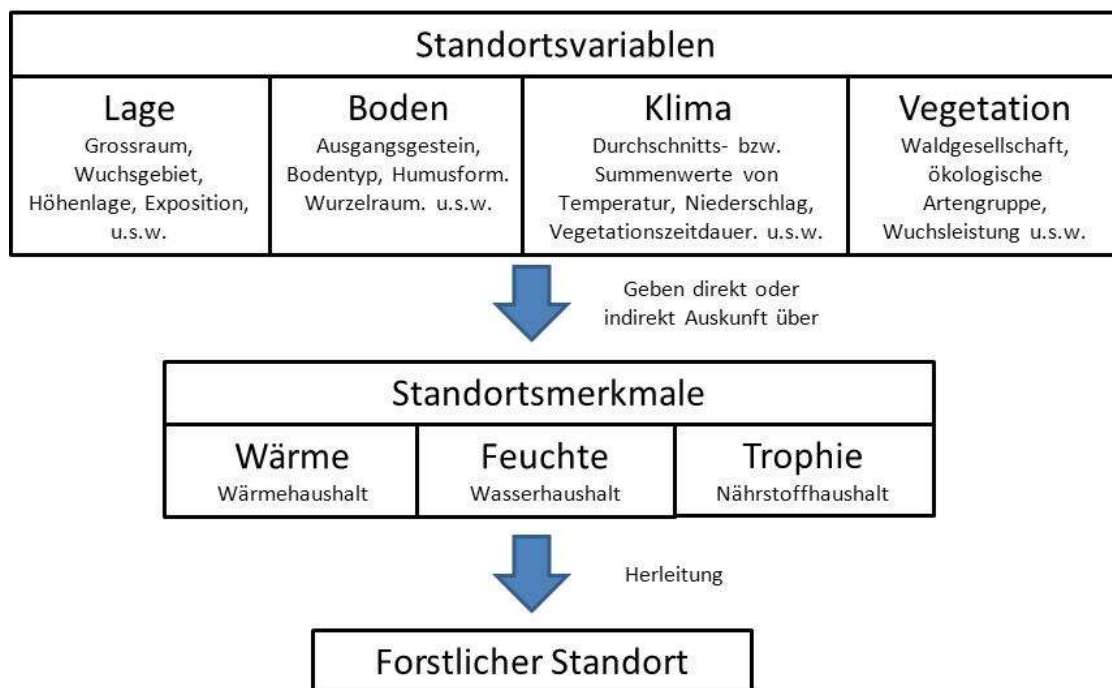


Abbildung 3: Charakterisierung des forstlichen Standortes³.

Damit liegt die Einbeziehung klimatischer Kenngrößen in die Bonitierungsmodelle nahe. Diese könnten direkt für die einzelnen Bestände verwendet werden.

Die Aufgabe besteht also darin, den Standort unter Betrachtung des Gesamtsystems sinnvoll zu analysieren und für eine Beschreibung einheitlich zu charakterisiert. Dabei sind die vorhandene Datenbasis zur Parametrisierung der Wachstumsfunktionen und die Verfügbarkeit von Modellinputvariablen besonders zu berücksichtigen. Standortsfaktoren, die mit der Meereshöhe korreliert sind und auf die Standortsgüte einen Einfluss haben, sind Temperatur und Niederschlag (Keller 1976). Als Mass für die Standortsgüte wird meistens die Oberhöhenbonität verwendet. Als weitere geeignete Grösse kann jedoch auch der dGzmax (maximaler dGz an Trockensubstanz) verwendet werden. Die Oberhöhe, als Mass für die Standortsgüte, ist laut Keller (1992) und Ammann (2004) ein schlechterer Indikator als die Gesamtzuwachsleistung. Mit dem maximalen durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dGzmax) hat man zur Charakterisierung eines Standortes eine relativ unabhängige Grösse, um die Leistungsfähigkeit eines Standortes zu beschreiben. Für die Schweiz besteht ein ertragskundlicher Boni-

³ http://www6.fh-eberswalde.de/bodenkunde/sites/default/files/files/Standortkunde_FoWi.pdf (gefunden im November 2011)

tätsschlüssel (Keller 1976), der auf quantifizierbaren Standortfaktoren beruht und vom LFI verwendet wird.

Weiskittel et al. (2011) halten in ihrem Buch fest, dass der maximale durchschnittliche jährliche Zuwachs allgemein als geeignete Massnahme zur Charakterisierung der Standortproduktivität gesehen wird. Es ist aber schwierig, diesen ohne Verwendung eines geeigneten Simulationsmodells zu bestimmen. Der maximale MAI ist stark vom Management beeinflusst und variiert stark von Baumart zu Baumart. Unabhängig davon wird der maximale MAI jedoch als Mass für die Waldproduktivität in vielen unterschiedlichen Ländern und Modellen verwendet.

4.3.6 Verjüngungsmodelle

Die Modellierung der Verjüngung erfolgt entweder auf der Basis einer Pflanzung oder einer natürlichen Verjüngung. Bei der Pflanzung wird modellmässig eine feste Durchmesserverteilung in einem festen Alter generiert. Bei der natürlichen Verjüngung wird hingegen der Einwuchs über eine Durchmesserschwelle mittels einer Funktion abhängig von Standortsgüte, Baumart und Bestandesdichte generiert.

Tremer (2008) hat sich in seiner Dissertation zum Ziel gesetzt, eine Methode für eine Schätzung der Dichte sowie der Dimensions- und Artenzusammensetzung der Naturverjüngung zu entwickeln. Die Modellierung fand dabei in Abhängigkeit von Waldzustandsgrössen aus 21.000 Stichprobenpunkten südostniedersächsischer Forstämter statt. Weitere Beispiele für die Modellierung des Einwuchses findet man nach Tremer (2008) bei Solomon et al. (1995), Lin et al. (1996), Vanclay (1992) oder bei Ledermann (2002).

4.3.7 Fehlende Ausgangsinformationen

Die Inventurdaten oder allgemein die Ausgangsinformation ist auf einen definierten Satz von Informationen ausgelegt. Fehlenden Ausgangsinformationen müssen für das anzuwendende Modell aus vorhandenen Daten und geeigneten Algorithmen hergeleitet werden können. Das Generieren von Durchmessern, wie sie in BWINPro und in ganz ähnlicher Form in SiWaWa und SILVA realisiert sind, erfolgt mit Weibullfunktionen, basierend auf dg und $dmax$ (Nagel and Biging 1995). Zur Generierung der Baumfusskoordinaten werden rein zufällige Koordinatenpunkte (Poisson-Prozesse) angenommen. Beispiele solcher Programme sind der Strukturgenerator STRUGEN (Pretzsch 1993, Pommerening 2002), ein Gibbs-Prozess-Modell von Degenhardt (1998) sowie ein auf positionsabhängigen Strukturindizes beruhendes heuristisches Verfahren von Lewandowski and Von Gadow (1997). STANDGEN (Kittenberger 2003) basiert auf Daten aus Österreich und der Schweiz und lässt sich auf beliebig viele Baumarten anwenden (Hallenbarter et al. 2005).

Je nach Waldtyp können drei verschiedene Methoden der Generierung gewählt werden (Kindermann 2004):

- rein zufällig mittels Random-Verfahren (z.B. Poisson-Prozess),
- Layout-Verfahren, besonders geeignet für diverse Pflanzraster und
- das Strukturverfahren, das auch Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigt, wie diese insbesondere in Mischbeständen von Interesse sind.

4.4 Nutzen von Waldwachstumsmodellen

Waldwachstumsmodelle führen Einzelerkenntnisse über das Wachstum zu einer Vorstellung vom Gesamtsystem zusammen. Je nach Zweck des Modells können daraus für Wissenschaft, Bildung und Praxis wichtige Informationen über den Aufbau und das Verhalten von Waldökosystemen abgeleitet werden (Pretzsch 2001).

In der Wissenschaft dient der Einsatz von Waldwachstumsmodellen als Forschungswerkzeug zum einen für die Prüfung von bestehenden Hypothesen. Gleichzeitig ermöglichen sie auch die Gewinnung neuer Erkenntnisse durch Szenarioanalysen. Das Modell wird dabei zum Stellvertreter des realen Systems und wird für die Durchführung von Experimenten eingesetzt. Gerade die Durchführung von Experimenten ist in der Waldwachstumsforschung mit ihren langen Beobachtungszeiträumen und aufwendigen Freilandexperimenten in der Realität oftmals nur schwer durchführbar. Die Entwicklung und der Einsatz von Modellen fördern daher in besonderer Weise den Erkenntnisfortschritt und die Aufdeckung von bestehenden Wissenslücken.

Im Bereich der Ausbildung, Fortbildung und Beratung werden Waldwachstumsmodelle zum Lehrmittel. Mit deren Hilfe können sich Entscheidungsträger durch Szenariorechnungen und -analysen mit den ökonomischen und ökologischen Konsequenzen ihres Vorgehens vertraut machen. Gleichzeitig werden durch die Anwendung von Modellen bei den Nutzern ein rationales Entscheidungsverhalten und ein vernetztes Denken geschult.

Der Forstwirtschaft ermöglichen Modelle die Simulation der Waldentwicklung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Behandlungsstrategien, Standortseigenschaften und Störfaktoren. Die wichtigsten Anwendungen von Wachstumsmodellen in der Forstwirtschaft sind einerseits die strategische Waldbauplanung sowie die Fortschreibung von Inventurdaten mit managementbasierten Ertragsmodellen. Sie können dabei als eine Art dynamische Ertragstafel betrachtet werden, die eine langfristige Betrachtung der Waldentwicklung ermöglicht. Daneben gewinnen aber zunehmend auch Ökosystemanalysen mit Prozessmodellen an Bedeutung. Mit der Hilfe von Modellen können Steuerungsmassnahmen wie Durchforstung, Düngung und Baumartenmischung hinsichtlich ihrer langfristigen Auswirkungen für die Forstwirtschaft simuliert werden. Räumlich explizite Modelle ermöglichen zudem die Betrachtung der Auswirkungen von Behandlungsstrategien auf die Entwicklung der Strukturvielfalt sowie Baumartendiversität auf Ebene des Bestandes, des Betriebes oder der Region. Die Anwendung von Waldwachstumsmodellen in der Forstwirtschaft trägt somit wesentlich zur nachhaltigen Nutzung forstlicher Ressourcen, der Vitalität und Stabilität von Beständen, der Sicherung der Biodiversität und zur Erfüllung weiterer Funktionen wie Schutz und sozioökonomischem Nutzen bei.

4.5 Zukünftige Schwerpunkte in der Modellierung

Nach einer Empfehlung von Pretzsch et al. (2002b), die nach unserer Ansicht auch heute noch gültig ist, gilt es insbesondere folgende Punkte in der Modellierung zukünftig zu verbessern:

- die Simulation der Baummortalität und der Verjüngung. Die meisten Modelle verfügen in diesem Bereich immer noch über grosse Mängel.
- die Modellierung von Risikofaktoren. Über 30% der Nutzungen sind auf zufällige Ereignisse wie Sturmschäden zurückzuführen. Realistische Vorhersagen in Management-Modellen sind nur möglich, wenn Risikofaktoren berücksichtigt werden.

- das realistische Modellieren der Holzqualität. Dieses Unterfangen scheint schwierig oder zumindest aufnahmeintensiv und somit teuer zu sein.
- multi-Kriterien-Optimierung von Management-Regelungen. Solche Bestrebungen liegen gegenwärtig im Trend und werden bereits ausprobiert.
- standardisierte Entwicklung von modularisierten Programmen. Dies wird zu einer Arbeitsteilung führen und verhindern, dass überlappende Entwicklungen stattfinden. Solche standardisierten Schnittstellen garantieren Kompatibilität der entwickelten Module, deren Austauschbarkeit und Nutzung durch verschiedene Forschungseinrichtungen.
- Einteilung der Prozesse in Komponenten und zur Verfügung stellen in Bibliotheken. Dies garantiert, dass andere Forscher auf funktionierende Teile zurückgreifen können (Kronenmodelle, Standortseigenschaften, Holzernteproduktivitätsmodelle, Sortimentierung, Visualisierung, etc.).

4.6 Ergebnis der Modellsichtung

Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen aus Kapitel 4.1 bis 4.4 sowie anhand der definierten Schlüsselanforderungen und der geografischen Filterung wurden durch Literaturrecherchen und Recherchen im Internet 14 Modelle ausgewählt, die im weiteren Evaluationsprozess berücksichtigt werden. Tabelle 1 fasst diese 14 Modelle nach ihrem geografischen Ursprung zusammen. Aus der Schweiz wurden dabei alle wesentlichen Modelle berücksichtigt, insofern sie die genannten Schlüsselanforderungen erfüllten. Aus den angrenzenden Ländern wurden hingegen nur die bekanntesten Modelle in den Evaluationsprozess aufgenommen. Aus dem skandinavischen und angelsächsischen Raum wurden wiederum nur die bekanntesten und gut dokumentierten Modelle berücksichtigt.

Tabelle 1: Ausgewählte Modelle, die im weiteren Evaluationsprozess berücksichtigt werden.

Schweiz	Berücksichtigung aller wesentlichen Modelle	• FBSM (Lemm 1991, Erni and Lemm 1995) • SiWaWa (Schütz J.P. 2006, Schütz J.P. and Zingg A. 2007, Schütz J.P. 2008) • MASSIMO (Kaufmann 2001b, a) • ForClim (Bugmann 1996)
Österreich Deutschland	Berücksichtigung der bekannten Managementmodelle	• SILVA (Pretzsch et al. 2006) • PrognAus (Ledermann T. 2006) • MOSES (Hasenauer et al. 2006) • BWINPro (Nagel and Schmidt 2006) • PICUS (Lexer and Hönninger 2001, Seidl et al. 2005) •
Skandinavischer Raum	Berücksichtigung der bekannten und gut dokumentierten Managementmodelle	• STAND (Pukkala and Miina 2006) • MOTTI (Hynynen et al. 2005)
Angelsächsischer Raum		• FVS (Crookston and Dixon 2005, Crookston et al. 2010) • FORECAST (Kimmins et al. 1999, Kimmins et al. 2010) • TASS (Di Lucca 1999, Goudie et al. 2005)

5 Vorauswahl

5.1 Beschreibung der Modelle

Für den weiteren Evaluationsprozess im Rahmen der Vorauswahl werden die in der Modellsichtung gefundenen Modelle kurz beschrieben. Zusätzlich werden die Charakteristika der verschiedenen Modelle anhand der definierten Grobanforderungen tabellarisch zusammengefasst. Die gewonnenen Informationen dienen als Entscheidungsgrundlage für die im Anschluss stattfindende Bewertung und weiter Eingrenzung der Modelle.

5.1.1 FBSM

Das dynamische Forstbetriebssimulationsmodell (FBSM) wurde an der Eidg. Forschungsanstalt WSL als Simulationsmodell für Planungs- und Managementaufgaben in der Schweizer Forstwirtschaft entwickelt. Die theoretischen Grundlagen für das umfassende Modellkonzept wurden von Lemm (1991) erarbeitet. Das Modell FBSM ermöglicht Prognosen über Waldentwicklungen sowie Kosten und Erlöse unter Berücksichtigung schädigender Einflüsse. Nachgebildet werden die Entwicklungen „gesund“ und „geschädigt“ gleichförmiger Bestände von zehn verschiedenen Baumarten (Erni and Lemm 1995).

Der Kern des Systems besteht aus einem Bestandesmodell, das Durchforstungen inklusive Mortalität, Endnutzungen, Verjüngungen, Höhen- und Dickenwachstum und die Bestände standortsspezifisch, je nach Sortierungsart und Holzernteverfahren bewertet. Als Eingangsgrößen benötigt das Modell Angaben über den Zustand und die Behandlung aller Bestände sowie Informationen zur Entwicklung der Rahmenbedingungen wie Kosten, Erlöse und Umwelteinflüsse. Der Schadzustand wird erfasst, in dem die Bäume (Stammzahlprozente) je nach Schadausprägung fünf Schadstufen zugewiesen werden. Die Schadentwicklung fließt anschliessend über entsprechende Parameter in die Funktionen ein (Erni and Lemm 1995).

Anwendungsbereiche des Modells sind vielfältig, vor allem in der mittel- und langfristigen Planung im forstlichen Management. Dabei lassen sich verschiedene Handlungsalternativen überprüfen sowie Verjüngungsstrategien entwickeln und deren Auswirkungen auf die Vorrats-, Wertentwicklung und Sortimentszusammensetzung abschätzen (Lemm and Erni 1994, Erni and Lemm 1995).

Tabelle 2: Eigenschaften des Modells FBSM.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs
Höhenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs
Konkurrenz	Konkurrenzverhältnisse im Bestand werden mit dem Bestockungsgrad und der maximalen Bestockungsdichte nach Assmann berücksichtigt
Mortalität	keine eigene Mortalitätsfunktion, integriert in Durchforstung
Verjüngung / Einwuchs	Verjüngungsanteile werden vom Anwender definiert; der Einwuchs der Verjüngung erfolgt im Alter 30, ab diesem Zeitpunkt wird automatisch oder manuell eine Stammzahlverteilung generiert
Standort	Oberhöhenbonität im Alter 50
Altersabhängigkeit	altersabhängig
Behandlungsarten	Teilmodell Handlungen bildet Aktivitäten wie Bestandesbegründungen, Durchforstungen (Hoch-, Nieder- und Gleichmässige-Df.) und Räumungen ab

Störungen	Möglichkeit zur Simulation eines gesunden oder eines geschädigten Bestandes; die Schadensdynamik wird im Modul Schädigung nachvollzogen und erfolgt in Schadstufen (Stammzahlprozente je Schadstufe)
Wirkungen / Leistungen	Sortimentsbildung nach schweizerischen Holzhandelsgebräuchen; Berechnung der Holzerntekosten; monetäre Bewertung der Bestandesentwicklung (betriebswirtschaftlicher Wert des Waldes)
Baumarten	10 Baumarten, u.a. Fichte, Buche, Tanne, Lärche
Waldtypen	gleichaltrige Reinbestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	-
Datenbasis	Ertrags tafeln aus der Schweiz, Deutschland und Österreich

5.1.2 SiWaWa

SiWaWa ist ein funktionell-deterministisches Bestandesmodell für gleichaltrige Fichten-, Buchen- und Eschenreinbestände. Das Modell geht in seinem Grundprinzip davon aus, dass die Bestockungsdichte der entscheidende Einflussfaktor auf die Waldentwicklung darstellt und Bestände ausgehend allein von den Eingangsgrößen Stammzahl und Grundfläche charakterisiert werden können. Eine Höhenbonität wird lediglich als Ergänzung betrachtet. Das Modell besteht aus drei Teilmodellen: einem Strukturmodell basierend auf der Bestimmung der Stammzahlverteilung mittels Weibullfunktion, einem Zuwachsmo d e l l basierend auf der Beschreibung des Durchmesserzuwachses nach der sozialen Hierarchie und einem Modell, welches die Grundlagen für die Bestimmung der waldbaulichen Durchforstungseingriffe vermittelt. Die drei Teilmodelle werden durch interne Funktionen, wie die maximale Bestockungsdichte nach Reineke (1933), beziehungsweise die normale Grundflächenhaltung als Zielgrösse der Behandlung, ergänzt (Schütz J.P. and Zingg A. 2007).

Im Vordergrund von SiWaWa steht der Ansatz, die Bestandesstruktur über die Grundfläche zu beschreiben, da sie gleichzeitig Bestandesdichte- und Entwicklungseigenschaften verbindet. Sie wird als bonitätsfrei betrachtet und wird als Alternative zum klassischen Weg über die altersabhängige Höhenbonität gesehen, um Bestände zu beschreiben. Gleichzeitig ist die Grundfläche eine Grösse, die sehr einfach in der Praxis zu erheben ist. Die Abbildung der Struktur von Beständen erfolgt mit der Beschreibung der Stammzahlverteilung. Diese soll zukünftig auch die Grundlage für den Einbau weiterer Modellkomponenten bilden, wie z.B. für die Berechnung des Holzanfalls, der Sortimente, der Wertleistung und weiterer Grössen. (Schütz J.P. 2006)

Für eine detaillierte Beschreibung von SiWaWa siehe: Schütz J.P. (2006); Schütz J.P. and Zingg A. (2007), Schütz J.P. (2008), (Schütz J.P. and Zingg A. 2010).

Tabelle 3: Eigenschaften des Modells SiWaWa

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs
Höhenwachstum	-
Konkurrenz	Indikator Gcum in Zuwachsfunktion (Grundflächensumme der Bäume die dicker als die betrachtete Stufe sind)
Mortalität	maximale Bestockungsdichte nach Reineke
Verjüngung / Einwuchs	-
Standort	Schätzung von N und G im Rahmen einer Stichprobe; ergänzt durch altersabhängige Oberhöhenbonität
Altersabhängigkeit	altersabhängig

Behandlungsarten	klassische Hochdurchforstung; manueller Eingriff in % je Grundfläche für eine bestimmte Altersstufe
Störungen	Dendro-Index, für kurzfristige periodische Variationen im Radialzuwachs (Witterung)
Wirkungen / Leistungen	-
Baumarten	Fichte, Buche, Esche
Waldtypen	gleichaltrige Reinbestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Bestandesmodell
Klimasensitivität	-
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen der WSL; Jahrringauswertungen (Dendro-Index);

5.1.3 MASSIMO

Das Management-Szenario-Simulations-Modell (MASSIMO) ist ein empirisches, einzelbaumbasiertes, stochastisches und dynamisches Wachstumsmodell (Kaufmann 2001a, b), das ebenfalls an der Eidg. Forschungsanstalt WSL entwickelt wurde. MASSIMO dient in erster Linie zur Auswertung der Daten des Landesforstinventars (LFI) sowie zur Entwicklung zukünftiger Prognosen über die Waldentwicklung in der Schweiz. Das Modell besteht aus den vier Teilmodellen Wachstum, Mortalität, Verjüngung und Management Szenarien (einschliesslich der Holzernte). Die meisten Modellkomponenten enthalten statistische Funktionen, die auf Grundlage der Daten der LFI-Probeflächen hergeleitet wurden. Das Modell ist in der aktuellen Version nicht in der Lage den Einfluss des Klimawandels zu berücksichtigen (Thürig and Kaufmann 2010).

Der Kern des Modells bildet die empirische Wachstumsfunktion. Darin wird der Zuwachs auf Basis des Einzelbaums geschätzt. Als Einflussgrössen berücksichtigt das Modell die Baumart, den BHD, die Produktionsregion (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen, Alpensüdseite), die Standortsgüte, die Höhe über dem Meer, die Grundfläche des Bestandes, das Bestandesalter (bzw. bei ungleichaltrigen Beständen den Oberdurchmesser – mittlere BHD der 100 dicksten Bäume), einen Konkurrenzfaktor, die Schichtzugehörigkeit des Baumes und dessen Wachstumsreaktionen auf einen Durchforstungseingriff (Kaufmann 2011). Die in MASSIMO implementierte Wachstumsfunktion ist in Thürig et al. (2005) beschrieben.

Eingriffe in den Wald erfolgen im MASSIMO anhand klar definierter, ertragskundlich begründeter Kriterien. Diese wurden in Zusammenarbeit mit Experten aus der Praxis erarbeitet, die eine grosse Erfahrung in waldbaulichen Tätigkeiten haben. MASSIMO unterscheidet zwischen Eingriffen im Dauerwald und im gleichförmigen Hochwald. Durchforstungen werden anhand der in der Schweiz gängigen Auslesedurchforstung simuliert (Kaufmann 2011).

Daneben ermöglicht MASSIMO auch eine Schätzung des Kohlenstoffspeichers der oberirdischen sowie unterirdischen Biomasse. Die Berechnung der Biomasse erfolgt dabei ebenfalls anhand der LFI-Daten für die Kompartimente Stammholz, Rinde, Reisig, Äste und Wurzeln. Zur Abbildung der Kohlenstoffkreisläufe im Boden wird ergänzend das Boden-Kohlenstoff-Modell YASSO von Liski et al. (2005) verwendet (Schmid et al. 2006a, Thürig and Kaufmann 2010).

Tabelle 4: Eigenschaften des Modells MASSIMO.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialabhängiger Zuwachs
Höhenwachstum	Die Simulation des stehenden Holzvolumens und des Zuwachs erfolgt anhand von Volumenfunktionen in Abhängigkeit einer Variabel (z.B. BHD); die Eingangsgrösse d7 und H werden über Tariffunktion geschätzt
Konkurrenz	Konkurrenz wird ausgedrückt durch die Grundfläche aller Bäume auf der Probefläche, die einen grösseren BHD als der betrachtete Einzelbaum haben
Mortalität	dichteabhängige Mortalität basierend auf empirischen Daten des LFI und langfristigen Versuchsflächen der Schweiz
Verjüngung / Einwuchs	automatische Verjüngung über zufällig ausgewählte Jungwalddaten eines vergleichbaren Standortes, Baumartenanteile können definiert werden; Einwuchs ist definiert ab einem BHD von 12cm
Standort	wird abgebildet über Produktionsregion, Standortsgüte (Gesamtwuchsleistung), Höhe über Meer
Altersabhängigkeit	bei gleichaltrigen Beständen wird als Eingangsgrösse das Bestandesalter verwendet, bei ungleichaltrigen Beständen arbeitet das Modell mit dem Oberdurchmesser, d.h. den mittleren BHD der 100 dicksten Bäume
Behandlungsarten	es wird zwischen Eingriffen im Dauerwald und gleichförmigen Hochwald unterschieden; mögliche Behandlungsarten sind: Durchforstungen (Auslesedurchforstung mit definierter Eingriffsstärke in % je Grundfläche), Kahlschlag, keine Nutzung, zufällige Nutzung
Störungen	-
Wirkungen / Leistungen	Berechnung des Kohlenstoffspeichers der oberirdischen und unterirdischen (in Kombination mit dem Boden-Kohlenstoff-Modell YASSO) Biomasse
Baumarten	11 Baumarten
Waldtypen	gleich- und ungleichaltrige homogene und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	-
Datenbasis	Schweizerisches Landesforstinventar (LFI)

5.1.4 ForClim

ForClim ist ein Gap Modell, das an der ETH Zürich am Lehrstuhl für Forest Ecology entwickelt wurde. Das Modell simuliert die Walddynamik auf unabhängigen kleinen „patches“ von Land, mit einer Grösse von 1/12 ha (ca. 833 m²) und ist derzeit für 31 Baumarten in Europa parametrisiert. ForClim wurde mit dem Grundgedanken entwickelt, so wenige Parameter wie möglich zu verwenden und mit der geringsten Menge an ökologischen Annahmen zu arbeiten. Die Entwicklung des Einzelbaumes wird in erster Linie durch Lichtverfügbarkeit und klimatische Parameter bestimmt, neben diesen werden zur Charakterisierung der Standortseigenschaften lediglich die Stickstoffverfügbarkeit, die Wasserhaltekapazität des Bodens sowie die Hangneigung und Hangrichtung als Eingangsgrössen verwendet (Bugmann 1996).

Die Teilmodelle WEATHER und WATER berechnen auf Basis langfristiger Wetterdaten und der Wasserhaltekapazität des Bodens die Werte für die Bodenfeuchte sowie die minimale Wintertemperatur und Temperatur der Vegetationsperiode. Die Werte beziehen sich auf eine um die Klimaparameter gezeichnete Wahrscheinlichkeitsverteilung, die aus der Standardabweichung der berechneten Zeit-

reihen abgeleitet wird. Diese Herleitung wird für jeden patch separat durchgeführt (Rasche et al. 2011).

Das Teilmodell PLANT simuliert die Verjüngung, das Wachstum und Mortalität von einzelnen Baumkohorten. Die entsprechenden Verjüngungsraten werden über die Lichtverfügbarkeit am Waldboden, Temperatur der Vegetationsperiode, Bodenfeuchte, minimale Wintertemperatur und den Druck durch Wildverbiss bestimmt. Das Wachstum selbst wird basierend auf dem Kohlenstoff-Budget Ansatz von Moore (1989) modelliert, modifiziert durch Risch et al. (2005) und Didion et al. (2009). Bei diesem Ansatz wird die optimale Wachstumsrate einer Art reduziert, basierend auf dem Grad, in welchem die Umweltfaktoren (Stickstoffverfügbarkeit, Vegetationsperiode und Bodenfeuchte) und die Kronengröße suboptimal sind. Die Mortalität wird als eine Kombination aus einer alters- und stressbedingten Komponente modelliert.

Für die Simulation von waldbaulichen Behandlungen und Verjüngungen kann das Teilmodell MANAGEMENT aktiviert werden. Dieses umfasst die Methoden Durchforstung, Kahlschlag, Saumschlag, Zielstärkennutzung, Femelschlag, Schirmschlag, Plenterung und Pflanzung (Rasche et al. 2012).

Für eine detaillierte Beschreibung von ForClim siehe: Bugmann (1996), Bugmann and Solomon (2000), Risch et al. (2005), Didion et al. (2009), Rasche et al. (2011).

Tabelle 5: Eigenschaften des Modells ForClim.

Modelltyp	Gap-Modell
Dickenwachstum	potentialabhängiges Wachstum; nach einem modifizierten Kohlenstoff-Budget-Ansatz nach Moore
Höhenwachstum	
Konkurrenz	über die Variablen Lichtverfügbarkeit, Temperatur, Bodenfeuchte und Stickstoffverfügbarkeit
Mortalität	jährlich konstante Sterberate (negative exponentielle Kurve); stress-induzierte Sterblichkeit (abhängig vom Durchmesser)
Verjüngung / Einwuchs	baumartenspezifische Verjüngungswahrscheinlichkeit, abhängig von minimaler Wintertemperatur, Lichtverfügbarkeit, Wildverbiss, Temperatur der Vegetationsperiode
Standort	Beschreibung des Standorts erfolgt über Bodenfeuchte, Temperatur, Hangneigung/Hangrichtung; Teilmodell Boden simuliert den Zerfall der Streu und des Humus im Boden in Abhängigkeit von bioklimatischen Variablen und berechnet den pflanzenverfügbaren Stickstoff
Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
Behandlungsarten	Teilmodell MANAGEMENT: bildet Durchforstung, Kahlschlag, Saumschlag, Zielstärkennutzung, Femelschlag, Schirmschlag, Plenterung und Pflanzung ab
Störungen	Trockenstress
Wirkungen / Leistungen	Bewertung des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden
Baumarten	31 europäische Baumarten
Waldtypen	Anwendung für alle Waldtypen möglich
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell; der Einzelbaum wird als Repräsentant einer Durchmesserklasse (Kohorte) modelliert; Aussageeinheit ist der Bestand

Klimasensitivität	Teilmodell WEATHER/WATER liefert Wetterdaten basierend auf langfristigen klimatischen Daten und berechnet daraus bioklimatische Eingabedaten, welche im Wachstumsmodell und dem Standortmodell verwendet werden
Datenbasis	Parametrisierung erfolgt anhand autoökologischer Literatur und pflanzensoziologischer Kenntnisse (nicht anhand von Wuchsdaten aus Versuchsflächen)

5.1.5 SILVA

Das Modell SILVA ist ein einzelbaumbasiertes und positionsabhängiges Waldwachstumsmodell. Es wurde als ein Werkzeug für Praxis, Forschung und Ausbildung am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München entwickelt. Der Kern des Modells besteht aus einem Algorithmus, der die dreidimensionale Struktur von Waldbeständen bewertet, um die Konkurrenzsituation zwischen den Bäumen bestimmen zu können. Die Betrachtung des Bestandes als ein dreidimensionales System von Bäumen, die sich gegenseitig beeinflussen, ermöglicht die Simulation der Entwicklung von strukturreichen, ungleichaltrigen und gemischten Beständen. Hierfür wurde das Modell anhand einer grossen Menge von Daten aus langfristigen Versuchsflächen aus Rein- und Mischbeständen, vor allem aus Süddeutschland, parametrisiert (Pretzsch et al. 2006).

SILVA umfasst Teilmodelle für die Verjüngung für die Durchführung und Visualisierung von großen regionalen Szenarioanalysen, basierend auf Inventurdaten. Eine Inventurschnittstelle dient zur Eingabe von Informationen aus dem praktischen Forstbetrieb. Zusätzlich zur Schnittstelle umfasst das Modell Routinen zur Ergänzung von unvollständigen Bestandesinformationen, die der Praxis nicht als Eingangsgrößen zur Verfügung stehen oder nur schwer zu erheben sind (z.B. Ableitung von Umweltvariablen aus spärlichen Standortinformationen oder Erzeugung von fehlenden Einzelbauminformationen). Weiterhin umfasst das Modell Routinen für die Sortimentierung des Holzes, die Berechnung der Holzerntekosten und der Umsatzrendite. Ein zentrales Einsatzgebiet von SILVA ist daher die operative und strategische Planung in der Waldbewirtschaftung (Pretzsch et al. 2006).

Zusätzlich wurde SILVA um ein Biomasse-Modell erweitert, das durch allometrische Funktionen Biomasse-Schätzungen für die einzelnen Baumkompartimente Stamm, Wurzel, Rinde, Äste sowie Blätter ermöglicht und dadurch einen Rückschluss auf den Kohlenstoffhaushalt erlaubt. Dieses basiert auf dem physiologischen Prozessmodell BALANCE (Grote and Pretzsch 2002, Rötzer et al. 2009). BALANCE modelliert das Wachstum und die Allokation der Biomasse in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Licht, Nährstoffen und Wasser (Köhl et al. 2010).

Eine mögliche Anwendbarkeit von SILVA für die gängigen Waldtypen in der Schweiz in den kollinen bis subalpinen Höhenlagen wurde von Schmid et al. (2006b) untersucht. Die Schlussfolgerung der Untersuchung ist, dass SILVA ein geeignetes Instrument wäre, um die Entwicklung von einzelnen Bäumen und dem stehenden Volumen für einen großen Teil der Wälder in der Schweiz zu schätzen. Allerdings sollten extreme klimatische Bedingungen, wie sie im subalpinen Bereich vorherrschen, mit dem Modell vermieden werden.

Für eine detaillierte Beschreibung von SILVA siehe: Pretzsch (2001), Pretzsch et al. (2002a), (Pretzsch et al. 2006).

Tabelle 6: Eigenschaften des Modells SILVA.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialabhängiges Wachstum
Höhenwachstum	potenzialabhängiges Wachstum
Konkurrenz	Konkurrenz wird über drei Masszahlen quantifiziert: der Wert KKL beschreibt die soziale Stellung und Grösse des zu beurteilenden Baumes zu seinen Nachbarn mittels der Lichtkegelmethode; Variable NDIST quantifiziert die Symmetrie bzw. Assymetrie der räumlichen Konkurrenzeinwirkungen; Masszahl KMA beschreibt die Baumartenmischung im Umfeld des zu bewertenden Baumes
Mortalität	LOGIT Funktion; in Abhängigkeit vom Durchmesser und des erwarteten Grundflächenzuwachses wird die Überlebenswahrscheinlichkeit des Baumes bestimmt
Verjüngung / Einwuchs	Teilmodul Verjüngung
Standort	Baumartspezifische unimodale Dosis-Wirkungsfunktionen aggregieren Umweltinformationen (z.B. mittlere Temperatur und Niederschlag, CO ₂ Konzentrationen als Langzeitmittelwerte) in ökologisch signifikante Standortvariablen;
Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
Behandlungsarten	Auslesedurchforstung, Z-Baum Durchforstung, Zielstärkennutzung, Nieder- und Hochdurchforstung, keine Behandlung und Kombination dieser Konzepte
Störungen	-
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertungen, auf Basis von Sortimentierung und Berechnung von Holzerntekosten; ökologische Bewertungen (Habitateignung, Erholungsfunktion, Biodiversität), auf Basis verschiedener Strukturindizes; Abbildung des Kohlenstoffhaushalts
Baumarten	Fichte, Tanne, Föhre, Buche und Eiche
Waldtypen	gleich- und ungleichaltrige homogene und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzabhängiges Einzelbaummodell; der Bestand wird als ein dreidimensionales System von Einzelbäumen betrachtet, die sich gegenseitig beeinflussen
Klimasensitivität	Simulation von Reaktionen auf veränderte Umweltbedingungen sind im Rahmen des durch die empirische Datenbasis vorgegebenen Umfangs möglich
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen aus Bayern, Niedersachsen und der Schweiz

5.1.6 PrognAus

Das Modell PrognAus aus Österreich (Prognosis for Austria) ist ein Ableger des Forest Vegetation Simulators (FVS, Kap. 5.1.12), dessen Prototyp das StandPrognosis Modell darstellt. Bei PrognAus handelt es sich um ein distanzunabhängiges Einzelbaummodell (Neumann 2010). Das Modell ist besonders geeignet für die Fortschreibung von relativ kleinen Probeflächen bei Stichprobeninventuren. Dadurch können Szenariosimulationen nicht nur auf regionaler oder nationaler Ebene durchgeführt werden, sondern auch auf Bestandesebene und Ebene des Betriebes (Ledermann 2004).

Die implementierten Teilmodelle zur direkten Berechnung von Grundflächenzuwachs (Monserud and Sterba 1996) und Höhenzuwachs (Nachtmann 2006), Kronenprozent und Mortalitätswahrscheinlichkeit (Monserud and Sterba 1999) für den Einzelbaum, sowie Einwuchswahrscheinlichkeit (Ledermann 2002) wurden anhand der Daten der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) für einen fünfjährigen

Simulationsschritt und für Bäume ab 5 cm BHD parametrisiert. Die Eingangsgrößen für das Modell sind daher einerseits die Einzelbaumparameter Baumart, BHD und Baumhöhe sowie die in der ÖWI verwendeten Standortparameter Seehöhe, Hangneigung, Exposition, Relief, Bodengründigkeit, Humusmächtigkeit, Bodentyp, Bodenfeuchte, Vegetationstyp und Wuchsraum. Weiter wurden Teilmodelle zur Simulation von Ernteeingriffen und zur Vorhersage von Stärke- und Güteklassenverteilung und ein Modell zur Vorhersage von Stammschäden implementiert (Ledermann T. 2006, Neumann 2010).

Als Outputgrößen liefert PROGNAUS grundsätzlich die Einzelbaumparameter BHD, Höhe und Kronenprozent, jeweils für den verbleibenden und den ausscheidenden Bestand in fünfjährigen Intervallen. Ausgehend von diesen Größen werden schliesslich baumartenweise ertragskundliche Bestandesparameter wie z. B. der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, verschiedene Mittel- und Oberhöhen, die Stammzahl, Kreisfläche und über die Verwendung von Volumenfunktionen, auch das Holzvolumen berechnet (Ledermann T. 2006, Neumann 2010).

Die in PROGNAUS implementierten Wachstumsmodelle wurden neuerdings zu einer klimasensitiven Variante weiterentwickelt. Diese Änderungen erlauben es, dass mithilfe von jährlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten veränderte Klimaszenarien abgebildet werden können (Gschwantner et al. 2010, Kindermann 2010).

Tabelle 7: Eigenschaften des Modells PrognAus.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs, Grundflächenzuwachsmodell
Höhenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs, nach dem Evolon-Modelltyp
Konkurrenz	Kronenkonkurrenzfaktor CCF gibt das Verhältnis zwischen der Kronenschirmflächensumme aller n Bäume eines Bestandes und seiner Flächengröße A in Prozent an; relatives Mass für den durchschnittlichen Konkurrenzdruck im Kronenraum
Mortalität	Teilmodell für Einzelbaummortalität
Verjüngung / Einwuchs	Bestimmung des Einwuchses umfasst folgende fünf Teilmodelle: Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Einwuchs, Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Baumart, dessen Anzahl sowie Durchmesser und Höhe der Bäume
Standort	Standort wird über die Faktoren Seehöhe, Hangneigung, Exposition, Relief, Bodengründigkeit, Humusmächtigkeit, Bodentyp, Bodenfeuchte, Vegetationstyp und Wuchsraum beschrieben
Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
Behandlungsarten	prozentuale Entnahme aus definierten BHD-Klassen, Zielstärkennutzung, Gleichgewichtskurve, LOGIT-Modell für Baumentnahme, definierte Anzahl an Bäumen
Störungen	Schneebruchmodell
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Sortimentierung inkl. Einteilung in Klassen ABC, Berechnung der Holzerntekosten und des Deckungsbeitrages
Baumarten	alle gängigen österreichischen Baumarten
Waldtypen	gleich- und ungleichaltrige homogene und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell; es lassen sich Vorhersagen über Bestände und Waldinventuren machen

Klimasensitivität	das Grundflächenzuwachsmmodell und Höhenzuwachsmmodell sind klimasensitiv
Datenbasis	Österreichische Waldinventur; die Gültigkeit des Modells erstreckt sich auf die gesamte bewaldete Fläche Österreichs

5.1.7 MOSES

Das Wachstumsmodell MOSES (*MO*deling *St*and *r*ESponse) ist ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell, das auf dem Potenzialkonzept aufbaut. Es wurde am Institut für Waldwachstumsforschung der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt (Hasenauer 2000, Hasenauer et al. 2006). MOSES besteht aus einer Durchmesser- und Höhenzuwachsbeziehung, einer Mortalitätsgleichung sowie Algorithmen zur Abschätzung des Einwuchses bzw. des Ankommens und Wachstums von Verjüngung. Zusätzlich sind Teilmodelle für die Beschreibung der Konkurrenz eines Baumes im Bestand notwendig. Der Prognosezeitraum ist üblicherweise eine Fünfjahresperiode, die beliebig oft wiederholt werden kann (Hallenbarter et al. 2005).

Das Modell beruht auf folgenden Überlegungen: 1. Bestimmung der Zuwachspotenziale, 2. Berechnung der Konkurrenzindizes und 3. Schätzung der Koeffizienten für die baumartenspezifischen Verjüngungs-, Wachstums- und Mortalitätsfunktionen (Hallenbarter et al. 2005, Klopff et al. 2011).

Ein wichtiger Teil von MOSES ist das Programm zur Bestandesgenerierung STANDGEN. Dieses Teilmodell wurde zur Erzeugung von Bestandessituationen für die Szenarioanalysen und für das Erzeugen fehlender x und y Koordinaten der Bäume entwickelt. In Kombination mit dem Bestandesgenerator STANDGEN ist das Model speziell für die Simulation von Beständen geeignet (Hasenauer et al. 2006).

Das Model basiert auf Daten langfristiger Versuchsflächen aus Österreich und der Schweiz, welche zusammen mehr als 78'000 5-Jahresperioden von ungleichaltrigen und gemischten Beständen umfassen. Das Model deckt neun Baumarten ab (Buche, Eiche, Sonst. Laubholz, Fichte, Föhre, Tanne, Zirbe, Lärche, sonst. Nadelholz). Als eine zusätzliche Baumart wurde Quercus frainetto für Griechenland beigelegt (Hasenauer et al. 2006).

Im Rahmen einer Neuparametrisierung von MOSES wurden auch Daten von langfristigen Versuchsflächen aus der Schweiz herangezogen. Eine anschliessende Überprüfung des Modells durch Hallenbarter et al. (2005) hat gezeigt, dass MOSES das Baumwachstum verschiedenster Waldbestände in der Schweiz hinreichend genau nachbilden kann. Systematische Abweichungen in den Durchmesser- und Höhenzuwachsschätzungen waren keine feststellbar.

Tabelle 8: Eigenschaften des Modells MOSES.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialabhängiger Zuwachs, basierend auf BHD-Höhen-Beziehungen von Solitärbäumen
Höhenwachstum	potenzialabhängiger Zuwachs, mit Hilfe von Oberhöhenkurven ermittelt
Konkurrenz	Konkurrenzindex CI, ergibt sich aus der Kronenüberlappungsfläche eines zu beurteilenden Baumes mit seinen Nachbarn
Mortalität	LOGIT-Funktion; in Abhängigkeit von CI, Kronenverhältnis CR und BHD wird die Absterbewahrscheinlichkeit bestimmt
Verjüngung / Einwuchs	Teilmodell Verjüngung; für alle Bäume kleiner als 1,4 m; Algorithmus prognostiziert Artzusammensetzung und Dichte der Verjüngung
Standort	Regionale site-index, Oberhöhenbonitäten im Alter 100

Altersabhängigkeit	altersabhängig
Behandlungsarten	Zielstärkennutzung, Durchforstungen, Freistellungen und Pflanzungen
Störungen	Windwurf und Schneebruch; Einschätzung anhand der h/d-Verhältnisse
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Sortimentierung, Berechnung der Holzerntekosten für drei Systeme (Motorsäge – Schlepper, Harvester - Forwarder, Motorsäge – Seilgerät), Erlösberechnungen ökologische Bewertung: Schätzung von Biomassefraktionen
Baumarten	Buche, Eiche, Sonst. Laubholz, Fichte, Föhre, Tanne, Zirbe, Lärche, sonst. Nadelholz
Waldtypen	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	nein
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen aus Österreich und der Schweiz

5.1.8 BWINPro

Das empirische Einzelbaummodell BWINPro wurde an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt entwickelt. Die Beschreibung der Entwicklung des Bestandes anhand von Einzelbäumen ermöglicht es, nahezu jede Bestandesstruktur und –Zusammensetzung zu simulieren. Das Baumwachstum wird auf den BHD- und Höhenzuwachs reduziert. Die Funktionen zur Zuwachsschätzung wurden mit langfristigen Versuchsflächendaten baumartenweise parametrisiert. Als Zuwachs beeinflussende Größen werden das Alter, die Kronenmantelfläche, der Kronenkonkurrenzindex und dessen Veränderung bei Durchforstungen verwendet. Über den spezifischen Standraumbedarf der Baumarten, der sich hauptsächlich aus der Kronengröße ergibt, werden die Mischbestandseffekte im Modell realisiert. Die Kronengröße wird im Modell aus der Höhe, dem Kronenansatz und der Kronenbreite für einen unterstellten Paraboliden berechnet, wobei die für die Kronenmantelfläche und den Kronenkonkurrenzindex notwendigen Kroneninformationen über statische Funktionen aus dem BHD, der Höhe und der Bestandesoberhöhe geschätzt werden (Nagel 2009).

Eine weitere wichtige Funktion des Wachstumsmodells ist die dichtebedingte Mortalität. Ob ein Baum im Modell stirbt, wird über den minimalen Standraumbedarf der Art definiert. Seit der Version 7.5 wird der minimale Standraumbedarf mit Funktionen zur maximalen Dichteschätzung in Verbindung mit der Funktion zur Berechnung der Veränderung in der Kronenbreite bestimmt. Neben diesen grundlegenden Funktionen des Waldwachstumssimulators umfasst BWINPro eine Vielzahl weiterer Funktionen zur Unterstützung des forstlichen Managements (Nagel 2003, 2009).

Das Wachstumsmodell BWINPro wurde mittlerweile in die Programmiersprache Java überführt und wird unter dem Namen TreeGroSS als „open source“ frei über das Internet zur Verfügung gestellt. Mit der Simulationssoftware TreeGroSS wurden von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt verschiedene Anwendungen realisiert, wie (Nagel 2009):

- Forest Simulator: zur Simulation und Analyse von einzelnen Beständen
- WaldPlaner: zur Simulation, Analyse und Optimierung im Forstbetrieb
- ForstbetriebsPlaner: als dynamisches Waldlagerbuch in einer Web-Applikation
- VIS das Versuchsflächeninformationssystem zur Standardauswertung von Versuchsflächen.

Darüber hinaus wurde die Simulationssoftware auch in Projekten zur grossräumigen Simulation von Waldbeständen auf Landesebene eingesetzt.

Für zusätzliche Informationen zu BWINPro siehe (Nagel 1999, Nagel and Schmidt 2006).

Tabelle 9: Eigenschaften des Modells BWINPro.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs
Höhenwachstum	potenzialabhängiger Zuwachs
Konkurrenz	distanzunabhängiger Kronen-Konkurrenz-Index c66; für einen konkreten Baum wird anhand des Kronenschlussgrades in 2/3 (66%) seiner Kronenhöhe von oben die Konkurrenzsituation berechnet
Mortalität	alters- und dichtebedingte Mortalität; die dichtebedingte Mortalität kann auf zwei Arten ermittelt werden (Nagel 2009): 1) bei ausreichender Datengrundlage (von un- oder schwachdurchforstete Beständen) wird für verschiedenen Baumarten und Regionen eine maximale Bestandesdichte nach der erweiterten Competition-Density-Rule von Sterba (1981) berechnet. 2) bei ungenügender Datengrundlage wird die maximale Bestandesdichte grob geschätzt; dazu wird der maximale Kronenschlussgrad mit Hilfe des C66 bestimmt und anschliessend mit der Funktion zur Kronenbreite bei den beobachteten Durchmesser in die maximale Grundfläche umgerechnet.
Verjüngung / Einwuchs	Submodell Verjüngung; legt fest ob und wie viel von welcher Baumart sich als Verjüngung einstellt und wie viel davon in Einwuchs (BHD > 7 cm) übergeht
Standort	Oberhöhenbonität im Alter 100
Altersabhängigkeit	altersabhängig
Behandlungsarten	Z-Baum-Auswahl, Zielstärkennutzung, verschiedene Durchforstungen, Pflanzung
Störungen	-
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Sortimentierung und Abschätzung der Holzqualitäten
Baumarten	19 Baumarten
Waldtypen	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	fehlt zur Zeit
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt

5.1.9 PICUS

PICUS 1.4 ist ein populationsdynamisches Modell, das aus dem Kern eines „Gap Modells“ entwickelt wurde. Das Modell wurde am Institut für Waldbau der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt. Die Betrachtung des Ökosystems Wald erfolgt als eine Aneinanderreihung von gleich großen Flächen („patch“), die eine räumliche Auflösung von 10 m x 10 m aufweisen. Diese werden durch einen 5 m Kronenabschnitte in die dritte Dimension erweitert. Auf der Ebene dieser dreidimensionalen Räume simuliert das Modell die Prozesse „Verjüngung“, „Wachstum“ und „Mortalität“. Die eigentliche Aufgabe von PICUS ist die Beschreibung von Sukzessionsprozessen im Ökosystem Wald (Lexer and Hönninger 2001).

Mit der Version PICUS 1.4.1 liegt durch die Berücksichtigung der räumlichen Konkurrenz innerhalb der patches (auf der Ebene des Einzelbaumes) und der räumlichen Konkurrenz zwischen den patches eine Weiterentwicklung des ursprünglichen Ansatzes vor. Zusätzlich wurde das Modell PICUS in der Version 1.4.1 durch die Einbindung von Prozessformulierungen auf Einzelbaum- und Bestandesebene

um einen Hybridansatz erweitert (Seidl et al. 2005). Im Hybridansatz von PICUS werden mittels des generalisierten Prozessmodells 3-PG-Modell von Landsberg and Waring (1997) baumindividuell aggregierte Werte für Bestandesblattfläche und Strahlungsabsorption zur Berechnung der Netto-Primär-Produktion an Biomasse herangezogen. Während dabei der Boden-pH-Wert und die Bodenfeuchte zeitlich konstant angenommen werden, können durch die Hinzunahme eines dynamischen Bodenmodells (TRACE-Modell) gleichzeitig Rückkoppelungen im Kohlenstoff und Stickstoffkreislauf simuliert werden (Currie et al. 1999). Ein Borkenkäfer-Störungsmodell ermöglicht zudem die Simulation biotischer Störungen (Seidl et al. 2007). Mit Hilfe eines Managementmodells können weiterhin einzelbaum-basierte und räumlich explizite Simulationen von forstwirtschaftlichen Eingriffen durchgeführt werden (Neumann 2010).

Tabelle 10: Eigenschaften des Modells PICUS.

Modelltyp	Gap-Modell / Hybrid mit Prozessmodell 3-PG
Dickenwachstum	Hybrid: Unterteilung in Bottom-up und Top-Down Ansatz; <u>Bottom-up (Gap-Modell)</u> : potenzialabhängige Schätzung des Höhenwachstums, BHD wird über Durchmesser-Höhenbeziehung abgeleitet, Anschliessend wird die oberirdische Biomasse geschätzt; <u>Top-Down (3-PG)</u> : Schätzung der Nettoprimärproduktion NPP in Abhängigkeit von Strahlung, Bodenfeuchtigkeit, Temperatur und Nährstoffversorgung; Anschliessend wird ebenfalls die oberirdische Biomasse geschätzt; <u>Ausgleich</u> : Differenz der Biomassen aus den beiden Schätzung wird anteilmässig auf jeden Einzelbaum verteilt
Höhenwachstum	
Konkurrenz	für die Abbildung der Konkurrenz zwischen den Bäumen wird ein distanzunabhängiger Algorithmus verwendet
Mortalität	<u>Intrinsische Mortalität</u> : bildet die rein zufällige Mortalität ab; <u>Stressmortalität</u> : bewirkt ein Absterben von Individuen, welche die über einen längeren Zeitraum definierten Zuwächse nicht erreichen; <u>„zusätzliche“ Mortalität</u> : aus modellinternen Gründen, wenn ein Baum aufgrund von Lichtmangel keine Blätter mehr aufweist
Verjüngung / Einwuchs	Teilmodell Verjüngung (< 1 cm BHD; 1 Pflanze pro m ²); modelliert Samenproduktion als Funktion unter Berücksichtigung der Mannbarkeit, die räumlich explizite Samenverbreitung als Funktion der Baumhöhe, die Keimung in Abhängigkeit von Frost, Licht, Temperatur, Bodenfeuchte und Stickstoff sowie das Wachstum der Bäume < 1,3m in Abhängigkeit von Licht, Temperatur und Stickstoff
Standort	Bodenmodell: prozessorientiertes Modell für die Abbildung des Kohlen- und Stickstoffkreislaufs in der Auflage und dem Mineralboden
Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
Behandlungsarten	Managementmodell ist einzelbaumbasiert, räumlich explizit und wird über Bestandes- und Baummerkmale gesteuert (Eingriffsstärke, betroffene patches, entnommene Individuen)
Störungen	Steinschlagmodell zur Abbildung des Einflusses von waldbaulichen Massnahmen auf die Schutzwirkung; Borkenkäfer-Störungsmodell
Wirkungen / Leistungen	<u>TRACE Modell</u> : Abbildung des Kohlen- und Stickstoffkreislaufs im Boden; <u>Wood-Products-Model (WPM)</u> : Bewertung des Kohlstoffflusses in verschiedenen Holzlebenszyklen, angefangen von der Holzernte über den Produktionsprozess, Speicherung im Produkt und Freisetzung in die Atmosphäre

Baumarten	28 Baumarten
Waldtypen	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	Basiselement sind patches mit einer Auflösung von 10m x 10m und 5m Höhe, bis zu einer Höhe von 60m; strukturelle Auflösung dieser Simulationseinheit ist der Einzelbaum
Klimasensitivität	Hybridmodell bietet einen Ansatz um Klimasensitivität realistisch abzubilden
Datenbasis	vornehmlich Werte aus der Literatur

5.1.10 STAND

Das Einzelbaummodell STAND ist ein managementbasiertes Ertragsmodell aus Finnland. STAND dient vor allem der Analyse von Auswirkungen verschiedener waldbaulicher Behandlungen auf einen Bestand bei wechselnden Bewirtschaftungsstrategien. Im Sinne eines Systems zur Entscheidungsunterstützung im forstlichen Management lassen sich somit Leitlinien für eine optimale Waldbewirtschaftung ableiten. Diese Leitlinien werden durch die Kombination eines Simulationsmodells und einer numerischen Optimierung festgelegt. Das Simulationsmodell stellt dabei die Verknüpfung zwischen waldbaulichen Behandlungen und den vom Wald produzierten Ergebnissen dar. Die numerische Optimierung sucht nach der besten Kombination von Bewirtschaftungsmassnahmen, durch welche der Wald die beste Kombination aus mehreren Produkten und Dienstleistungen liefern kann. Dabei können mit Hilfe einer Multi-Attribut-Funktion mehrere Ziele gleichzeitig miteinander verglichen werden. Zusätzlich kann das Modell beim Vergleich der verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien auch Risiken mitberücksichtigen sowie die Einstellung des Entscheidungsträgers zum jeweiligen Risiko (Pukkala and Miina 2006).

Tabelle 11: Eigenschaften des Modells STAND.

Modelltyp	managementbasiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Höhenwachstum	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Konkurrenz	Selbst-Durchforstungsmodell bestimmt maximale Bestandesdichte für einen Mittelstamm
Mortalität	Mortalität setzt ein, wenn die Grundfläche die maximale Bestandesdichte/Self-thinning-line überschreitet
Verjüngung / Einwuchs	natürliche Verjüngung von Waldföhre, Fichte und Birke sowie Verjüngung im Niederwald; verschieden Submodelle simulieren das Höhen- und Dickenwachstum der Verjüngung (bis BHD 5cm)
Standort	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Altersabhängigkeit	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Behandlungsarten	Pflanzung, Pflegemassnahmen, Durchforstung, Endnutzung, Verbleib von Überhältern
Störungen	Windwurf
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Preisszenarien für verschiedenen Sortimente; Kosten für Bestandesbegründung, Pflege und Holzernte; Holzerlös; ökologische Bewertung: Erholungsindex; Biodiversitätsindex
Baumarten	Waldföhre, Fichte, Birke
Waldtypen	gleichaltrige Bestände
räumliche Auflösung	Einzelbaummodell
Klimasensitivität	-
Datenbasis	<i>konnte nicht gefunden werden</i>

5.1.11 MOTTI

MOTTI ist ebenfalls ein Decision-Support System aus Finnland und ermöglicht eine Beurteilung der Auswirkungen von verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien auf das Wachstum und die Rentabilität der Waldbewirtschaftung. Das Modell ist in der Lage, die Auswirkungen unterschiedlicher Waldbaumethoden auf das Wachstum vorherzusagen. Hierzu liefert es Informationen über die Entwicklung und die Struktur des Bestandes und den Totholzanteil je Baumart sowie über die Höhe und die Verteilung des ausscheidenden Bestandes und den Anteil natürlicher Mortalität. Das Modell enthält verschiedene anwenderdefinierte Behandlungsoptionen für Durchforstungen als auch für die Düngung und Entwässerung des Bestandes mit den entsprechenden Verfahrenskosten. Auf Basis der Informationen über die entnommenen Holzmengen, der Anwender definierten Holzpreise und Holzerntekosten, kann die Rentabilität verschiedener Bewirtschaftungsstrategien analysiert werden (Hynynen et al. 2005, Salminen et al. 2005). Weiterhin enthält MOTTI Modellkomponenten zur Beurteilung der Kohlenstoffspeicherung und der Biodiversität eines Bestandes sowie zur Schätzung der Biomasse von verschiedenen Baumkompartimenten.

Der zentrale Kern von MOTTI ist jedoch das Wachstumsmodell. Dieses wurde so entwickelt, dass es mit gewöhnlichen Daten, die aus der Waldinventur zur Verfügung stehen, kompatibel ist. Als Eingangsgrößen benötigt es Informationen über den Standort, die Region und die Bewirtschaftungsgeschichte sowie Daten über den Holzvorrat, entweder auf Ebene des Bestandes oder auf Ebene der Einzelbäume. Bei der Simulation kommen statische wie auch dynamische Modellkomponenten zum Einsatz. Die statischen Modelle werden angewendet, um die Baum- und Bestandeseigenschaften während der Simulation zu aktualisieren, wie z.B. das Volumen des Einzelbaumes und Bestandes, der Biomasse und der Kroneneigenschaften. Dynamische Modelle werden angewendet, um das Wachstum der Bäume und die Mortalitätsraten für 5-jährige Wachstumszeiträume vorherzusagen (Hynynen et al. 2005). Weiterhin ist das Modell in der Lage, Einflüsse von erhöhten Temperatur- und CO²-Konzentration auf das Baumwachstum abzubilden. Dies wird durch die Verknüpfung des Modells MOTTI mit dem physiologischen Wachstumsmodell FinnFor ermöglicht (Matala et al. 2003, Matala et al. 2005, Matala et al. 2006).

Tabelle 12: Eigenschaften des Modells MOTTI.

Modelltyp	Ertragsmodell / Hybrid mit Prozessmodell FinnFor
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs; Grundflächenzuwachsstmodell
Höhenwachstum	potenzialabhängiger Zuwachs;
Konkurrenz	Berücksichtigung der Konkurrenz erfolgt sowohl auf Bestandesebene (i) wie auch auf Ebene des Einzelbaumes (ii). Die (i) Bestandesdichte wird über den „Relative Density Factor (RDF)“ ermittelt, auf der (ii) Ebene des Einzelbaumes erfolgt die Abschätzung der Konkurrenz anhand der Dichte aller Bäume, die grösser als der betrachtete Einzelbaum sind (RDFL). RDF bezeichnet das Verhältnis von tatsächlicher und der zur Verfügung stehenden Grundfläche für das Wachstum der Bäume.
Mortalität	Überlebenswahrscheinlichkeit des Einzelbaumes wird nach einem modifizierten Ansatz nach Reineke (1933) ermittelt.
Verjüngung / Einwuchs	-
Standort	Oberhöhenbonität im Alter 50 und ergänzende Standortvariablen: Temperatursumme, Meereshöhe, See-Index und Meeres-Index, Standortsgüte
Altersabhängigkeit	altersabhängig
Behandlungsarten	Durchforstung, Verjüngungshiebe, Überhälter, keine Behandlung sowie

	Düngung und Drainage
Störungen	-
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Volumen und Qualität der Stämme, finanzielle Analysen; ökologische Bewertung: Biomasse; Kohlenstoffspeicherung, Biodiversität;
Baumarten	Waldföhre, Fichte, Birke
Waldtypen	homogene, gemischte und nicht bewirtschaftete Bestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	Abbildung von Temperatur und CO ₂ -Anstieg durch Verknüpfung mit Prozessmodell FinnFor; über spezies-spezifische Transfer-Funktionen wird das Wachstum in MOTTI angepasst
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen und Daten der Finnish National Forest Inventory

5.1.12 FVS

Das Modell FVS (Forest Vegetation Simulator) ist ein distanzunabhängiges Einzelbaummodell, das in den Vereinigten Staaten zur Unterstützung von Managemententscheidungen im Forstbereich sehr weit verbreitet ist. Es basiert auf den Ansätzen von Stage (1973) und seinem Modell PROGNOSES. Bestände sind in FVS die grundlegende Projektionseinheit, aber der räumliche Geltungsbereich kann auch mehrere tausend Bestände umfassen. Der zeitliche Geltungsbereich beträgt mehrere hundert Jahre bei einer Auflösung von 5-10 Jahren. Die Projektionen beginnen mit einer Zusammenfassung der aktuellen Bedingungen, die aus den Inventurdaten ersichtlich werden. FVS enthält eine Funktion zur Selbst-Kalibrierung, die gemessene Wachstumsraten verwendet, um Vorhersagen für die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Einzelne Teilmodelle sagen das Wachstum und die Mortalität von einzelnen Bäumen voraus und Erweiterungen des Basismodells bilden verschiedene Störung ab, einschliesslich Insekten, Pathogene und Feuer (Crookston and Dixon 2005).

Die einzelnen Teilmodelle unterscheiden sich durch regional spezifische Modellvarianten, in Abhängigkeit von der geographischen Region der USA, die sie jeweils vertreten. Zweiundzwanzig FVS-Varianten wurden bislang für die bewaldeten Gebieten der Vereinigten Staaten und für einen Teil von British Columbia in Kanada entwickelt. Die in den verschiedenen Modellvarianten verwendeten Methoden zur Vorhersage des Wachstum und der Mortalität unterscheiden sich. Die Unterschiede zwischen den regionalen Varianten entstehen aufgrund der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Daten sowie durch die Verwendung von bereits bestehenden Modellansätzen als Ergänzung. Mit dem Modell PROGNAUS wurde auch eine Variante von FVS an Österreich angepasst (siehe Kapitel 5.1.6) (Crookston and Dixon 2005).

FVS ermöglicht die Simulation fast jeder Art von Bewirtschaftungsverfahren. Der Anwendungsbereich reicht von der Entwicklung von waldbaulichen Behandlungsstrategien für einzelne Bestände bis hin zur Landschaftsebene. Schlüsselprobleme, die mit FVS angesprochen werden sind Waldentwicklung, Habitatmanagement sowie Schädlings- und Waldbrandbekämpfung (Crookston and Dixon 2005).

Zur Abbildung des Klimawandels gibt es für das Modell FVS bislang zwei Ansätze. Beim ersten Ansatz wurden bestehende Modellkomponenten lediglich modifiziert, anstatt durch neue Schätzfunktionen ersetzt zu werden. Dadurch bleiben die primären inneren Komponenten von FVS und ihr empirischer Hintergrund intakt (Crookston et al. 2010). Bei der zweiten Variante wurde FVS im Sinne eines Hybridmodells mit dem physiologischen Prozessmodell Stand-BGC verknüpft (Milner et al. 2003).

Für eine detaillierte Beschreibung von FVS siehe: (Dixon 2002, Milner et al. 2003, Crookston and Dixon 2005, Crookston et al. 2010)

Tabelle 13: Eigenschaften des Modells FVS.

Modelltyp	Ertragsmodell / Hybrid mit Prozessmodell Stand-BGC
Wachstum	FVS unterscheidet zwischen dem Wachstum grosser (angetrieben vom Durchmesserzuw.) und kleiner (angetrieben vom Höhenzuw.) Bäume
Dickenwachstum	<u>Gross:</u> Potenzialunabhängiger Zuwachs, periodische Änderung des quadrierten Durchmessers ohne Rinde <u>Klein:</u> Potenzialunabhängiger Zuwachs, über Höhen-Durchmesser Relation
Höhenwachstum	<u>Gross:</u> unterschiedliche Ansätze, je nach regionaler Variante i) potenzialunabhängig ii) potenzialabhängig iii) Mischung aus beiden, bei gleichaltrigen Beständen über Oberhöhenbonität, bei ungleichaltrigen Beständen anhand einer linearen Funktion basierend auf Einzelbaum- und Bestandesparametern <u>Klein:</u> potenzialunabhängiger Zuwachs, spezie-spezifische, in Abhängigkeit von Faktoren wie Standort, Bestandesdichte, soziale Position
Konkurrenz	<u>Gross:</u> indirekt über Durchmesser Zuwachs Funktion <u>Klein:</u> Kronen-Konkurrenzfaktor CCF (siehe 5.1.6, PrognAus)
Mortalität	es gibt drei Varianten von Mortalitätsmodellen <u>PROGNOSIS-Typ:</u> jährliche Mortalität wird in Abhängigkeit der Faktoren Standort, Baumart, Durchmesser, Durchmesserzuwachs, Grundfläche und einem Faktor für die Bestandesdichte nach Reineke bestimmt <u>SDI-basiertes Mortalitätsmodell:</u> Mortalität lediglich abhängig von Bestandesichte (Stand Density Index) <u>TWIGS-basiertes Mortalitätsmodell:</u> Überlebenswahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit von Durchmesser, Durchmesserzuwachs, Grundfläche und Oberhöhenbonität modelliert
Verjüngung / Einwuchs	Teilmodell Verjüngung: simuliert Anzahl, Grösse und Baumart in Abhängigkeit von Standort und Oberbestand für eine 0,0013 ha grosse Stichprobenfläche; Anwenderdefinierte Verjüngung
Standort	Berücksichtigung verschiedener Standortsfaktoren sowie Hangneigung und Exposition (beim PROGNOSIS-Typ); automatische Kalibrierungsfunktion zur Abbildung lokaler Verhältnisse
Altersabhängigkeit	je Modellvariante unterschiedlich, teils altersabhängig, teils altersunabhängig
Behandlungsarten	nahezu jede Behandlungsvariante kann simuliert werden
Störungen	Insekten, Pathogene, Waldbrand, Windwurf, Wildschaden, Holzernteschäden
Wirkungen / Leistungen	ökologische Bewertungen: Beurteilung von grossräumigen Wildtierhabitaten, Einfluss von Kalamitäten auf das Waldwachstum (Insekten, Pathogene), der Waldbrandgefahr und der Kohlenstoffspeicherung
Baumarten	wesentliche Baumarten der Vereinigten Staaten
Waldtypen	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	Zwei Ansätze zur Abbildung des Klimawandels: i) bestehende Modellekomponenten in FVS, die am meisten vom Klima betroffen sind, werden durch Klimavariablen angepasst: Mortalität, Standort, Wachstum sowie Verjüngung; ii) Hybrid mit dem Prozessmodell STAND-BGC; Schätzungen von Durch-

	messer- und Höhenzuwachs, Kronenverhältnis und Mortalität in FVS werden durch das Prozessmodell ersetzt
Datenbasis	Inventurdaten (Forest Inventory and Analysis; FIA) und langfristige Versuchsflächen

5.1.13 FORECAST

FORECAST ist ein managementbasiertes Bestandeswachstumsmodell und dynamisches Ökosystemmodell der Universität von British Columbia. Das Modell wurde entwickelt, um eine Vielzahl von Holzernte- und waldbaulichen Behandlungssystemen sowie natürlichen Störungsereignissen (wie z.B. Feuer, Wind, Insektenkalamitäten) und ihre Wirkung auf die Wälder abzubilden und zu vergleichen. Dazu zählen insbesondere ihre Wirkung auf die Produktivität des Waldes, die Bestandesdynamik und eine Reihe von biophysikalischen Indikatoren (Non-Timber Values). Die Abbildung des Bestandeswachstums und der Ökosystemdynamik basieren auf einer Darstellung der wichtigsten ökologischen Prozesse, welche die Verfügbarkeit und den Wettbewerb um die Ressource Licht und Nährstoffe regulieren. Eine alternative Version des Modells, genannt FORECAST Climate, bildet zudem Feuchtigkeits- und Klima-Rückkopplungen auf die Wachstums- und die Zersetzungsraten ab (Kimmins et al. 2010).

FORECAST kann als ein hybridisiertes Prozessmodell beschrieben werden. Das Modell ist so aufgebaut, dass die ökologischen Prozesse aus einer Kombination von empirischen Daten (Biomasseanteil in den Komponenten, Bestandesdichte, etc.) und Kennzahlen der spezifischen physiologischen Prozesse (z.B. Abbauraten, Blatt-Stickstoff-Effizienz und Nährstoffbedarf) berechnet werden. Dies wird erreicht, indem biologisch aktive Biomasse Komponenten (Laub und kleine Wurzeln) mit Kalkulationen zur Nährstoffaufnahme, der Strahlungsabsorption und Nettoprimärproduktion in Bezug gesetzt werden. Mit diesem Hybrid-Ansatz erzeugt das Modell eine Reihe von Wachstumseigenschaften für jeden Baum und den Bodenbewuchs. Diese Wachstumseigenschaften werden anschließend zur Modellierung des Wachstums als eine Funktion der Verfügbarkeit und der Konkurrenz um Ressourcen verwendet. Dazu zählen die Photosynthese-Effizienz, bezogen auf die Blattbiomasse und deren Stickstoffgehalt, die Anforderungen an den Nährstoffbedarf und die lichtabhängige Schätzung der Mortalität von Bäumen und Ästen (Kimmins et al. 1999, Kimmins et al. 2010).

Tabelle 14: Eigenschaften des Modells FORECAST.

Modelltyp	ökologisches Prozessmodell
Dickenwachstum	Netto Primärproduktion an Biomasse pro Jahr dient als Basis für Simulation des potenziellen Wachstums; anhand empirischer Daten (Stammzahlverteilung zu einem bestimmten Alter) wird der Durchmesserzuwachs für den Mittelstamm abgeleitet; das Wachstum der übrigen Stämme wird in Relation zum Mittelstamm (1.0) gesetzt; je nach Verhältnis wird die Biomasse auf die Einzelbäume aufgeteilt
Höhenwachstum	ähnlich zum Dickenwachstum, begrenzt durch Daten zur Definition des Kronenansatzes und der Oberhöhe für eine Reihe von Beständen
Konkurrenz	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Mortalität	Mortalitätsrate wird über Bestandesdichte festgelegt
Verjüngung / Einwuchs	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Standort	verschiedene empirische Ansätze: konventionelle Oberhöhenbonität zu einem bestimmten Alter, Ertragsklassen oder eine vergleichbare Standortsskalierung, die vom Anwender selbstdefiniert werden kann

Altersabhängigkeit	altersabhängig
Behandlungsarten	Pflanzung samt Standortsvorbereitung, Düngung, Jungbestandespflege, Ästung, Durchforstung, Endnutzung
Störungen	Waldbrand, Pathogene, Insekten, Windwurf, Wildverbiss
Wirkungen / Leistungen	ökonomische Bewertung: Effizienz und Nachhaltigkeit von Kurzumtriebsplantagen ökologische Bewertung: Einfluss der Holzernte auf die Kohlenstoffspeicherung; Einfluss von Kalamitätsnutzungen auf die nachhaltige Waldbewirtschaftung
Baumarten	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Waldtypen	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Bestandesmodell
Klimasensitivität	FORECAST Climat Modul: Verknüpfung mit dem Modell ForWaDy (Forest Water Dynamics), diese bildet die forsthydrologischen Prozesse ab, ermöglicht Simulation des Baumwachstum unter Wasserstress; wird ergänzt durch den Einfluss der Temperatur auf Vegetationsperiode und Wachstumsraten
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen

5.1.14 TASS

TASS (Tree And Stand Simulator) ist ein biologisch orientiertes distanzabhängiges Einzelbaummodell. Es wurde entwickelt, um Ertragstafeln für das potenzielle Wachstum von gleichaltrigen bewirtschafteten Beständen zu erzeugen. Das Modell stammt aus British Columbia und ist für die dort vorkommenden Baumarten kalibriert. TASS ist ein Modell, das vor allem durch das Höhenwachstum (abgeleitet von Oberhöhenbonitäten), das Kronenwachstum und die Kronenausdehnung von konkurrierenden Bäumen angetrieben wird. Das Modell simuliert das Baumwachstum und die Kronenkonkurrenz in einem dreidimensionalen Wuchsraum (Di Lucca 1999).

TASS wird in British Columbia vor allem dafür verwendet, Ertragstafeln für die Datenbank TIPSy (Table Interpolation Program for Stand Yield) zu erzeugen. Es enthält aber auch eine Reihe von Teilmodellen wie ROTSIM (Root Rot Simulator), ein Modell für die Abbildung der Wurzelfäule, SWAT (Spruce Weevil Attack Model), ein Modell für die Simulation von Kalamitäten durch den Fichtenrüsselkäfer und ein Modell für die Simulation der Lichtabsorption (tRAYci). Weiterhin ist TASS die Wachstumskomponente für das Modell SYLVER (Sylvicultural treatment on Yield, Lumber Value and Economic Return), das eine ökonomische Bewertung von waldbaulichen Behandlungen erlaubt (Di Lucca 1999, Goudie et al. 2005).

Tabelle 15: Eigenschaften des Modells TASS.

Modelltyp	hybridisiertes Ertragsmodell
Dickenwachstum	potenzialunabhängiger Zuwachs
Höhenwachstum	Potenzialunabhängiger Zuwachs
Konkurrenz	Kronenkonkurrenz wird im drei-dimensionalen Raum simuliert
Mortalität	Konkurrenz-Mortalität tritt ein, wenn die Bäume in einer kritischen Distanz überragt werden. Dient als Ausdruck für Lichtschwächung.
Verjüngung / Einwuchs	<i>konnte nicht gefunden werden</i>
Standort	Oberhöhenbonität
Altersabhängigkeit	altersabhängig

Behandlungsarten	Pflanzung, Düngung, Astung, Auslesedurchforstung (manuell, zufällig), Saumschlag, Femelhieb, Z-Baum-Durchforstung
Störungen	Schädlinge und Pathogene
Wirkungen / Leistungen	<u>ökonomische Bewertung (mit SYLVER)</u> : Sortimentierung und Qualitätsschätzung, Einfluss von Insekten und Pathogenen auf den Ertrag, finanzielle Rendite - einschliesslich diskontierter Nettoreinertrag (abzüglich Pflege- und Holzerntekosten); <u>ökologische Bewertung</u> : Einfluss waldbaulicher Behandlungen auf Wildtierhabitate
Baumarten	4 Küstenarten und 4 inländische Baumarten (alles Koniferen)
Waldtypen	gleichaltrige Reinbestände
räumliche Auflösung	distanzabhängiges Einzelbaummodell
Klimasensitivität	-
Datenbasis	langfristige Versuchsflächen aus British Columbia, Alberta, Pazifischer Nordwesten der USA, Europa, Neuseeland; Biologische Wachstumsverhältnisse stammen aus detaillierten Stamm-, Ast- und Blattanalysen

5.2 Bewertung und Vorauswahl

Ausgehend von den in Kapitel 3.2 genannten Punkten zur Erfassung der Modelleigenschaften wurden Anforderungen definiert (vgl. Tabelle 16), anhand derer die Modelle bewertet wurden. Daneben wurde zusätzlich der Dokumentationsstand des Modells in die Bewertung mitaufgenommen. Eine gute Dokumentation ist für eine umfassende Erfassung der Modelleigenschaften sowie für den weiteren Evaluationsprozess entscheidend.

Die Angaben in der Tabelle sind wie folgt zu verstehen.

?	Hierzu konnte keine Information gefunden werden
	Wird im Modell nicht abgebildet
-	Wird im Modell nur mässig abgebildet
+	Wird im Modell abgebildet

Aufbauend auf der Bewertung wurden vier Modelle ausgewählt, die in die Endauswahl übergehen. Bei den vier Modellen handelt es sich um: BWINPro, SILVA, MOSES und PrognAus. Diese versprechen nach der ersten Betrachtung der Modelleigenschaften die vorläufig beste Erfüllung der Grobanforderungen.

Die Modelle MOSES und BWINPro wurden, obwohl sie nicht klimasensitiv sind, in die Endauswahl übernommen. Bei MOSES hat zu dieser Entscheidung die Tatsache beigetragen, dass das Modell neben Daten aus Österreich zusätzlich bereits mit Daten aus der Schweiz (langfristige Versuchsflächen der Eidg. Forschungsanstalt WSL) parametrisiert wurde. Eine ergänzende Validierung mit einem unabhängigen Datensatz aus der Schweiz, der nicht für die Parametrisierung verwendet wurde, hat dabei gezeigt, dass das Modell das Baumwachstum verschiedenster Waldbestände in der Schweiz hinreichend genau nachbilden kann, ohne systematische Abweichungen in den Durchmesser- und Höhenzuwachsschätzungen (Hallenbarter et al. 2005). Aufgrund dieser Tatsache und den ansonsten positiven Resultate hinsichtlich der Grobanforderungen wurde der Entscheid getroffen, dass MOSES im weiteren Evaluationsprozess verbleiben soll.

Auch bei BWINPro haben die positiven Resultate bei der Betrachtung des Modells anhand der Grobanforderungen zu der Entscheidung geführt, das Modell in die Endauswahl zu übernehmen. Obwohl auch BWINPro in der aktuellen Version nicht klimasensitiv ist. Jedoch sind derzeit Bestrebungen im

Gang, welche die bisherige Modellversion zu einer klimasensitiven Variante weiterentwickeln sollen. In absehbarer Zukunft ist also damit zu rechnen, dass mit BWINPro auch Simulationen des Waldwachstums unter einem veränderten Klima möglich sein werden.

Für das Ausscheiden der Modelle FBSM, SiWaWa, MASSIMO, STAND und TASS haben neben der Tatsache, dass diese Modelle nicht klimasensitiv sind, noch weitere Gründe beigetragen:

FBSM: an dem Modell wurde seit 1991 nichts mehr geändert; bildet keine eigene Mortalität ab; bildet keine ungleichaltrigen und gemischten Bestände ab; wurde mit Ertragstafeldaten parametrisiert; läuft nicht mehr unter 64 Bit Betriebssystemen

SiWaWa: berücksichtigt keine natürliche Verjüngung/Einwuchs; bildet nur begrenzt Behandlungsstrategien ab; bildet keine ungleichaltrigen Bestände und Mischbestände ab; bildet nur eine begrenzte Anzahl an Baumarten ab; ist ein Bestandesmodell; Dokumentation ist nur ungenügend

MASSIMO: ist speziell für Simulationen des Waldwachstums auf Stichproben im Kontext des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) konzipiert und nicht für das forstliche Management auf Bestandesebene gedacht

STAND: bildet keine ungleichaltrigen sowie nur eine begrenzte Anzahl an Baumarten ab (finnisches Modell); Dokumentation des Modells ist ungenügend.

TASS: bildet keine ungleichaltrigen Bestände und Mischbestände sowie nur eine begrenzte Anzahl an Baumarten ab (typische Nadelbaumarten von British Columbia); Dokumentation des Modells ist ungenügend

Neben den oben genannten Modellen, die nicht klimasensitiv sind, wurden jedoch auch Ansätze verworfen, die eine Abbildung des Waldwachstums unter sich verändernden klimatischen Verhältnissen ermöglichen würden. Für deren Ausscheiden waren insbesondere folgende Gründe entscheidend:

ForClim: Obwohl das Gap-Modell ein Teilmodul MANAGEMENT zur Simulation von waldbaulichen Behandlungen besitzt, ist es für den Einsatz im forstlichen Management, das vor allem die kurz bis mittelfristige Planung umfasst, nicht geeignet. Die Stärken des Modells liegen laut Rasche et al. (2011) darin, Entwicklung von Waldbeständen unter verschiedenen Bewirtschaftungssystemen und unter einem sich ändernden Klima über Zeiträume von einem Jahrhundert und mehr abzuschätzen. Diese Informationen können für das strategische Waldmanagement von grosser Bedeutung sein, z.B. wenn es darum geht, Entscheide über Bestockungsziele oder die Art der Überführung von Beständen zu fällen. Für eine managementbasierte „mittelfristige“ Planung von 20-30 Jahren ist das Modell hingegen weniger geeignet.

PICUS: Wie bei ForClim ist PICUS trotz eines Modells für die einzelbaumbasierte und räumlich explizite Simulationen von forstwirtschaftlichen Eingriffen nicht für das forstliche Management geeignet. Die Weiterentwicklung des ursprünglichen Gap-Ansatzes um die Berücksichtigung räumlicher Konkurrenz auf Einzelbaumbene schien vielversprechend für die Verwendung auf Bestandesebene zu Managementzwecken. Jedoch sind die Funktionalitäten, die zur Unterstützung der Managementplanung von Bedeutung sind (Durchführung von waldbaulichen Variantenstudien, Ausgabe von Baumlisten, Bestandeskennwerte, ökonomische Kennwerte) nur unzureichend abgebildet bzw. wurden in den Dokumentationen nur sehr oberflächlich abgehandelt (Managementmodul). Weiterhin steigen durch die Ergänzung von PICUS mit dem Bodenmodell von Currie et al. (1999) die Initialisierungsparameter. Dadurch ist der Einsatz des Modells mit den in der Praxis zur Verfügung stehenden Ein-

gangsinformationen, wie z.B. aus Stichproben und Inventuren, eingeschränkt. Detaillierte Bodeninformationen sind im Vergleich zu Baum- und Bestandesmerkmalen in der Praxis nur selten in der für das Modell notwendigen Auflösung vorhanden (Seidl et al. 2009).

MOTTI: Der Hybrid mit FinnFor zur Abbildung des Klimas ist speziell für die Verhältnisse von borealen Nadelwäldern in Finnland entwickelt worden. Unter den aktuellen dort herrschenden klimatischen Verhältnissen ist das Baumwachstum hauptsächlich durch niedrige Temperaturen im Sommer und Engpässe in der Stickstoffversorgung eingeschränkt. Durch den zu erwartenden Klimawandel und dem damit einhergehenden Temperaturanstieg, der verlängerten Vegetationsperiode, verstärkten Stickstoffmineralisation und dem Anstieg der CO₂ Konzentration, wird die Produktivität der borealen Nadelwälder wahrscheinlich zunehmen. Eine Wasserknappheit wird nicht erwartet (Matala et al. 2005). Dies unterscheidet sich von den zu erwartenden Veränderungen in der Schweiz. Weiterhin bildet das Modell keine ungleichaltrigen Bestände ab, berücksichtigt keine natürliche Verjüngung und Einwuchs und bildet nur eine begrenzte Anzahl an Baumarten ab.

FORECAST: Der Bedarf an Eingabedaten, um das Modell zu betreiben, ist beträchtlich. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Entwicklung der Indizes und Koeffizienten für die verschiedenen Prozesse des Ökosystems innerhalb des Modells selbst durchgeführt werden sowie in der Vielzahl an abgebildeten Prozessen und Managementaktivitäten. Sie übertreffen den Bedarf bei vergleichbaren Modellen. Bei den meisten anderen Modellen arbeitet der durchschnittliche Benutzer niemals mit den Daten zur Kalibrierung, da diese vorbereitende Arbeit „ausserhalb“ des Modells stattfindet. Im Fall von FORECAST dienen diese Daten direkt als Eingangsgrössen. Das Modell bietet dadurch zwar den Vorteil, eine Vielzahl von Ökosystemen und sich verändernde Umweltbedingungen abbilden zu können (Kimmins et al. 1999), macht aber eine Übertragung auf die Schweiz extrem schwierig. Wie Hoffmann et al. (1997) bereits feststellten, ist der Grossteil der benötigten Eingangsinformationen nur schwer zu erheben oder steht einfach nicht zur Verfügung.

FVS: Das Österreichische Modell PrognAus basiert bereits auf den Modellansätzen von FVS (Crookston and Dixon 2005, Neumann 2010). Bei der Auswahl der Modelle fiel die Entscheidung daher auf PrognAus, da davon ausgegangen werden kann, dass für die Anpassung an Österreich bereits einiges an Arbeit und Know-How aufgebracht wurde. Es scheint daher unnötig, diese Arbeit ein zweites Mal für die Schweiz durchzuführen. Vielmehr wird direkt der für Österreich adaptierte Ableger von FVS in die Endauswahl übernommen.

Tabelle 16: Vergleichende Bewertung der Modelle anhand der Auswahlkriterien von Kapitel 3.2.

		FBSM	SiWaWa	MASSIMO	ForClim	SILVA	PrognAus	MOSES	BWINPro	PICUS	STAND	MOTTI	FVS	FORECAST	TASS
wesentliche Wachstumsprozesse	Dicken- / Höhenw.	+	-	+	+	+	+	+	+	+	?	+	+	+	+
	Konkurrenz	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	?	+
	Mortalität		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Verjüngung/Einwuchs	+		+	+	+	+	+	+	+	+		+	?	?
Berücksichtigung von Standortseigenschaften		-	-	+	+	+	+	-	-	+	?	-	+	-	-
unabhängig vom Alter				-	+	+	+			+	?		(+) Je Variante		
Behandlungs- und Durchforstungsarten		-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	(+) laut Lit.	-	+
Störungen		-	-		-		-	-		-	-		+	+	-
Wirkungen und Leistungen	ökonomisch	+				+	+	+	+		+	+		-	+
	ökologisch			-	+	+			+	+	+	+	+	+	-
wesentlichen Hauptbaumarten der Schweiz		+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	?	?	
Waldtypen	Mischbestände			+	+	+	+	+	+	+	?	+	+	+	
	ungleichaltrige Bestände			+	+	+	+	+	+	+			+	+	
räumliche Auflösung auf Einzelbaumebene		+		+	+	+	+	+	+		?	+	+		+
Berücksichtigung von Klimaeinflüssen					+	+	+		läuft Projekt	+		+	+	+	
Parametrisierung anhand Inventur- und Versuchsflächendaten			+	+		+	+	+	+		?	+	+	+	+
Dokumentation des Modells		gut	schlecht	gut	gut	gut	mittel	gut	gut	gut	schlecht	gut	mittel	mittel	schlecht



6 Endauswahl

6.1 Klimasensitivität in den Modellen

Von den vier in die Endauswahl übernommen Modellen sind PrognAus und SILVA klimasensitiv. Die Modelle MOSES und BWINPro sind in der aktuellen Version nicht klimasensitiv.

Nachfolgend werden für die beiden Modelle PrognAus und SILVA die Ansätze zur Abbildung des Klimas betrachtet. Zusätzlich werden die Ansätze aus den Managementmodellen MOTTI und FVS untersucht. Daraus lassen sich evtl. wichtige Erkenntnisse über Ansätze und Methoden gewinnen, wie die beiden Modelle BWINPro und MOSES nachträglich zu einer klimasensitiven Variante weiterentwickelt werden können (z.B. über einen Hybridansatz, d.h. Kombination mit einem Prozessmodell).

6.1.1 PrognAus

Für die Abbildung veränderter Klimabedingungen wurden im Modell PrognAus das Höhenzuwachsmodell, basierend auf dem von Nachtmann (2006) an den Daten der ÖWI parametrisierten „Evolon-Modell“, sowie das Grundflächenzuwachsmodell von Monserud and Sterba (1996) um klimatische Variablen erweitert. Dabei wird jeweils die jährliche Temperatur- und Niederschlagssumme sowie die Aridität im Modell berücksichtigt. Neben den klimatischen Variablen werden weiterhin das Relief, die Hangneigung, die Exposition, der Wasserhaushalt, die Bodengründigkeit sowie die Bodengruppe des Standortes berücksichtigt (definiert nach der österreichischen Waldinventur).

Zusätzlich wurde für PrognAus ein Kalamitätsmodell geschaffen. Dieses ermöglicht die Schätzung der zufälligen Nutzungen, wie Windwurf/Windbruch, Schneebruch und Käferbefall in Abhängigkeit vom Bestand, Standort und dem Klima (Gschwantner et al. 2010).

Höhenzuwachsmodell:

PrognAus enthält in seiner aktuellen Version das von Nachtmann (2006) an den Daten der ÖWI parametrisierte Höhenzuwachsmodell, das auf dem bekannten „Evolon-Modell“ basiert.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = ih = c \cdot h^k \cdot (B - h)^\lambda$$

Formel 8

h	Baumhöhe
ih	jährlicher Höhenzuwachs
c	Geschwindigkeitsparameter
k	Exponent für das anfängliche Wachstum
B	Sättigungswert
λ	Exponent für die Sättigungsphase

Für die Einbeziehung von klimatischen Variablen in das Höhenzuwachsmodell werden der Parameter c und der Sättigungswert B als geeignet betrachtet.

In einem ersten Schritt wird der Ausdruck des Sättigungswertes B, der die unter standörtlichen Bedingungen erreichbare maximale Baumhöhe beschreibt, um Klimavariablen erweitert. Dabei wird unterstellt, dass der Sättigungswert von der längerfristigen Klimasituation am Standort abhängt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren werden die zur Verfügung stehenden Mittelwerte der jährlichen Temperatursummen in der Vegetationszeit (Tsum_veg_30), der jährlichen Niederschlagsmenge in der

Vegetationszeit (PRCP_veg_30) und die Aridität bezogen auf die Vegetationszeit (PRCP_veg_30 / Tsum_veg_30) in das Modell integriert (Formel 10).

Im Geschwindigkeitsparameter c wiederum werden die für den Höhenzuwachs eines Jahres t unmittelbar wirksamen Witterungsbedingungen berücksichtigt. Dabei wird sowohl das vorangegangene Jahr $t-1$ als auch das aktuelle Jahr t berücksichtigt. Dafür wurden die Monate Juli, August und September des Vorjahres und die Monate April, Mai und Juni des Zuwachsjahres einbezogen. Die Temperatursumme, Niederschlagssumme und die Aridität dieses Zeitraums i (Tsum_veg_i, PRCP_veg_i und PRCP_veg_i/Tsum_veg_i) werden mit den langjährigen Mittelwerten in Beziehung gesetzt und als Verhältnis in das Modell aufgenommen (Formel 9). Durch die Anpassung des Parameters c berücksichtigt das Modell neben der langjährigen Klimasituation (Sättigungswert B) auch kurzfristige Abweichungen.

Die Formeln für die klimatisch angepassten Parameter stellen sich wie folgt dar:

$$c = c_0 + c_1 \cdot \frac{Tsum_veg_i}{Tsum_veg_30} + c_2 \cdot \frac{\frac{PRCP_veg_i}{Tsum_veg_i}}{\frac{PRCP_veg_30}{Tsum_veg_30}} + c_3 \cdot \frac{PRCP_veg_i}{PRCP_veg_30} \quad \text{Formel 9}$$

$$B = b_0 + b_1 \cdot Tsum_veg_30 + b_2 \cdot \frac{PRCP_veg_30}{Tsum_veg_30} + b_3 \cdot PRCP_veg_30 + b_4 \cdot NEIG^2 + b_5 \cdot NEIG \cdot \sin(EXP) + b_6 \cdot NEIG \cdot \cos(EXP) + b_7 \cdot WH + b_8 \cdot GR \quad \text{Formel 10}$$

NEIG = Hangneigung
 EXP = Exposition
 WH = Wasserhaushalt
 GR = Bodengründigkeit
 c_{0-3} und b_{0-8} = baumartspezifische Parameter

In die Exponenten k und λ werden keine zusätzlichen signifikanten Klima- und Witterungsvariablen aufgenommen. Sie enthalten jedoch zusätzliche Standortvariablen wie die Information über das Relief (REL), über die Bodengruppe (BO) und den Wuchsraum (WR).

$$k = k_0 + k_1 \cdot BAL + k_2 \cdot Gha + k_3 \cdot \frac{BAL + Gha_j}{Gha} + k_4 \cdot REL \quad \text{Formel 11}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot BO + \lambda_2 \cdot WR \quad \text{Formel 12}$$

Gha = auf der Probefläche repräsentierte Grundfläche pro Hektar
 BAL = Grundfläche der stärkeren Bäume (für Modellierung der Konkurrenz)
 Gha_j = vom Einzelstamm repräsentierte Grundfläche
 k_{0-4} und λ_{0-2} = baumartspezifische Parameter

Die klimasensitive Variante des Höhenzuwachsmodells wurde für neun Baumarten bzw. Baumarten-gruppen parametrisiert (Fichte, Tanne, Lärche, Föhre, sonstiges Nadelholz, Buche, Eiche, sonstiges

Hartlaubholz, sonstiges Weichlaubholz). Für die Schätzung der Parameter wurden nichtlineare multiple Regressionen verwendet.

Überprüfungen des Modelles haben gezeigt, dass die Prognosen in einem breiten Bereich von Höhenzuwachsen und Baumhöhen keinen nennenswerten Bias aufweisen. Allerdings kommt es in den Randbereichen zu Über- und Unterschätzungen. Die Zuverlässigkeit von Modellprognosen im Rand- und Extrapolationsbereich des zugrundeliegenden Parametrisierungsdatensatzes (Daten der ÖWI) ist mit Unsicherheiten verbunden (Gschwantner et al 2010).

Grundflächenzuwachsmoell

Die Schätzung des Grundflächenzuwachses (BAI) erfolgt vereinfacht mit nachfolgender Formel 13, wobei SIZE für die Baumdimension, COMP für die Konkurrenzmasse und SITE für die Standortvariablen stehen (Hasenauer 2000).

$$\ln(BAI) = a + b \cdot SIZE + c \cdot COMP + d \cdot SITE$$

Formel 13

Für die Anpassung des Grundflächenzuwachsmoell von Monserud and Sterba (1996) wurden tägliche Wetterdaten in das Modell einbezogen. Hierfür wurde der ursprüngliche Prognosezeitraum von fünf Jahren auf einen einjährigen Zeitraum verkürzt. Im Gegenzug wurden die täglichen Wetterdaten auf Jahreswerte aggregiert und im Modell berücksichtigt. Hierzu zählen die Jahrestemperatur die Tagestemperaturwerte (welche 3°C übersteigen) und die Jahresniederschlagssumme (jeweils bezogen auf ein Jahr mit 365 Tagen). Im Anschluss wurde das Modell mit einem verallgemeinerten linearen Modell (GLM) unter Gewichtung mit der repräsentierten Stammzahl parametrisiert.

Gegenüber dem Höhenzuwachsmoell ist das Grundflächenmoell bislang lediglich für sechs Baumarten parametrisiert; Fichte, Tanne, Föhre, Lärche, Buche und Eiche. Für alle anderen Baumarten, welche im Zuge der ÖWI erhoben wurden, ist das Modell lediglich so angepasst, dass einjährige Schätzungen erfolgen.

Der Einfluss der Seehöhe wie auch die Kombination von Hangneigung und Exposition wird durch die Jahrestemperatursumme ausreichend beschrieben. Das Grundflächenzuwachsmoell ermöglicht Schätzungen für sehr hohe Jahrestemperatursummen. Jedoch sind die ermittelten Werte in den Randbereichen von Niederschlags- und Temperatursummen verbesserungswürdig, da für die Parametrisierung z.B. nur Jahrestemperatursummen bis 3000°C vorlagen. Eine Ergänzung um Schwellenwerte, bei welchen Niederschlags- und Temperaturkombinationen eine Baumart überlebensfähig ist, würde eine Verbesserung bedeuten. Ein Temperaturschwellenwert wird vom Modell bislang nicht erkannt, d.h. sobald ein Tag im Jahr eine Temperatur über 3°C hat, wird vom Modell ein Zuwachs prognostiziert, was der Realität nicht entspricht. Ähnliches gilt für den Niederschlag (Gschwantner et al 2010).

6.1.2 SILVA

Im Modell SILVA wird der Einfluss des Klimas durch unimodale Dosis-Wirkungs-Funktionen abgebildet. Dabei werden die Umweltbedingungen über neun Standortsfaktoren dargestellt. Diese Faktoren werden in Werte zwischen 0 (minimale Wachstumsverhältnisse) und 1 (ökologisches Optimum für eine Baumart) transformiert (Abbildung 4) und im Anschluss in ökologisch signifikante Standortvariablen aggregiert, die auch Kompensationseffekte zwischen den Faktoren berücksichtigen. Die Stand-

ortvariablen bestimmen schliesslich den Verlauf einer potenziellen Höhenwachstumskurve, die gemäss der Chapman-Richards Gleichung (Formel 14) formuliert ist (Pretzsch et al. 2002a):

$$h_{pot} = A (1 - e^{-kt})^p$$

Formel 14

h_{pot} = potenzielle Baumhöhe im Alter t
 A = Asymptote in m
 k, p = Steigungs- und Formparameter

SILVA berücksichtigt in seinem Standort-Leistungsmodell folgende neun Standortsfaktoren in Form von langfristigen Mittelwerten (Pretzsch 2001, Pretzsch et al. 2002a):

- s_1 Nährstoffversorgung des Bodens (Relativwerte zwischen 0 und 1, d.h. Ober- bzw. Untergrenze der ökologischen Amplitude)
- s_2 NO_x Gehalt der Luft (ppm)
- s_3 CO_2 -Gehalt der Luft (ppm)
- s_4 Länge der Vegetationszeit (Anzahl Tage im Jahr mit einer Temperatur $> 10^\circ C$)
- s_5 Jahrestemperaturamplitude (Temperaturdifferenz zwischen dem kältesten und wärmsten Monat im Jahr $^\circ C$)
- s_6 Mittlere Temperatur in der Vegetationsperiode ($^\circ C$)
- s_7 Ariditätsindex nach De Martonne ($mm/^\circ C$)
- s_8 Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (mm)
- s_9 Bodenfrische (Relativwert zwischen 0 und 1, Ober- und Untergrenze der ökologischen Amplitude)

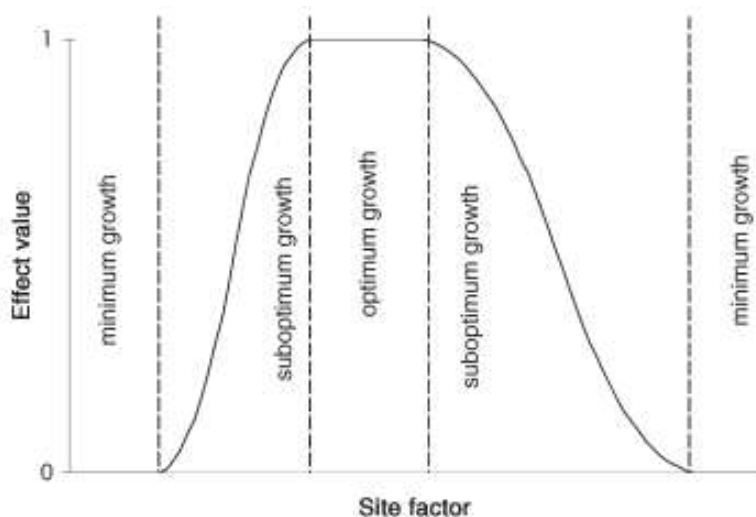


Abbildung 4: Beispiel einer unimodalen Dosis-Wirkungs-Funktion, wie sie im Standort-Leistungsmodell von SILVA verwendet wird (Pretzsch et al. 2002a). Eine solche Funktion wird für jede der neun Umweltvariablen erstellt.

Auf Basis der Standortvariablen wurde ein Funktionensystem erstellt und parametrisiert, mit dem die potentiellen Alters-Höhenkurven für beliebige Standortseinheiten geschätzt werden können (Kahn 1994). Ziel ist die standortsabhängige Modellierung der Alters-Höhenkurve über die Wachstumsfunktion von Chapman und Richards (Pretzsch 2001).

Dabei werden zunächst die Asymptote der Höhenkurve A (Formel 19) und der Zeitpunkt der Zuwachskulmination t_{kulm} (Formel 20) in Abhängigkeit der Standortsfaktoren s_i modelliert. Die Faktoren Nährstoffversorgung des Bodens und Bodenfrische sind ordinal skaliert. Sie werden mittels des fuzzy-set-theoretischen Konzepts auf ein metrisches Skalenniveau angehoben. Die Klimainformationen können aus der Wuchsbezirkszugehörigkeit eines Standortes hergeleitet werden. NO_x - und CO_2 -Gehalt der Luft sind grossregionale bzw. globale Faktoren. Über unimodale Dosis-Wirkungs-Funktionen (Formel 15) werden die Faktoren auf das Intervall $[0;1]$ abgebildet. Der daraus berechnete Wirkungswert r_n beschreibt die Wirkung des jeweiligen Faktors auf das potentielle Höhenwachstum einer Baumart.

$$r_n = 1 - e^{-c_{pn} \cdot s_n} \quad n = 1 \dots 9 \text{ und } r_n \in [0;1]$$

Formel 15

r_n Wirkung der Wachstumsfaktoren s_1 bis s_9 (Relativwert zwischen 0 und 1)
 c_{pn} baumartspezifischer Parameter
 s_n Wachstumsfaktor (Wert der Standortvariablen)

Die Wirkungswerte werden zu komplexen ökologischen Faktoren aggregiert. Zunächst werden die Wirkungswerte r_1 bis r_3 , r_4 bis r_6 und r_7 bis r_9 zu den drei ökologischen Faktoren Nährstoffversorgung KF_1 , Wärmeversorgung KF_2 und Wasserversorgung KF_3 verknüpft.

$$\text{KF}_1 = \left(\prod_{i=1}^3 r_i \right)^{1-\gamma_3} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^3 (1 - r_i) \right)^{\gamma_3}$$

Formel 16

$$\text{KF}_2 = \left(\prod_{i=4}^6 r_i \right)^{1-\gamma_4} \cdot \left(1 - \prod_{i=4}^6 (1 - r_i) \right)^{\gamma_4}$$

Formel 17

$$\text{KF}_3 = \left(\prod_{i=7}^9 r_i \right)^{1-\gamma_5} \cdot \left(1 - \prod_{i=7}^9 (1 - r_i) \right)^{\gamma_5}$$

Formel 18

KF komplexer ökologischer Faktor
 r_i Wirkung der Wachstumsfaktoren
 $\gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ Aggregationsparameter

Durch die nicht rein multiplikative Verknüpfung zusammen mit dem γ -Aggregationsparameter entsteht ein äusserst flexibler Verknüpfungsansatz, der sowohl eine Wachstumsbegrenzung als auch eine kompensatorische Wirkung von Standortsfaktoren untereinander abzubilden vermag. Der dabei zum Einsatz kommende γ -Aggregationsoperator, wurde aus Wachstums- und Standortdaten langfristiger Versuchsflächen regressionsanalytisch geschätzt.

Im nächsten Schritt werden die ökologischen Faktoren Nährstoffversorgung, Wärmeversorgung und Wasserversorgung miteinander verknüpft und zur Schätzung der Asymptoten und des Kulminationszeitpunktes der Höhenkurve eingesetzt.

$$A = A_0 + A_1 \left(\prod_{j=1}^3 KF_j \right)^{1-\gamma_1} \cdot \left(1 - \prod_{j=1}^3 (1 - KF_j) \right)^{\gamma_1}$$
Formel 19

$$t_{kulm} = t_0 + t_1 \left(\prod_{j=1}^3 KF_j \right)^{1-\gamma_2} \cdot \left(1 - \prod_{j=1}^3 (1 - KF_j) \right)^{\gamma_2}$$
Formel 20

A	Asymptote (m)
A ₀	minimale Asymptote (m)
A ₁	maximale Asymptote minus A ₀ (m)
t _{kulm}	Bestandesalter, in dem der Höhenzuwachs kulminiert (Jahre)
t ₀	Minimalwert von t _{kulm} (Jahre)
t ₁	Maximalwert von t _{kulm} minus t ₀ (Jahre)
γ ₁ , γ ₂	Aggregationsoperatoren
KF _j	komplexer ökologischer Faktor

Der Parameter A der Wachstumsfunktion (Formel 14) ist damit bekannt. Zur Bestimmung der Parameter k und p der Alters-Höhenkurve wird auf eine Hilfsbeziehung zwischen dem Zeitpunkt der Zuwachskulmination t_{kulm} und der Baumhöhe zum Zeitpunkt der Zuwachskulmination h_{tkulm} zurückgegriffen.

$$h_{tkulm} = B \cdot (1 - e^{c \cdot t_{kulm}})$$
Formel 21

Die Parameter B und c werden aus dem Datenmaterial langfristiger Versuchsflächen geschätzt. Dies erlaubt die Ableitung der Baumhöhe h_{tkulm} zum Kulminationszeitpunkt, die mit der Asymptote A und dem Parameter p zusammenhängt.

$$h_{tkulm} = A \cdot \left(1 - \frac{1}{p} \right)^p$$
Formel 22

Ein programmierter Algorithmus zur Auflösung nach p erbringt dann den Kurvenparameter p, der neben t_{kulm} zur Bestimmung des Steigungsparameters k dient. Die Parametrisierung des Zusammenhangs zwischen den Standortmerkmalen A und t_{kulm} basiert auf insgesamt 330 langfristigen Versuchsflächen.

$$k = - \frac{\ln\left(\frac{1}{p}\right)}{t_{kulm}}$$
Formel 23

Anhand der berechneten Asymptote der Höhenkurve (A) und des Zeitpunkts der Zuwachskulmination (t) sowie der Parameter k und p wird der neue Verlauf der Alters-Höhenkurve berechnet. Der durch die Umweltbedingungen beeinflusste potenzielle Höhenzuwachs wird anschliessend aus der Alters-Höhenkurve abgeleitet (Pretzsch 2001).

Diese Darstellung des standortsabhängigen potentiellen Höhenwachstums unterscheidet SILVA von den meisten anderen Wachstumsmodellen, die für die forstliche Praxis relevant sind (Pretzsch et al.

2002a). Indem der potenzielle Höhenzuwachs in Abhängigkeit von Standortvariablen geschätzt wird, vermag SILVA Bestandesentwicklungen für unterschiedliche Standortbedingungen nachzubilden. Das Problem der Bonitierung in Mischbeständen entfällt dadurch (Pretzsch 2001). Dabei wird die traditionelle Oberhöhenbonität durch einen erklärenden Ansatz von Botkin (1993) ersetzt, der ähnlich zu dem in Gap-Modellen verwendeten multiplikativen Verknüpfung von Umweltfaktoren ist. Dadurch wird die Flexibilität des Modells erhöht und ermöglicht eine Anwendung von SILVA im Bereich der Klimafolgenforschung, allerdings nur solange, wie die Klimaszenarien nicht die durch die Daten der Parametrisierung abgebildeten klimatischen Konditionen überschreiten (Pretzsch et al. 2002a).

Für die meisten Simulationszwecke werden die Umweltbedingungen konstant gehalten. Sie können bei Bedarf jedoch auch während eines Simulationslaufs geändert werden. Da für einen einzelnen Bestand die Verfügbarkeit aller Variablen nur selten gegeben ist, können die Umweltbedingungen auch über die Wuchsbezirkszugehörigkeit (definiert über die Standortkartierung) sowie die Höhe über dem Meer, Steigung und Exposition abgeleitet werden (Kahn 1994). Die notwendigen klimatischen Daten werden dann über eine vorgegebene Liste erzeugt und entsprechend der jeweiligen geografischen Region angepasst. In diesem Fall verwendet das Modell die gegenwärtigen Konzentrationen von CO₂ und NO_x und vom Anwender müssen lediglich Boden- und Nährstoffzustände definiert werden (Pretzsch et al. 2002a).

Die Nachteile der unimodalen Dosis-Wirkungs-Funktionen bestehen darin, dass sie einerseits eine schlechte empirische Datenbasis aufweisen. Zusätzlich haben die Modellformulierungen viele Parameter mit teils ähnlichen Ergebnissen. Die Residuen der Parametrisierung zeigen zudem einen Bias. Beim Einsatz von SILVA in Baden-Württemberg konnte Albrecht et al. (2010) systematische Abweichungen der simulierten Ergebnisse von den Beobachtungen nachweisen.

6.1.3 MOTTI

Das finnische Modell MOTTI wird zur Abbildung veränderter Klimabedingungen auf das Baumwachstum mit dem physiologischen Prozessmodell FinnFor in Form eines Hybridmodells erweitert. Die Erweiterung wird über baumartspezifische Transferfunktionen ermöglicht. Diese beschreiben den in Finnland durch das Klima erwarteten erhöhten Volumenzuwachs in Abhängigkeit von (i) CO₂- und Temperatur-Anstieg, Bestandesdichte sowie Konkurrenzsituation eines Baumes im Bestand und (ii) verschiedenen Standortseigenschaften sowie Jahrestemperatursummen an einem bestimmten Standort. Diese Methode mittels Transferfunktionen ermöglicht es, dass die innere Dynamik des statistischen Modells weiterhin verfolgt werden kann, wenn die Einflüsse veränderter Umweltbedingungen auf das Baumwachstum berücksichtigt werden. Auf diese Weise wird gleichzeitig auch die Kompatibilität mit den Wachstumsprognosen unter den derzeitigen Klimabedingungen sowie den dazugehörigen Modellsystemen beibehalten (Matala et al 2005, Matala et al 2006).

FinnFor

Das physiologische Modell FinnFor simuliert die vom Klima beeinflusste Dynamik des Waldökosystems anhand der Photosynthese, Respiration und Transpiration sowie indirekt über den Wasser- und Stickstoffkreislauf (Kellomäki and Väisänen 1997). Der Holzvorrat wird in Form von Baumkohorten beschrieben, wobei die dynamischen Zustandsvariablen die Biomassekomponenten der Bäume sind, die anschließend in Volumen oder andere Dimensionen umgewandelt werden. FinnFor verwendet für die Simulation künstliche Wetterdaten (Strandman et al. 1993). Diese Daten stellen sicher, dass

die Struktur der klimatischen Schwankungen aufrechterhalten wird, wenn ein Anstieg der Temperatur in das Modell eingebracht wird (Bewölkung, Strahlung, Niederschläge und Luftfeuchtigkeit werden durch die Temperatur modifiziert). Dies ermöglicht es, zukünftige Wetterbedingungen alleine auf der Basis von Temperaturerhöhung zu berechnen. Die CO₂-Konzentration der Luft wird getrennt von den anderen klimatischen Faktoren berücksichtigt und kann für die Abbildung von Klimaszenarien in Bezug auf die aktuelle Konzentration stufenweise oder sukzessive erhöht werden (Matala et al. 2005).

Baumartspezifische Transfervariable

Mit Hilfe von FinnFor wird anhand baumartspezifischer Transfervariablen der Einfluss des Klimas auf das Einzelbaumwachstum in MOTTI eingebracht. In FinnFor wird das Wachstum der Bäume über die Biomasse beschrieben. Da es eine enge Korrelation zwischen Stammbiomasse und Baumvolumen gibt, wird als Transfer-Variable der Volumenzuwachs des Stammes herangezogen. Die Transfervariable wird als „Relativer Szenario Effekt (RSEv(t))“ definiert (Einfluss auf das Stammvolumen V im Jahr t) und mit FinnFor berechnet:

$$RSEv(t) = (\Delta V(t)_{scen} - \Delta V(t)_{current}) / \Delta V(t)_{current} \quad \text{Formel 24}$$

$\Delta V(t)_{scen}$ Volumenzuwachs pro Jahr unter veränderten Umweltbedingungen

$\Delta V(t)_{current}$ Volumenzuwachs pro Jahr unter aktuellen Umweltbedingungen

Auf der Basis des RSEv(t)-Wertes wird der Volumenzuwachs unter veränderten Umweltbedingungen berechnet (Formel 26). Der Werte für $\Delta V(t)_{current}$ wird anhand des Modells MOTTI und der Wert für RSEv(t) mit dem Modell FinnFor bestimmt.

$$\Delta V(t)_{scen} = \Delta V(t)_{current} + RSEv(t) \cdot \Delta V(t)_{current} \quad \text{Formel 25}$$

Herleitung der RSEv(t) Funktion

Für die Herleitung der RSEv(t) Funktion werden die Jahresmitteltemperatur (T) und die CO₂-Konzentration in einem Schritt erhöht (Temperatur wurde um 4 °C erhöht, CO₂-Konzentration wurde verdoppelt, von 350 ppm auf 700 ppm). Anschliessend werden eine Reihe von Simulationen im Ein-Jahresrhythmus für die drei Baumarten Waldföhre, Fichte und Birke durchgeführt. Mittels dieser „unnatürlichen“ Erhöhung der Umweltbedingungen bei der Simulation kann der Einfluss möglicher erklärender Variablen auf Bestandesebene verdeutlicht werden. Im Fall von FinnFor stellte sich als beste Erklärende Variable für die Funktion die relative Bestandesdichte heraus (RDF: relativ density factor) sowie die Summe der RDFs von Bäumen, die grösser als der betrachtete Baum sind (RDFL) (Matala et al. 2005).

$$RSEv(t) = \alpha + \beta \cdot RDFL + \gamma \cdot RDF \quad \text{Formel 26}$$

α, β, γ Baumartspezifische Parameter, speziell für diesen Temperatur- und CO₂-Anstieg

Bestimmung der Parameter α , β und γ

Die Bestimmung der Parameter α , β und γ erfolgt mittels einer schrittweisen Einbindung der Auswirkungen eines Anstiegs von T und CO₂-Konzentration auf das Wachstum. Diese schrittweise Erhöhung entspricht eher der „realen“ Situation. Als Basis wird dabei die RSEv-Funktion verwendet, die über

die einmalige Erhöhung abgeleitet wurde. Die verschiedenen Werte von T und CO₂ gehen als erklärende Variablen in die Funktion ein. Die Parameter α, β und γ werden anschliessend in Abhängigkeit des T- und CO₂-Anstieges mit Hilfe eines Polynoms dritten Grades hergeleitet.

$$\alpha = \alpha_1 T + \alpha_2 CO_2 + \alpha_3 T^2 + \alpha_4 CO_2^2 + \alpha_5 TCO_2 + \alpha_6 T^3 + \alpha_7 CO_2^3 + \alpha_8 T^2 CO_2 + \alpha_9 TCO_2^2$$

$$\beta = \beta_1 T + \beta_2 CO_2 + \beta_3 T^2 + \beta_4 CO_2^2 + \beta_5 TCO_2 + \beta_6 T^3 + \beta_7 CO_2^3 + \beta_8 T^2 CO_2 + \beta_9 TCO_2^2 \quad \text{Formel 27}$$

$$\gamma = \gamma_1 T + \gamma_2 CO_2 + \gamma_3 T^2 + \gamma_4 CO_2^2 + \gamma_5 TCO_2 + \gamma_6 T^3 + \gamma_7 CO_2^3 + \gamma_8 T^2 CO_2 + \gamma_9 TCO_2^2$$

T	Anstieg der mittleren Jahrestemperatur (°C)
CO ₂	Anstieg der CO ₂ -Konzentration vom derzeitigen Wert (ppm) (wobei für Darstellung des aktuellen Klimas T und CO ₂ den Wert null erhalten)
α ₁₋₉ , β ₁₋₉ , γ ₁₋₉	baumartspezifische Parameter

Um Daten für die Analyse zu erhalten, werden mit FinnFor einjährige Simulationen mit verschiedenen Kombinationen von mittleren T-Erhöhungen (zwischen 0 und +6 °C) und CO₂-Konzentrationen (zwischen dem derzeitigen Niveau von 350 ppm und 700 ppm) durchgeführt. Mittels einer multiplen Rückwärtsregression werden die statistisch signifikanten Koeffizienten ermittelt. Die formulierten Modelle sind dadurch in der Lage, den Anstieg des Wachstums allein durch Angabe der T- und CO₂-Erhöhung darzustellen, jedoch nur im Rahmen der in den Modelldaten definierten Grenzen (Matala et al. 2005).

Einfluss des Standorts auf die Transferfunktion

Zusätzlich wird der Einfluss des Standorts sowie der Jahrestemperatursumme an einem bestimmten Standort in die Transferfunktion integriert. Die Herleitung der Transferfunktionen auf Basis der Simulationen mit dem physiologischen Modell FinnFor zeigt, dass sich die Standortgüte und die jährliche Temperatursumme am jeweiligen Standort (langjähriger Jahresmittelwert) auf den Stickstoffgehalt (N mg/g trockene Blattmasse) des Laubwerks auswirken. Der Stickstoffgehalt der Blattmasse beeinflusst die Photosyntheserate und somit wiederum die Biomasseakkumulation. Um diesen Zusammenhang in die Transferfunktion zu übertragen, wird über eine statistische Regression der durchschnittliche Stickstoffgehalt in Bezug auf den Standortstyp und die jährliche Temperatursumme gestellt und analysiert.

$$\hat{N} = \delta_0 + \delta_1 \cdot TS + \delta_2 \cdot D_{OMT} + \delta_3 \cdot D_{MT} \quad (\text{für Waldföhre}) \quad \text{Formel 28}$$

$$\hat{N} = \delta_0 + \delta_1 \cdot TS + \delta_2 \cdot D_{OMT} \quad (\text{für Fichte}) \quad \text{Formel 29}$$

$\hat{N}$	Stickstoffgehalt (mg/g trockene Blattmasse)
TS	jährliche Temperatursumme am Standort
D _{OMT} , D _{MT}	Dummy-Variablen für den entsprechenden Standortstyp, OMT (Oxalis-Myrtillus) MT (Myrtillus) (1 wenn der Standort zutrifft / 0 wenn nicht)
δ ₀₋₃	baumartspezifische Parameter

Im Anschluss werden wiederum Simulationen mit dem Modell FinnFor, für verschiedene Kombinationen von Temperatur (0 bis 6°C), CO₂-Konzentration (350 bis 750ppm) und bestimmten Temperatursummen (790, 872, 1040, 1230, und 1330 degree days, langjähriges Mittel) sowie verschiedenen

Standortstypen durchgeführt. Die verschiedenen Nadelstickstoffkonzentrationen zwischen den unterschiedlichen Standortstypen und Temperatursummen werden anhand der Formel 28 und Formel 29 für Waldföhre und Fichte berechnet. Die Temperatursumme dient in diesem Fall im Unterschied zum Klimawandel als Beschreibung für die geografische Variation im Klima (Nord / Süd).

Der Einfluss des Standorts auf den Volumenzuwachs wird wiederum in die Transferfunktion integriert (Formel 26). Diese wird durch eine Neuformulierung einiger α -Parameter (Formel 27) erzielt, deren Werte in Bezug zum Standorttyp (ausgedrückt über den Blattstickstoff) und der vorherrschenden Temperatursumme am jeweiligen Standort gesetzt wurden (Formel 30) (Matala et al 2006).

$$\alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12} \cdot TS/1000 + \alpha_{13} \cdot (TS/1000)^2 + \alpha_{14} \cdot D_{OMT} + \alpha_{15} \cdot D_{VT}$$

$$\alpha_2 = \alpha_{21} + \alpha_{22} \cdot TS/1000 + \alpha_{23} \cdot D_{OMT} + \alpha_{24} \cdot D_{VT}$$

$$\alpha_3 = \alpha_{31} + \alpha_{32} \cdot TS/1000 + \alpha_{33} \cdot (TS/1000)^2 \quad \text{Formel 30}$$

$$\alpha_4 = \alpha_{41} + \alpha_{42} \cdot TS/1000$$

$$\alpha_5 = \alpha_{51} + \alpha_{52} \cdot TS/1000$$

Ableitung des Höhen- und Durchmesserzuwachs für MOTTI

MOTTI prognostiziert den Volumenzuwachs indirekt über den Durchmesser- und den Höhenzuwachs. Die in FinnFor simulierte Veränderung des Volumenzuwachses durch den Klimawandel ($RSEv(t) \cdot \Delta V(t)_{\text{current}}$) wird daher in diese beiden Größen umgerechnet. Dieses Vorgehen folgt der inneren Dynamik des Modells MOTTI. Zu diesem Zweck wird der Shape-Effekt ($SE(t)$) verwendet. Er beschreibt das Verhältnis der relativen Szenario Auswirkungen auf den Höhenzuwachs ($RSEh(t)$) und den Volumenzuwachs ($RSEv(t)$).

$$SE(t) = RSEh(t)/RSEv(t) \quad \text{Formel 31}$$

Der Shape-Effekt wird wiederum anhand einer Regressionsanalyse über die Faktoren TS, RDF und RDFL für die drei Baumarten Waldföhre, Fichte und Birke hergeleitet.

$$SE_{pine} = 0.569 - 0.00022TS + 0.167RDF - 0.101RDFL$$

$$SE_{birch} = 0.922 - 0.00029TS + 0.067RDF - 0.016RDFL \quad \text{Formel 32}$$

$$SE_{spruce} = 1.282 - 0.00079TS + 0.092RDF - 0.040RDFL$$

Für das Modell MOTTI errechnet sich dann ein Relative-Scenario-Effect für den Höhenzuwachs ($RSEh(t)$) durch Umstellen der Formel 31.

$$RSEh(t) = SE(t) \cdot RSEv(t) \quad \text{Formel 33}$$

Der site-index hat einen direkten Einfluss auf das Höhenwachstum in Motti. Der Einfluss des Klimas wird somit über den Wert $RSEh(t)$ in den site-index eingebracht (Matala et al 2005).

$$SI_{scen}(t) = RSEh(t) \cdot SI_{current} \quad \text{Formel 34}$$

Der Hybridansatz von MOTT bietet die Möglichkeit, alleine mit einem statistischen Wachstums- und Ertrags-Modell Vorhersagen über das Waldwachstum unter Klimaerwärmung zu treffen, ohne dass während der eigentlichen Anwendung Berechnungen im physiologischen Modell notwendig sind (Matala et al 2006). Vorteile, die sich durch diesen Ansatz ergeben sind: 1) eine übermäßige Rechenkomplexität wird verhindert, die entsteht, wenn ein detailliertes physiologische Modell für Managementaufgaben verwendet würde; 2) die Kompatibilität mit früheren Berechnungen und Modulen, die ohne Klimaeffekte durchgeführt und verwendet wurden, wird beibehalten; 3) es findet keine Beeinträchtigung der inneren Logik des statistischen Modells statt. Die grundlegende Dynamik von MOTTI bleibt unberührt. Dies garantiert ein stabiles Verhalten des Modelles, was wiederum von entscheidender Bedeutung ist, wenn das Modell für praktische Managementaufgaben eingesetzt werden soll.

Ein Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass der Anwendungsbereich des Modells auf die Variationen im Klima und Umweltbedingungen begrenzt ist, die in den modellierten Daten abgedeckt sind. D.h., sollen die Auswirkungen von T- und CO₂-Schwankungen bzw. Standortstypen auf das Baumwachstum untersucht werden, die über die Datenbasis hinausgehen, müssen neue Modelle von neuen Simulationsreihen des physiologischen Modells FinnFor konstruiert werden. Ein weiterer Nachteil des bisherigen Ansatzes besteht darin, dass lediglich positive Auswirkungen auf das Wachstum unter Finnischen Bedingungen berücksichtigt werden. Probleme, die z.B. in Zusammenhang mit der Mortalität stehen, werden nicht berücksichtigt (Matala et al. 2005).

6.1.4 FVS

Für das Modell FVS gibt es derzeit zwei Ansätze zur Abbildung der Klimasensitivität: Climate-FVS und FVSBGC.

6.1.4.1 Climate FVS

Im ersten Ansatz wurden die Komponenten in FVS angepasst, welche die grösste Abhängigkeit vom Klima aufweisen. Dies sind die Komponenten zur Berechnung der Mortalität, der Bestandesdichte, des Wachstums und der Verjüngung. Diese wurden in der Version Climate-FVS überarbeitet, um die erwarteten Einflüsse des Klimas zu berechnen. Dies wurde über die Einbringung von zusätzlichen Funktionen erreicht, welche 1) die Mortalität und die Verjüngung mit klimatischen Variablen verbinden, um die Lebenswahrscheinlichkeit von Baumarten zu ermitteln (*viability score*); und 2) die Höhenbonität (*site-index*) mit dem Klima verknüpfen, um die Wachstumsraten zu verändern. Das Model Climate-FVS berücksichtigt zudem auch die Anpassungsfähigkeit der Bestandesdynamik an Klimaveränderungen anhand der genetischen Veranlagung einer Baumart (physiologische Anpassung an das Klima) (Crookston et al. 2010).

viability score

Die Herleitung des viability score Index erfolgt anhand einer baumartspezifischen Einschätzung der Wahrscheinlichkeit, ob das jeweilige Klima für eine Baumart geeignet ist. Die Schätzung wird anhand eines Klimaprofils, einer multivariaten Beschreibung der klimatischen Nischen abgeleitet. Die Profile werden aus bioklimatischen Modellen entwickelt, das heißt, Regressionen bzgl. der Anwesenheit oder Abwesenheit einer Spezies bei bestimmten Klimavariablen (siehe Rehfeldt et al. (2006), Rehfeldt et al. (2009)). Index-Werte nahe Null zeigen eine geringe Eignung, während Werte um 1,0 eine hohe Eignung bedeuten, d.h. die Art ist in diesem Klima fast immer vorhanden.

site-index

Da FVS die Standortsqualität für die Schätzung des Baumwachstums verwendet, benötigt Climate-FVS eine baumartspezifische Funktion, welche die Standortsqualität mit dem Klima verbindet. Hierzu wurde die proportionale Änderung im site-index „S“ definiert. Sie stellt den Wechsel der Oberhöhenbonität von einem Klima (C_1) zu einem anderen (C_2) dar. Die Funktion $f(C_1)$ hat dabei immer einen Wert grösser 0, da FVS mit Standorten initiiert wird, die für Wald geeignet sind.

Zur Herleitung des viability score und des klimasensitiven site-index werden folgende sieben Umweltvariablen herangezogen: 1) Anzahl Tage mit einer mittleren Temperatur über 5°C ($dd5$), 2) Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (April bis September; wsp), 3) mittlere Temperatur des wärmsten Monats ($mtwm$), 4) Produkt aus dem mittleren jährlichen Niederschlag (map) und der Differenz aus der mittleren Temperatur des wärmsten ($mtwm$) und kältesten Monats ($mtcm$), 5) Verhältnis aus wsp und map mal $dd5$, 6) Sommer-Trockenheits-Index ($sdi = \sqrt{dd5}/wsp$), und 7) sdi mal die Anzahl Tage mit einer mittleren Temperatur unter 0°C ($mindd0$). Der site-index S wird folglich von Variablen beschrieben, die das Gleichgewicht zwischen Temperatur und Niederschlag, der Wärme und der Menge an Niederschlägen in der Vegetationsperiode sowie der Kälte des Winters vorher-sagen (gewichtet durch Feuchtigkeitsdefizite des bisherigen Sommers).

Konvertierung von FVS zu Climate-FVS im Bereich der Mortalität

In der Version Climate-FVS wird die Mortalität anhand des viability scores kalibriert. Wenn der Wert für die Lebensfähigkeit einer Art unter den Wert fällt, bei dem die Art derzeit vorkommt, sollte die Mortalität erhöht werden, was bis zu Ausrottung führen kann. Abbildung 5 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem klimabasierten Wert für die Lebensfähigkeit (viability score) und der Mortalität (dargestellt als probability of survival).

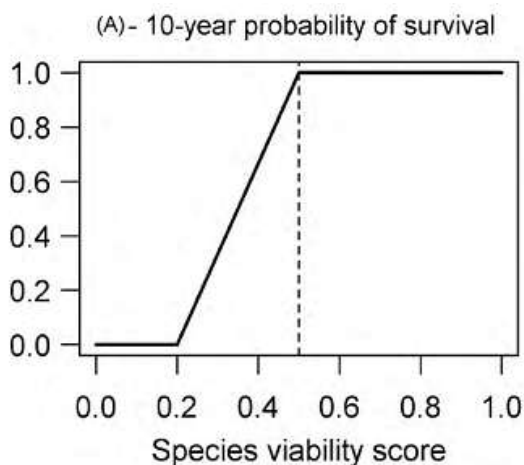


Abbildung 5: Darstellung des Zusammenhangs zwischen viability score einer Art und der 10-jährigen Überlebenswahrscheinlichkeit (Crookston et al. 2010).

Es wird unterstellt, dass bei einem viability score von 0.2 eine Baumart nicht mehr vorkommt und die Überlebensrate dementsprechend null ist. Für die fehlenden Informationen im mittleren Bereich, zwischen dem Wert 0.2 und 0.5, wird eine lineare Beziehung unterstellt, um die Abnahme in der Mortalität zu beschreiben. Die Funktion stellt einen realistischen Mittelweg zwischen der möglichen zu besetzenden ökologischen Nische und der tatsächlich realisierten Nische einer Baumart dar. Der dargestellte Ansatz berücksichtigt jedoch keine Störungen durch Insekten, Krankheiten oder klimatisch bedingtem Stress.

Konvertierung von FVS zu Climate-FVS im Bereich der Bestandesdichte

Die Mortalität hängt aber auch von der in FVS modellierten Bestandesdichte ab (Crookston and Dixon 2005) und wird über das Klima beeinflusst. In FVS wird die Bestandesdichte anhand der maximalen Bestandesgrundfläche und einem maximalen Bestandesdichte-Index nach Reineke (1933) modelliert. Eine Bestimmung der Veränderungen dieser maximalen Bestandesdichten über die Zeit hinweg erfolgt anhand einer gewichteten durchschnittlichen maximalen Dichte aller Baumarten eines Bestandes. Für jede Baumart wird hierzu eine maximale Dichte standardmässig vorgegeben (durchschnittliche Grundfläche einer Baumart). Dieses gewichtete Mittel stellt die maximale zu erreichende Bestandesdichte zu einem bestimmten Zeitpunkt der Simulation dar.

Climate-FVS verändert die maximale Bestandesdichte von FVS durch Berechnung einer proportionalen Änderung von zwei gewichteten durchschnittlichen maximalen Dichten (D_1 = zu Beginn der Simulation; D_2 = am Ende der Simulation). Die proportionale Veränderung in der Bestandesdichte ist demnach $r = D_2 / D_1$. Die maximale Dichte am Ende der Simulationszeit errechnet sich letzten Endes über das Produkt aus r und der maximalen Dichte ermittelt mit FVS. Nach diesem Ansatz erhöht sich die maximale Bestandesdichte, wenn der Standort für Baumarten günstig wird, die hohe Dichten vertragen können (wobei r maximal den Wert 1,5 erhalten kann), und nimmt ab, wenn das Klima Arten begünstigt, die geringere Dichten ertragen.

Konvertierung von FVS zu Climate-FVS im Bereich des Wachstums

Das Wachstum in FVS wird über den baumartspezifischen Faktor P_s modifiziert. P_s ist multiplikativ und setzt sich aus drei Einflüssen zusammen: 1) der veränderten Standortqualität S und 2) der Erwartung, dass Bäume mit einem abnehmenden viability score niedrigere Wachstumsraten aufweisen (siehe Rehfeldt et al. 1999, 2009). Für diese Bäume, wurde die baumartspezifische Lebensfähigkeit beigefügt, bezeichnet durch V_s . Ihr Einfluss ist vergleichbar mit der oben beschriebenen Mortalität. 3) Der dritte Teil beschreibt die Anpassungsfähigkeit der Baumarten an den Klimawandel aufgrund ihrer genetischen Veranlagung. Der Faktor G_s reflektiert somit die intraspezifische Reaktion auf eine veränderte Umwelt. Er wird im Rahmen von Provenienzversuchen hergeleitet (Leites et al 2009).

Über die Faktoren V_s , S und G_s wird der wachstumsverändernde Faktor P_s berechnet. P_s unterliegt folgender Logik: wenn $\min(V_s, S, G_s) < 1.0$, dann ist $P_s = \min(V_s, S, G_s)$, alternativ ist $P_s = \max(V_s, S, G_s)$. D.h. wenn kein Faktor das Wachstum begrenzt, dann ist der Faktor mit dem grössten Einfluss auf das Wachstum im Ökosystem massgebend. Hingegen nimmt das Wachstum ab, wenn (1) das Klima am Standort für die Baumart ungeeignet ist, (2) die Standortqualität sich verschlechtert, oder (3) die Provenienz für das Klima ungeeignet ist.

Konvertierung von FVS zu Climate-FVS im Bereich der Verjüngung

Die Berechnung der Verjüngung unter Klimaeinfluss erfolgt anhand von drei Anforderungen. Darin berücksichtigt werden der baumartspezifische viability score, die Bestockungsdichte und die Annahme, dass Samen zur Verjüngung vorhanden sind.

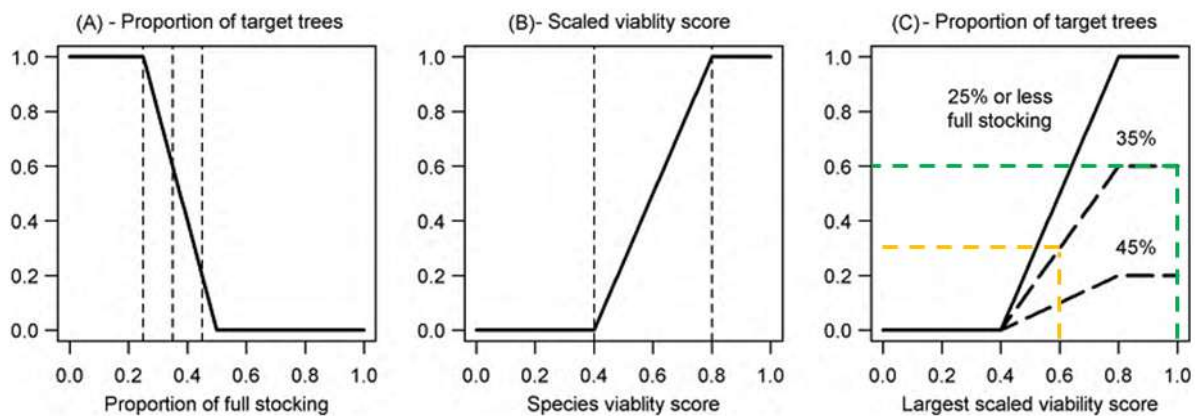


Abbildung 6: Darstellung der drei Anforderungen zur Ermittlung der maximalen Anzahl zu verjüngender Bäume in Abhängigkeit von (A) der Bestockungsdichte, (B) der Lebensfähigkeit der Baumart (viability score) und (C) dem Anteil der zu begründenden Bäume als Funktion des Bestockungsgrade. Die gestrichelten Linien in A stehen für die drei Bestockungsgrade in C (25%, 35%, 45%) (Crookston et al. 2010).

Durch die erste Anforderung wird das Einleiten der Verjüngung festgelegt. Diese setzt ein, wenn die Bestandsdichte unter einen Schwellenwert fällt (z.B. wie in Abbildung 6 (A) 50%, dieser Wert kann vom Anwender geändert werden). Die mögliche Vollbestockung wird mit dem oben beschriebenen Ansatz zur Ermittlung der Bestandesdichte unter veränderten Klimabedingungen ermittelt.

Mit der zweiten Anforderung wird die Anzahl Bäume berechnet, die verjüngt werden. Dabei wird zuerst die maximale Obergrenze an Bäumen festgelegt, die verjüngt werden können. Diese Grösse wird vom Anwender gesteuert (z.B. 1000/ha).

Der tatsächliche Anteil der zu begründenden Bäume wird anschliessend über die Bestockungsdichte festgelegt (Abbildung 6 (A)). Diese folgt einer linearen Funktion zwischen dem Wert 0 beim Schwellenwert der Bestockung und 1, wenn die Bestockung weniger als 25 % beträgt. Wie in Abbildung 6 (A) ersichtlich, würde in diesem Fall ein Bestand mit 45% der möglichen Bestockung in der Lage sein, nur lediglich 20% der maximalen Anzahl an Bäumen zu begründen.

Zusätzlich hängt die Anzahl der zu begründenden Bäume vom viability score ab (Abbildung 6 (B)). In diesem Fall wurde der viability score für Werte zwischen 0 (< 0.4) und 1 (> 0.8) skaliert. Fallen die Werte unter 0.4, werden keine Bäume begründet, ist der viability score hingegen grösser als 0.8, werden alle möglichen Bäume begründet.

Die mögliche Anzahl an zu verjüngenden Bäumen ergibt sich schlussendlich aus dem Produkt des Wertes für die Obergrenze an Bäumen, dem Werte für die Bestockung und dem viability score. Beträgt z.B. die Obergrenze der zu begründenden Bäume 1000/ha, die Bestockung 35% und der viability score ist 1, werden rund 600 Bäume verjüngt (grün gestrichelte Linie). Beträgt der viability score hingegen 0.6, werden lediglich 300 Bäume/ha verjüngt (gelb gestrichelte Linie) und bei einem Wert von 0.4 und weniger, findet überhaupt keine Verjüngung mehr statt.

In der dritten Anforderung wird der Anteil der Verjüngung auf die Baumarten aufgeteilt. Dabei werden alle Baumarten mit viability scores unter 0.4 ignoriert. Für die verbleibenden Baumarten wird die Anzahl der Bäume, die verjüngt werden, proportional zu ihrem jeweiligen viability score aufgeteilt. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis des jeweiligen viability score der Baumart und der Summe aller Baumarten.

Der Vorteil dieses Ansatzes von Climate-FVS besteht darin, dass das Modell im Kern weiterhin auf den ursprünglichen Modellgleichungen wie FVS basiert. Diese wurden für die Abbildung der Auswirkungen des Klimawandels lediglich modifiziert und nicht ersetzt. Dadurch bleiben die primären inneren Komponenten von FVS und seine empirische Basis intakt.

Ein wesentlicher Nachteil besteht in der umfangreichen empirischen Datenbasis, die für die Herleitung des species viability scores notwendig ist. Sowohl die Bestimmung der Mortalität und die Herleitung der Verjüngung in Climate-FVS verlassen sich auf den species viability score. Dieser beruht auf tausenden empirischen Beobachtungen über die Anwesenheit und Abwesenheit einer Art in bestimmten ökologischen Nischen. Diese empirische Basis bedarf insbesondere für eine hinreichend genaue Abbildung der klimabedingten Mortalität weitere Untersuchungen. Aber auch bei der Schätzung der Veränderungen der Wachstumsraten, insbesondere für deren genetische Komponenten, sind zusätzliche Untersuchungen notwendig. Der Einfluss des Klimas auf das Wachstum wird in Climate-FVS bislang jedoch wichtiger als der Faktor Mortalität angesehen. Dennoch würde eine Verbesserung die Zuverlässigkeit des Modells und seiner Aussagen erhöhen. Dies erfordert jedoch die Durchführung von weiteren Tests sowie die Sammlung und Analysen von Daten vieler Wachstumsmessungen in Situationen, in denen die Bäume von einer Provenienz an verschiedene klimatische Regimes bewegt werden.

6.1.4.2 FVSBGC

Im zweiten Ansatz zur Abbildung des Klimas in FVS wird das physiologische Modell STAND-BGC als eine Systemerweiterung mit FVS im Sinne eines Hybridmodells verknüpft. Durch die Verknüpfung kann ein FVS Benutzer das Modell STAND-BGC aufrufen, um zu den Standardausgaben aus FVS zusätzlich physiologische Aussagen zum Einzelbaum oder Bestand zu erhalten. Zusätzlich kann ein Anwender entscheiden, ob er die vom Modell FVS generierten Durchmesser- und Höhenzuwächse sowie die Kronenverhältnisse und Mortalität durch STAND-BGC ersetzt haben möchte. Diese Option ersetzt im Wesentlichen den empirischen Wachstumsmotor von FVS mit dem physiologischen Motor von STAND-BGC (Milner et al. 2003).

STAND-BGC

Das Modell STAND-BGC ist eines von mehreren Ablegern des physiologischen Bestandesmodells FOREST-BGC von Running and Coughlan (1988). Das Modell ist ein ganzheitliches distanzunabhängiges Einzelbaummodell. Der Begriff der "Ganzheit" wird verwendet, weil STAND-BGC neben Bäumen auch das Wachstum von Sträuchern und Gras simuliert. Letztere beiden werden als Einheiten pro Flächen beschrieben, wohingegen Bäume einzeln abgebildet werden.

STAND-BGC ist ein vom Klima angetriebenes Kohlenstoff- und Wasserhaushalts-Modell, das zur Simulation des Wachstums einen Blattflächen-Ansatz verwendet. Die stomatäre Leitfähigkeit, Netto Photosynthese, Transpiration und Atmung werden in Tagesschritten berechnet. Die Kohlenstoffallokation wird in Jahresschritten berechnet. Wesentliche Eingangsgrößen sind die Angaben über die tägliche Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Temperatur. Sie treiben die physiologischen Prozesse im Modell an, die wiederum durch den Übershirmungsgrad, die vertikale Kronenausdehnung und die Baumart beeinflusst werden. Zusätzlich spielt der Bodenwasserhaushalt eine wichtige Determinante für die Netto-Photosynthese. Der Kronenraum wird in Form von mehreren Kronenlagen simuliert, welche die verschiedenen Schichten im Bestand repräsentieren. Am Ende eines jeden Simulationsjahres wird der Netto-Kohlenstoff auf die Blattfläche, Stamm und Wurzelmasse anhand von Allokati-

onsfunktionen aufgeteilt. Die Kohlenstoffgewinne oder -verluste werden in Biomasse umgerechnet, anhand derer wiederum die Baumdimensionen abgeleitet werden (Milner et al. 2003).

Modellverknüpfung

Die Verknüpfung zwischen den beiden Modellen wird erreicht, indem STAND-BGC zu einer Erweiterung des Modells FVS wird (Abbildung 7). Dabei laufen die beiden Modelle quasi parallel und tauschen am Ende eines Simulationszeitraums in FVS (alle 10 Jahre) Zustandsvariablen, wie die Dimension der Bäume und die entsprechenden Zuwächse aus.

Zu Beginn eines jeden Zyklus in FVS werden die Informationen von FVS auf STAND-BGC übertragen. Die Informationen umfassen u.a. Variablen für die Programmsteuerung (z.B. die Zyklusnummer in FVS, aktueller Durchforstungsstatus), die Bodenvegetation (z.B. Sträucher) sowie Informationen zum Einzelbaum wie Baumart, Aufnahmenummer, BHD, Höhe, Kronenverhältnis und Anzahl Bäume pro Hektar.

Im Anschluss simuliert STAND-BGC das Waldwachstum für den gleichen Zeitraum wie in einem FVS Zyklus. Parallel erfolgt für dieselben Bäume die Simulation mit FVS. Wenn in beiden Modellen ein Zyklus simuliert wurde, erfolgt ein vom Benutzer kontrollierter Austausch. Dabei werden die Ergebnisse von STAND-BGC wieder an FVS übertragen und es können die Ergebnisse von STAND-BGC anstelle derer von FVS verwendet werden. Im Anschluss wird STAND-BGC mit der aktualisierten Baumliste aus FVS neu gestartet und die beiden Modelle setzen die Simulation fort. Dieser einfache Austausch erlaubt es dem Anwender, den empirischen Wachstumskern in FVS mit dem physiologischen Kern aus STAND-BGC auszutauschen.

Werden die Ergebnisse von STAND-BGC für die Aktualisierung der Baumliste herangezogen, wird STAND-BGC mit der gleichen Baumliste neu gestartet, mit der es den Zyklus beendet hat. Die FVS Ausgaben spiegeln dann allein das Wachstum der Bäume vom physiologischen Modell. In diesem Modus bietet FVS die Möglichkeit: 1) Objekte in STAND-BGC einzuführen (z.B. Bäume und Sträucher), 2) waldbauliche Behandlungsmöglichkeiten zu simulieren (Durchforstung und Pflanzung), 3) Ergebnisse anhand von FVS üblichen Ausgabedateien zusammenzufassen (wie Sortimentseinteilung, Indizes für Bestandesdichte (SDI), Konkurrenz (CCF) und Kronenstruktur, usw.) und 4) die Möglichkeit zur Simulation von Störungen (Insekten und Pathogene) im Bestand, sowohl vor als auch nachdem der Bestand in STAND-BGC simuliert wurde.

Falls nicht die simulierten Zuwächse von STAND-BGC verwendet werden, bleiben die Ausgaben von FVS unverändert von dessen Einfluss. Die Simulation von FVS verhält sich dann, als ob es keine Verknüpfung zu STAND-BGC gibt. Das physiologische Modell läuft aber dennoch parallel und wird mit den Baumlisten aus FVS zu Beginn eines jeden Zyklus gestartet (Milner et al. 2003).

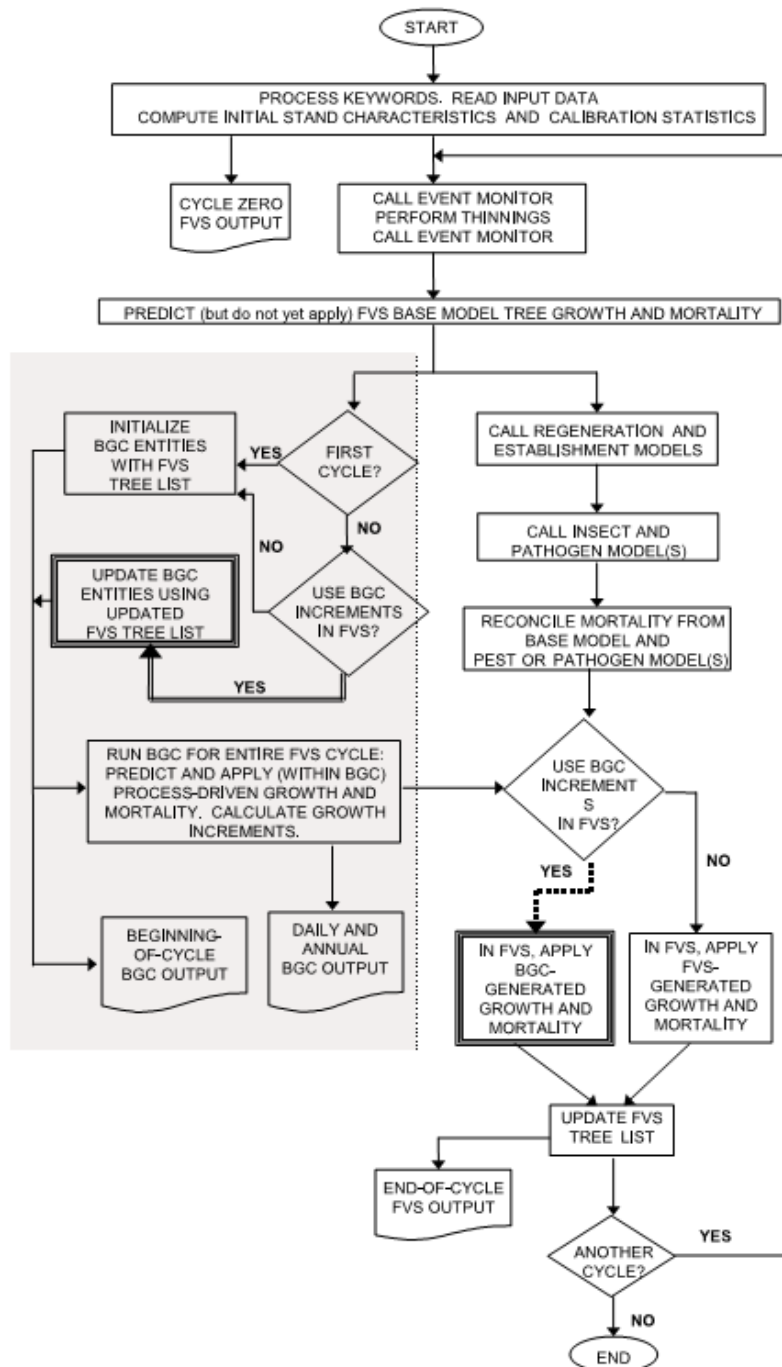


Abbildung 7: Ablaufschema des Hybridmodells FVSBGC (Milner et al. 2003).

Die Verknüpfung der beiden Modelle bietet somit die Möglichkeit darzustellen, wie das Klima das Bestandeswachstum beeinflusst. Umfangreiche, der Parametrisierung von STAND-BGC zugrundeliegende ökophysiologische Forschung macht es möglich, dass für die meisten der verschiedenen Prozess-Koeffizienten keine zusätzlichen Eingabewerte erforderlich sind. Darüber hinaus kann STAND-BGC aufgrund der Verknüpfung mit FVS mit gängigen Daten von Waldinventuren initialisiert werden. Außerdem können innerhalb von FVS waldbauliche Behandlungen sowie Verjüngung und/oder Begründung einer Strauchschicht simuliert werden, bevor die Einzelbauminformationen an STAND-BGC übertragen werden. Die Verknüpfung der beiden Modelle bietet dem Benutzer daher die Vorteile beider Modellarten (Milner et al. 2003).

6.1.5 Fazit

Die Betrachtung der Ansätze zur Abbildung des Klimas haben gezeigt, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, um den Einfluss veränderter Umweltbedingungen auf das Wachstum der Bäume in Managementmodellen zu berücksichtigen. Allein bei den vier betrachteten Modellen PrognAus, SILVA, MOTTI und FVS lassen sich vom Grundansatz her drei verschiedene Varianten unterscheiden.

- 1) Einbringung zusätzlicher klimatischer Variablen (v.a. Temperatur und Niederschlag) in bestehende Modellalgorithmen und -komponenten
- 2) Schätzung des Höhenzuwachses auf Basis eines Standortleistungsmodells ähnlich den Lösungsansätzen von Gap-Modellen
- 3) Erweiterung des empirischen Modells um ein Prozessmodell im Sinne eines Hybridansatzes

Der erste Ansatz wird z.B. beim Modell PrognAus verfolgt. Dabei werden das Höhenzuwachsmo- dell sowie das Grundflächenzuwachsmo- dell um die klimatischen Variablen Temperatur und Niederschlag erweitert. Auf ähnliche Weise wird das Klima auch im Modell FVS Climate berücksichtigt. Dort wird jedoch nicht direkt der Wachstumsalgorithmus selbst erweitert, sondern die Oberhöhenbonität wird mit dem Klima verknüpft, um die veränderten Wachstumsraten darzustellen. Gegenüber PrognAus werden bei FVS Climate zusätzlich noch die Teilmodelle Mortalität sowie Verjüngung mit klimatischen Variablen in Verbindung gebracht. Dies geschieht über einen sogenannten viability score, welcher die Lebenswahrscheinlichkeit von Baumarten, bzw. die Anwesenheit oder Abwesenheit einer Spezies bei bestimmten Klimavariablen beschreibt. Der wesentliche Vorteil dieses ersten Ansatzes besteht darin, dass die Modelle im Kern weiterhin auf den ursprünglichen Modellalgorithmen beruhen. Diese werden lediglich modifiziert und nicht ersetzt, wodurch die primären empirischen Komponenten intakt bleiben. Der Nachteil besteht in der umfangreichen empirischen Datenbasis, die für die Parametrisierung und Herleitung der Funktionen notwendig ist. Zudem sind Modellprognosen im Randbereich des zugrundeliegenden Datensatzes mit Unsicherheiten verbunden.

Bei der im Modell SILVA angewandten zweiten Variante, wird der potenzielle Höhenzuwachs anhand eines Ansatzes geschätzt, der ähnlich zu dem von Gap-Modellen ist. Gap-Modell werden speziell für die Beschreibung der Auswirkungen langfristiger Klimaänderungen auf die Walddynamik angewandt (vgl. Kapitel 4.2.4). In SILVA wird der Einfluss des Klimas auf das Baumwachstum anhand von neun Standortsfaktoren mittels unimodaler Dosis-Wirkungs-Funktionen in Werte zwischen 0 und 1 (Optimum für eine Baumart) transformiert. Die Werte werden anschliessend zu ökologisch signifikanten Standortvariablen verknüpft und bestimmen den Verlauf einer potenziellen Höhenwachstumskurve. Der Nachteil dieses „Gap-Ansatz“ besteht darin, dass wie beim vorherigen beschriebenen Ansatz, eine Abschätzung der Klimafolgen wiederum nur solange möglich ist, wie die Klimaszenarien die durch die Daten der Parametrisierung abgebildeten klimatischen Konditionen nicht überschreiten. Dem höheren Bedarf an Eingangsinformationen kann begegnet werden, indem ein Teil der notwendigen Eingangswerte standardisiert (z.B. Konzentrationen für CO₂ und NO_x) bzw. über Wuchsbezirkszugehörigkeiten sowie anhand der Höhe über dem Meer, der Geländeneigung und der Exposition abgeleitet werden. Dadurch ist auch eine Simulation für Bestände möglich, für die nicht alle Eingangsdaten vorhanden sind.

Der dritte Ansatz, bei dem ein empirisches Modell um ein Prozessmodell im Sinne eines Hybrid erweitert wird, findet beim Modell MOTTI und beim Model FVSBGC Anwendung.

Beim Modell MOTTI wird dabei zur Abbildung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum über entsprechende Vorhersagen aus dem physiologischen Prozessmodell FinnFor das

Wachstum angepasst. Diese Verbindung wird anhand von baumartspezifischen Transferfunktionen erreicht. Diese beschreiben den durch das Klima erhöhten Volumenzuwachs in Abhängigkeit von einem Anstieg der CO₂-Konzentration, der Temperatur, der Bestandesdichte und der Konkurrenzsituation eines Baumes im Bestand sowie verschiedener Standortseigenschaften. Als Transfervariable wird der Volumenzuwachs des Stammes herangezogen. Die durch das Klima hervorgerufene Veränderung im Volumenzuwachs wird mit FinnFor simuliert. Für die Einbindung in MOTTI wird aus dem Volumen der veränderte Höhenzuwachs abgeleitet, welcher wiederum in den site-index eingebracht wird. Simulationen zum Volumenzuwachs wurden vorweg für verschiedene definierte Kombinationen von mittleren Temperaturerhöhungen und CO₂-Konzentrationen mit FinnFor durchgeführt. Dadurch ist der Hybridansatz von MOTTI in der Lage, alleine mit dem empirischen Modell Vorhersagen über das Wachstum unter Klimaveränderungen zu treffen, ohne dass Berechnungen im Prozessmodell notwendig sind. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass der Anwendungsbereich auf die vordefinierten Variationen im Klima und deren Umweltbedingungen begrenzt ist.

Beim Modell FVSBGC wird das physiologische Modell STAND-BGC hingegen als eine Systemerweiterung mit FVS verknüpft. Dabei laufen die beiden Modell quasi parallel und tauschen am Ende eines Simulationszeitraums Zustandsvariablen, wie die Dimension der Bäume und ihre entsprechenden Zuwächse aus. Der Austausch wird dabei vom Anwender kontrolliert. Er entscheidet, ob die Ergebnisse von STAND-BGC oder die von FVS verwendet werden sollen. Dieser einfache Austausch erlaubt es, den empirischen Wachstumskern in FVS mit dem physiologischen Kern aus STAND-BGC auszutauschen.

Neben diesen beiden dargestellten Varianten eines Hybridmodells, bei denen jeweils ein managementbasiertes Ertragsmodell und ein physiologisches Prozessmodell miteinander verknüpft werden, gibt es auch noch Hybridmodelle, bei denen Konzepte aus der empirischen Modellierung und der Prozessmodellierung in einem Computercode als ein Modell verkörpert werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Der Vorteil der beiden dargestellten Varianten liegt jedoch darin, dass die innere Dynamik des vertrauten und vorhandenen statistischen Modells weiterhin verfolgt werden kann, wenn der Einfluss des Klimas auf das Wachstum bei der Simulation berücksichtigt wird. Gleichzeitig wird auf diese Weise auch die Kompatibilität mit den Wachstumsprognosen unter den derzeitigen Klimabedingungen sowie den dazugehörigen Modellkomponenten beibehalten.

Eine abschliessende Beurteilung und Empfehlung, welcher der Ansätze am besten ist, um managementbasierte Ertragsmodelle nachträglich klimasensitiv zu machen, kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Die verschiedenen Ansätze haben jeweils Vor- und Nachteile. Die Entscheidung, welcher Ansatz verfolgt werden sollte, ist zudem immer auch abhängig vom vorhandenen Modell, vom entsprechenden Anwendungsgebiet (Forschung, Praxis oder Lehre), der Verfügbarkeit von Daten für die Parametrisierung sowie der Präferenzen der Modellentwickler. Die Betrachtung der obigen Beispiele hat jedoch gezeigt, dass es verschiedene Möglichkeiten zur Abbildung des Klimas gibt und dass bei Bedarf eine vertiefende Literaturstudie lohnenswert sein kann.

6.2 AHP-Analyse

Die AHP-Analyse ist der zentrale Teil der Endauswahl. In der Analyse werden die Modelle BWINPro, MOSES, SILVA und PrognAus berücksichtigt. Diese Modelle wurden aufgrund der Anforderungen in der Vorauswahl für potenziell geeignet befunden. Die AHP-Analyse umfasst folgende Schritte, Definition von Nutzenkriterien und einer Entscheidungshierarchie auf Basis eines detaillierten Anforderungs-

rungskatalogs (Kapitel 6.2.1), Berechnung der Nutzenprioritäten für die vier Modelle mittels paarweiser Vergleiche (Kapitel 6.2.2) und Ermittlung der Konsistenz und Sensitivität der durchgeführten paarweisen Vergleiche (Kapitel 6.2.3).

6.2.1 Nutzenkriterien und Entscheidungshierarchie

Ausgehend vom Evaluationszweck, der Ermittlung eines klimasensitiven Waldwachstums- und Behandlungsmodells, wurde ein detaillierter Anforderungskatalog definiert, den es bei der Beschreibung und Bewertung der Modelle zu berücksichtigen gilt. Der Anforderungskatalog orientiert sich an der Empfehlung von Pretzsch et al. (2002b) zur einheitlichen und standardisierten Beschreibung von Waldwachstumssimulatoren und ergänzt die in Kapitel 5.1 berücksichtigten Grobanforderungen. Die darin enthaltenen Anforderungen bilden gleichzeitig die Nutzenkriterien der AHP-Analyse. Die Nutzenkriterien wurden anschliessend mit Hilfe eines Entscheidungsbaums hierarchisch strukturiert (vgl. Abbildung 8). Der Entscheidungsbaum gliedert sich in acht Hauptkriterien: Modellansatz, Anwendungsbereich, Gültigkeitsbereich, Eingabemöglichkeit, Wachstum, Ausgabe, Umwelteinflüsse und Software. Diese acht Hauptkriterien unterteilen sich wiederum in eine Reihe von Unterkriterien. Das Modell, welches alle Kriterien bestmöglich erfüllt, stellt für den genannten Evaluationszweck das ideale Modell dar. Nachfolgend werden die ausgewählten Kriterien kurz erläutert.

Modellansatz

- **räumliche Auflösung:** Das Modell sollte einen einzelbaumabhängigen Ansatz zur Beschreibung des Bestandes aufweisen, entweder unter Berücksichtigung der Baumposition durch Koordinaten (distanzabhängig) oder ohne Einzelbaumkoordinaten (distanzunabhängig). Dies ermöglicht die Simulation von einzelbaumorientierten Nutzungsstrategien, die vor allem in der Dauerwaldbewirtschaftung von Bedeutung sind. Zusätzlich sind detailliertere Aussagen über die strukturelle Entwicklung der Bestände möglich, die vor allem für ökologische Bewertungen von Interesse sind.
- **Altersabhängigkeit:** Vielfach wird die Oberhöhenbonität in einem bestimmten Alter für die Einschätzung der Standortsgüte herangezogen (im Alter 50 oder 100 Jahre), wie dies auch bei der Ertragstafel der Fall ist. Hierzu ist eine Altersbestimmung des Bestandes notwendig. Bei gleichaltrigen einschichtigen Beständen stellt dies kein Problem dar. Bei ungleichaltrigen strukturierten und gemischten Beständen ist eine Altersschätzung hingegen erschwert, wenn nicht sogar unmöglich. Ein altersunabhängiger Modellansatz ist daher von Vorteil.

Anwendungsbereich

- **waldbauliche Variantenstudien:** Das „Durchspielen“ von waldbaulichen Variantenstudien dient zur Ermittlung der mengenmässigen, monetären und strukturellen Auswirkungen auf den ausscheidenden sowie den verbleibenden Bestand infolge unterschiedlicher Behandlungsstrategien. Ausgehend von den Resultaten kann das ideale waldbauliche Verfahren zur Erfüllung der vorgegebenen Zielvorstellung ausgewählt werden.
- **Fortschreibungen von Beständen:** Einzelne Bestände sollten, wie bei der Ertragstafel, über mehrere Bewirtschaftungszyklen (5-10 Jahre) hinweg simuliert werden können.
- **geeignet für Forschung sowie Praxis und Lehre:** Das Modell soll in erster Linie zu Forschungszwecken verwendet werden, gleichzeitig soll es aber die Voraussetzung bieten, zukünftig auch in der forstlichen Praxis sowie in der Lehre einsetzbar zu sein.

Gültigkeitsbereich

- **Regionalbezug / Standortsbereich:** Eine Übertragung des Modells auf die Schweiz und dessen Anwendung für die verschiedenen Regionen und Standorte muss möglich sein. Durch eine Parametrisierung anhand der Daten von langfristigen Versuchsflächen und des Landesforstinventars kann das Modell zudem optimal an die Schweiz angepasst werden.
- **Mischungstypen und Bestandesaufbau:** Neben der Abbildung von gleichaltrigen Hochwäldern, müssen auch gemischte sowie ungleichaltrige, strukturierte Bestände abgebildet werden können.
- **abgedeckte Behandlungsvarianten:** Die wesentlichen Behandlungsvarianten müssen abgebildet werden können, wie Z-Baum-Durchforstung, Zielstärkennutzung, Hoch- und Niederdurchforstung, Pflanzung
- **verfügbare Baumarten:** Abbildung der wesentlichen Hauptbaumarten in der Schweiz, hierzu zählen Fichte, Tanne, Föhre und Lärche sowie Buche, Ahorn, Esche und Eiche.

Eingabemöglichkeiten

- **Flächenform und Grösse:** Neben der Darstellung des Bestandes als standardisierte quadratische Fläche, wäre es von Vorteil, wenn auch selbstdefinierte Flächen in Form von Polygonen für eine realitätsnahe Darstellung des Bestandes erzeugt werden können.
- **Eingabeinformation aus Stichprobe/Inventur:** Das Modell kann mit Eingangsinformationen betrieben werden, die über eine Stichprobe oder Inventur zur Verfügung gestellt werden und somit in der Praxis leicht zu erheben sind.
- **Erzeugung fehlender Informationen:** Es sollte eine Routine vorhanden sein, die lückenhafte Eingangsinformation ergänzt, damit eine Simulation auch mit unvollständigen Informationen durchgeführt werden kann. Hierzu zählt z.B. die Ergänzung von Baumkoordinaten bei einem distanzabhängigen Ansatz oder die Erzeugung einer BHD-Verteilung.

Wachstum (Teilmodelle)

Unter der Rubrik Wachstum werden die folgenden 6 Kriterien zusammengefasst:

- **Höhenwachstum**
- **Dickenwachstum**
- **Kronenmodell**
- **Mortalitätsmodell**
- **Verjüngung / Einwuchs**
- **Erfassung des Standorts**

Ein Wachstumsmodell setzt sich in der Regel aus Algorithmen zur Nachbildung der Stamm-, Kronen- und Verjüngungsentwicklung sowie der Mortalität zusammen. Das gesuchte Modell sollte diese Algorithmen umfassen, um das Bestandeswachstum in seiner strukturellen Entwicklung abbilden zu können. Wie die einzelnen Wachstumsalgorithmen umgesetzt werden, kann über verschiedenste Ansätze geschehen (siehe Kapitel 4.3). Gleichzeitig ist eine Erfassung der Standortseigenschaften notwendig, um die unterschiedlichen örtlichen Wuchsverhältnisse berücksichtigen zu können. Neben der vielfach verwendeten Oberhöhenbonität, gibt es auch Ansätze, die den Einfluss des Standorts über die Bodeneigenschaften sowie die vorherrschenden Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse beschreiben. Diese sind oftmals altersunabhängig und somit in ungleichaltrigen Beständen gegenüber der Oberhöhenbonität klar von Vorteil.

Ausgaben

Die Modelle liefern in der Regel Ausgaben zu den nachfolgenden Kriterien. Diese ermöglichen neben einer rein forstwirtschaftlichen Analyse von unterschiedlichen Behandlungsstrategien auch eine Bewertung von ökologischen Aspekten sowie der Erholungsleistung.

- **Baumlisten / Einzelbauminformationen:** Baumart, Alter, Höhe, BHD, Zuwachs, Volumen, Schlankheitsgrad h/d , Kronenansatz, Kronenbreite, Kronenprozent, Koordinaten
- **Bestandeskennwerte pro Hektar:** Grundflächenmittelstamm, Höhe des Grundflächenmittelstammes, Oberhöhe des Bestandes (H100; H50), Stammzahl, Grundfläche, Volumen, Stammzahl des ausscheidenden Bestandes, Grundfläche des ausscheidenden Bestandes, Volumen des ausscheidenden Bestandes sowie Bestockungsgrad und Baumartenzusammensetzung
- **ökonomische Kennwerte pro Hektar:** Erntefestmeter, Sortimentseinteilungen, Holzerlöse, Holzerntekosten
- **Strukturcharakteristika auf Bestandes- und Betriebsebene:** werden über verschiedene Struktur- und Baumart-Indizes beschrieben
- **Biomassefraktionen pro Hektar:** Schaftbiomasse, Rindenbiomasse, Astbiomasse, Nadelbiomasse, Wurzelbiomasse

Umwelteinflüsse

Waldökosysteme sind offene Systeme, d.h. sie sind von externen Faktoren abhängig und können von diesen beeinflusst werden. Ein Waldwachstumsmodell sollte den Einfluss solcher Faktoren auf das Baum- und Bestandeswachstum berücksichtigen können.

- **Abbildung von Störungen:** wie z.B. Windwurf, Schneebruch, oder Käferkalamitäten
- **Klimasensitivität:** Von besonderer Bedeutung ist die Möglichkeit zur Simulation des Einflusses eines Temperaturanstieges auf das Baum- und Bestandeswachstum sowie des Einflusses von sich ändernden Niederschlagsverhältnissen (Trockenheit). Das Modell sollte im Idealfall bereits einen solchen Ansatz enthalten bzw. um einen solchen erweiterbar sein.

Software

- **Verfügbarkeit des Programmcodes:** Um ein Modell für eigene Forschungszwecke verwenden zu können, ist es erforderlich, dass der Programmcode frei zur Verfügung gestellt wird. Dadurch sind die Abläufe innerhalb des Modells ersichtlich und die Herleitung der Resultate kann nachvollzogen werden. Gleichzeitig kann das Modell verändert oder Teile davon entnommen werden.
- **modularer Aufbau:** Ein modularer Aufbau bietet den Vorteil, dass bei notwendigen Änderungen nicht das komplette Modell überarbeitet werden muss, sondern nur das jeweils betroffene Modul, da die einzelnen Komponenten über fest definierte Schnittstellen miteinander interagieren. Gleichzeitig können so auch einzelne Module durch selbst entwickelte Modelle leicht ausgetauscht oder ergänzt werden.
- **Dokumentation:** Eine ausführliche Dokumentation des Modells mit einer Erläuterung der zugrundeliegenden Funktionalitäten, Modellgleichungen und Parametern sowie evtl. einer Benutzeranleitung, ist für einen detaillierten Einblick in das Modell von Bedeutung. Dies trägt wesentlich zum Verständnis des Modellansatzes bei.

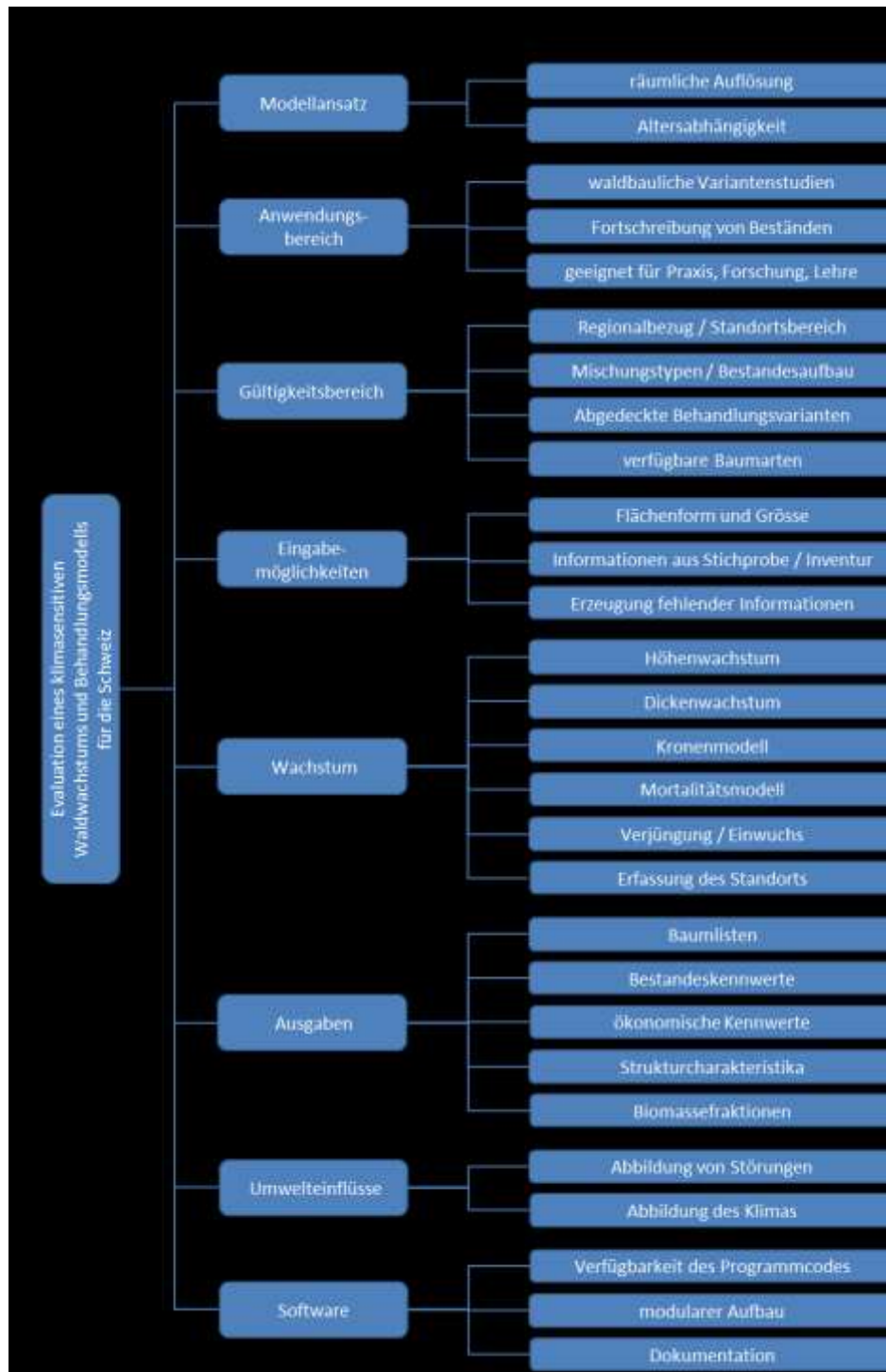


Abbildung 8: Entscheidungsbaum der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten AHP-Analyse.

Für die einzelnen Unterkriterien wurden für die vier Modelle die notwendigen Informationen zusammengetragen. Diese dienen als Entscheidungsgrundlage für den paarweisen Vergleich. Die Informationen stammen aus den Literaturen zu den Modellen (siehe Kapitel 5.1) sowie aus entsprechenden Internetquellen⁴. Die nachfolgenden vier Tabellen stellen die Informationsgrundlage der AHP-Analyse gesondert für die vier Modelle dar.

⁴ <http://www.wwk.forst.wzw.tum.de/research/methods/modelling/silva/> (30.11.2012)

Tabelle 17: Entscheidungsinformationen der AHP-Analyse für das Modell BWINPro.

1.1 räumliche Auflösung	distanzabhängiges Einzelbaummodell
1.2 Altersabhängigkeit	altersabhängig
2.1 waldbauliche Variantenstudien	ForestSimulator: zur Simulation und Analyse von einzelnen Beständen WaldPlaner: zur Simulation, Analyse und Optimierung im Forstbetrieb
2.2 Fortschreibung von Beständen	Das Modell arbeitet in 5-Jahres Schritten. Eine Simulation von mehr als 30 bis 40 Jahren wird jedoch nicht empfohlen, da die Ergebnisse mit einem höheren Fehler belastet sein können.
2.3 geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	geeignet für Praxis, Forschung und Lehre
3.1 Regionalbezug / Standortsbereich	Die Gültigkeit erstreckt sich auf Nordwestdeutschland, basierend auf Daten von langfristigen Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Mittels vorgefertigter Skripte, die im Statistik-Programm R geschrieben sind, können eigene regionale Versionen erstellt werden, indem die Funktionen anhand eigener Versuchsflächendaten parametrisiert werden.
3.2 Mischungstypen / Bestandesaufbau	gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
3.3 abgedeckte Behandlungsvarianten	Z-Baum-Auswahl (interaktiv und automatisch), Schutz von Bäumen ab einem vorgegebenen BHD (für Naturschutz), Minderheitenschutz (biologische Vielfalt), Habitatbaumauswahl, Zielstärkennutzung, Schirmschlag, Kahlschlag, Niederdurchforstung, Pflanzung
3.4 verfügbare Baumarten	voll parametrisiert: Eiche, Buche, Fichte, Douglasie, Waldföhre; weitgehend parametrisiert: Roteiche, Esche, Bergahorn, Elsbeere, Moorbirke, Roterle (Schwarzerle), Küstentanne, Europäische Lärche, Japanische Lärche; teilweise parametrisiert: Hainbuche, Winterlinde, Kirsche, Elsbeere, Weisstanne
4.1 Flächenform und Grösse	Ein neuer Bestand wird erzeugt, in dem die Flächengrösse eingegeben und festgelegt wird, ob der Bestand basierend auf einer quadratischen oder kreisförmigen Probefläche erzeugt werden soll. Die Bestandesfläche wird über Eckpunkte (max. 200) in Form eines Polygonzuges definiert.
4.2 Information aus Stichprobe / Inventur	Es können Probekreise analysiert werden, die im Rahmen einer Betriebsinventur aufgenommen wurden.
4.3 Erzeugung fehlender Informationen	Das Modell verfügt über eine Datenergänzungsroutine zur Erzeugung von Beständen: Durchmesserverteilungen, Ergänzung fehlender Höhenwerte, Kronenansätze und Kronenbreiten, Erzeugung fehlender Baumpositionen.
5.1 Höhenwachstum	Die Bestimmung des Höhenzuwachses erfolgt über die Schätzung des potenziellen relativen Höhenzuwachses eines Baumes aus der Oberschicht.
5.2 Dickenwachstum	Potenzialunabhängiger Zuwachs: der Durchmesserzuwachs wird als logarithmierter Grundflächenzuwachs des Einzelbaums in m ² berechnet, der daraufhin programmintern in den Durchmesserzuwachs umgerechnet wird.
5.3 Kronenmodell	Die Kronenveränderung erfolgt über statische Funktionen für Kronenansatz und die Kronenbereite. Die Konkurrenz wird über den Kronen-Konkurrenz-Index c66 bestimmt.
5.4 Mortalitätsmodell	Das Modell berücksichtigt eine dichte- und eine altersbedingte Mortalität. Die dichtebedingte Mortalität wird über die maximale Bestandesdichte ermittelt. Alternativ kann sie auch über den Kronenschlussgrad hergeleitet werden. Bei der altersbedingten Mortalität unterliegen die Bäume einer abnehmenden Überlebenswahrscheinlichkeit, wenn sie ein vorgegebenes Alter überschritten haben (vgl. Tabelle 9).

5.5 Verjüngung / Einwuchs	Der Einwuchs von neuen Bäumen wird über Verjüngungsschichten geregelt. Diese können entweder direkt eingegeben oder automatisch generiert werden. Bei der automatischen Routine legt das Submodell Verjüngung fest, ob und wie viel von welcher Baumart sich als Verjüngung einstellt und wie viel davon in Einwuchs (> 7 cm BHD) übergeht
5.6 Erfassung des Standorts	Oberhöhenbonität im Alter 100
6.1 Baumlisten	Es kann eine Liste mit Einzelbaumdaten erzeugt werden. Diese umfassen u.a. folgende Informationen: Baumart, Alter, Höhe, Kronenansatz, Kronenbreite, Kronenprozent, Schlankheitsgrad, Volumen Derbholz, Konkurrenzsituation, Bonität im Alter 100.
6.2 Bestandeskennwerte	Nach einer Simulation werden getrennt nach Baumarten die wichtigsten Bestandeskennwerte zusammengefasst: Alter, Grundflächenmittelstamm, Höhe des Grundflächenmittelstammes, Grundflächenmittelstamm der 100 stärksten Stämme, Stammzahl, Grundfläche, Volumen Derbholz, Stammzahl/Volumen/Grundfläche des ausscheidenden Bestandes, Mischungsanteil, Bestockungsgrad.
6.3 ökonomische Kennwerte	Sortimentierung, Holzerlöse: Die Sortimentierung ist unabhängig vom Wachstumssimulator nutzbar.
6.4 Strukturcharakteristika	Folgende Bestandesstrukturwerte werden ausgegeben: Anzahl Arten, Shannon-Index, Artenprofilindex, Prozent der Höhendurchmischung, Prozent der Durchmesserdurchmischung, Prozent der Artendurchmischung.
6.5 Biomassefraktionen	Im Rahmen der Sortierung werden auch die Biomasse, die wichtigsten Nährstoffe für die Sortimente und das Totholz für den ausscheidenden sowie für den verbleibenden Bestand berechnet.
7.1 Abbildung von Störungen	nein
7.2 Abbildung des Klimas	in Bearbeitung
8.1 Verfügbarkeit des Programmcodes	BWinPro wird über das Internet frei zur Verfügung gestellt. 2002 wurde es auf Basis des Projektes TreeGrOSS (Tree Growth Open Source Software) neu in der Programmiersprache Java programmiert. Hierfür wurden Softwarepakete aus dem Open Source Bereich verwendet. Dies bietet den Vorteil, dass die Software kostenfrei ist, der Sourcecode einsehbar und die Benutzer das Programm leicht verwenden und an ihre speziellen Bedürfnisse anpassen können.
8.2 modularer Aufbau	TreeGrOSS ist als objektorientierte Softwarekomponenten entwickelt und besteht aus mehreren Packages, mit denen eine Trennung von Programmoberfläche, Wachstumsmodell und Visualisierung erreicht wird. Dadurch lassen sich verschiedene spezielle Softwarelösungen erstellen. Der Benutzer kann den Simulator dadurch an seine Bedürfnisse anpassen.
8.3 Dokumentation	Gut bis sehr gut

Tabelle 18: Entscheidungsinformationen der AHP-Analyse für das Modell SILVA.

1.1 räumliche Auflösung	Distanzabhängiges Einzelbaummodell: der Bestand wird als dreidimensionales Mosaik von Einzelbäumen betrachtet. Die Definition von Konkurrenz und Eingriffen erfolgt über die dreidimensionale Raumbesetzung.
1.2 Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
2.1 waldbauliche Variantenstudien	Das Modell kann für die Entwicklung und Optimierung waldbaulicher Behandlungsstrategien eingesetzt werden (interaktiv und im Batch-Betrieb)
2.2 Fortschreibung von Beständen	möglich, interaktiv und im Batch-Betrieb, in 5-Jahresschritten
2.3 geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	geeignet für forstwirtschaftliche Praxis, Forschung und Ausbildung
3.1 Regionalbezug / Standortsbereich	Standort-Leistungsmodell ist von Norddeutschland bis zu den Schweizer Alpen gültig (basiert auf langfristigen Versuchsflächen aus Bayern, Niedersachsen und der Schweiz). Die übrigen Teilmodelle gelten hauptsächlich für Süddeutschland. SILVA bildet die Mehrzahl der forstlich und flächenmässig bedeutsamen Standorteinheiten ab, mit Ausnahme von Extremen wie Moore, Blockfelder, etc.
3.2 Mischungstypen / Bestandesaufbau	Prognostiziert das Wachstum von Rein- und Mischbeständen aller Alterszusammensetzungen. Die Bandbreite reicht von einschichtigen Reinbeständen bis hin zu Plenterwäldern.
3.3 abgedeckte Behandlungsvarianten	Niederdurchforstung, Hochdurchforstung, Auslesedurchforstung, Z-Baum-Verfahren und Zielstärkennutzung; die einzelnen Verfahren können im Hinblick auf Stärke, Eingriffszeitpunkte sehr flexibel definiert und untereinander kombiniert werden.
3.4 verfügbare Baumarten	Fichte, Tanne, Waldföhre, Buche und Eiche
4.1 Flächenform und Grösse	Simulation des Bestandes erfolgt als rechteckige Fläche. Die Flächen-grösse ist abhängig von der Bestandesdichte sowie der simulierten Anzahl an Bäumen.
4.2 Information aus Stichprobe / Inventur	Inventurschnittstelle: bietet die Möglichkeit zur Verarbeitung von Aufnahmedaten aus Probekreisen (konzentrisch oder einfach) oder Winkelzählproben.
4.3 Erzeugung fehlender Informationen	Räumliche Bestandesstruktur wird ggf. ergänzt über den Struktur-generator (SILVA-STRUGEN). Fehlende Baum- und Bestandeskennwerte werden über Tarif- und Modellfunktionen ergänzt.
5.1 Höhenwachstum	Potenzialabhängiges Wachstum
5.2 Dickenwachstum	Potenzialabhängiges Wachstum
5.3 Kronenmodell	Statisches Kronenmodell: Kronenansatz und Kronendurchmesser werden über die Variablen BHD und Baumhöhe hergeleitet. Die Nachbildung der Kronenform, Schätzung der Kronenansatzhöhe und des Kronendurchmessers werden für die räumliche Modellierung der Bestandesstruktur benötigt. Ausgehend davon werden Konkurrenzindizes und Bestandesstrukturindizes abgeleitet. Weiter dienen sie der Berechnung von Kronenmantelflächen, welche den laufenden Zuwachs mit beeinflussen.
5.4 Mortalitätsmodell	LOGIT Funktion: in Abhängigkeit vom Durchmesser und des erwarteten Grundflächenzuwachs wird die Überlebenswahrscheinlichkeit bestimmt.
5.5 Verjüngung / Einwuchs	Teilmodell Verjüngung
5.6 Erfassung des Standorts	Über baumartsspezifische unimodale Dosis-Wirkungsfunktionen werden 9 Standortvariablen aggregiert, die den Einfluss des Standorts auf das potenzielle Höhenwachstum beschreiben (Nährstoffgehalt des Bodens, NOx-Gehalt der Luft, CO ₂ -Gehalt der Luft, Länge der Vegetationszeit, Jahrestemperaturamplitude, mittlere Temp. der Vegetationszeit, Ariditätsindex nach de Martonne, Niederschlagssumme in der Vegetationszeit, Bodenfrische).

6.1 Baumlisten	Ausgabe der simulierten Entwicklung aller Bäume in Textdateien.
6.2 Bestandeskennwerte	Diagrammausgabe und Ausgabe in Textdateien, insgesamt liefert das Modell 17 Bestandeskennwerte zur Naturalproduktion.
6.3 ökonomische Kennwerte	Ermittlung der Wertentwicklung von Beständen basierend auf dem Sortimentssimulator (BDAT) sowie benutzerdefinierten Holzpreisen und Holzerntekosten.
6.4 Strukturcharakteristika	Kennwerte der Bestandesstruktur, Bestandesstabilität und Diversität (Clark-Evans-Index, Pielou-Index, Artprofil-Index, Artendurchmischung und Durchmesser differenzierung)
6.5 Biomassefraktionen	Werden über Schätzfunktionen aus Baumdimensionen hergeleitet.
7.1 Abbildung von Störungen	nein
7.2 Abbildung des Klimas	Simulation von Reaktionen auf veränderte Umweltbedingungen sind im Rahmen des durch die empirische Datenbasis vorgegebenen Umfangs möglich (siehe Erfassung des Standorts).
8.1 Verfügbarkeit des Programmcodes	nicht frei verfügbar, kein open source
8.2 modularer Aufbau	strukturiert in verschiedene Teilmodule
8.3 Dokumentation	Gut

Tabelle 19: Entscheidungsinformationen der AHP-Analyse für das Modell MOSES.

1.1 räumliche Auflösung	Distanzabhängiges Einzelbaummodell
1.2 Altersabhängigkeit	altersabhängig
2.1 waldbauliche Variantenstudien	möglich
2.2 Fortschreibung von Beständen	MOSESBatch ermöglicht die Forstschreibung von mehreren Beständen im Stapelbetrieb in 5-Jahresschritten. Die maximale Simulationslänge beträgt 40 Wachstumsperioden.
2.3 geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	MOSES wird vor allem in der Forschung und Praxis für die Analyse unterschiedlicher waldbaulicher Szenarien angewendet.
3.1 Regionalbezug / Standortsbereich	Das Modell basiert auf Daten langfristiger Versuchsflächen aus Österreich und der Schweiz.
3.2 Mischungstypen / Bestandesaufbau	Gleichaltrige sowie ungleichaltrige und gemischte Bestände
3.3 abgedeckte Behandlungsvarianten	Kahlschlag, Hochdurchforstung, Niederdurchforstung, Zufallsdurchforstung, Zielstärkennutzung (mittels interaktiver Auswahl der Bäume), Pflanzung
3.4 verfügbare Baumarten	Buche, Eiche, Sonst. Laubholz, Fichte, Waldföhre, Tanne, Zirbe, Lärche, sonst. Nadelholz
4.1 Flächenform und Grösse	Ausgehend von einer WZP oder Taxation wird ein rechteckiger Referenzbestand mit frei wählbarer Grösse vom Bestandesgenerator generiert. Eine Vollaufnahme des Bestandes sollte auf einer rechteckigen Fläche durchgeführt werden.
4.2 Information aus Stichprobe / Inventur	Ausgehend von Taxation oder Winkelzählprobe können mit Hilfe des Bestandesgenerators STANDGEN Bestände für die Simulation generiert werden
4.3 Erzeugung fehlender Informationen	STANDGEN generiert aus Durchmesser- und Strukturinformationen Einzelbaumkoordinaten. Der Strukturgenerator ermöglicht zudem die Nachbildung von gleichaltrig monospezifischen (Alterklassenwald) bis ungleichaltrig gemischten (Plenterwald) Beständen.
5.1 Höhenwachstum	Potenzialabhängiger Zuwachs, mit Hilfe von Oberhöhenkurven ermittelt
5.2 Dickenwachstum	Potenzialabhängiger Zuwachs, basierend auf BHD-Höhen-Beziehungen von Solitärbäumen
5.3 Kronenmodell	Periodische Änderung im Kronenprozent (CR) anhand der Berechnung von Kronenansätzen. Konkurrenz wird über CR, den Competition Index CI und den Überlappungsflächen der Kronenprojektionen zwischen den Bäumen abgebildet.
5.4 Mortalitätsmodell	LOGIT-Funktion: in Abhängigkeit des Competition Index (CI), Kronenprozent (CR) und Brusthöhendurchmesser wird die Absterbewahrscheinlichkeit bestimmt. Ob ein Baum stirbt oder nicht wird letzten Endes mit einer Zufallszahl bestimmt.
5.5 Verjüngung / Einwuchs	Submodell Verjüngung für alle Bäume kleiner als 1,4m: der Algorithmus prognostiziert die Wahrscheinlichkeit der Verjüngung, die Artzusammensetzung und Dichte der Verjüngung. Haben die Bäume eine Höhe von 1,4m erreicht, werden sie mit den Standard Wachstumsfunktionen simuliert.
5.6 Erfassung des Standorts	Regionaler site-index, Oberhöhenbonitäten im Alter 100
6.1 Baumlisten	Durch Anklicken eines Baumes in der Simulationsgrafik, können die Einzelbauminformationen abgefragt werden.
6.2 Bestandeskennwerte	Oberhöhe, laufender Zuwachs (Schaftholz, Derbholz), Lorey'sche Mittelhöhe, Grundflächenmittelstamm, h/d-Wert, Anzahl Bäume mit einem h/d > 80, Stammzahl, Grundfläche, Volumen (Schaftholz, Derbholz), Gesamtwuchsleistung, kumulierter Grundflächenzuwachs, mittlere Kronenansatz

6.3 ökonomische Kennwerte	Sortimentierung, Erntefestmeter, Holzerntekosten (Berechnung anhand von drei Holzerntesystemen), Erlös Sortimente, Erlös Waldhackgut
6.4 Strukturcharakteristika	Aggregationsindex und Durchmischungsindex
6.5 Biomassefraktionen	Schätzung von Biomassefraktionen: Schaftbiomasse, Wipfelbiomasse, Biomasse Schaftderbholz, Rindenbiomasse, Astbiomasse, Nadelbiomasse, Gesamtbiomasse
7.1 Abbildung von Störungen	Einfache Schätzung von Windwurf und Schneebruch anhand der h/d-Verhältnisse.
7.2 Abbildung des Klimas	nein
8.1 Verfügbarkeit des Programmcodes	Kein kommerzielles Produkt und wird nach persönlicher Absprache von Nutzungsbedingungen abgegeben. Gleichungen sowie die dazugehörigen Koeffizienten sind für die Allgemeinheit zugänglich. Diese können vom Anwender auch ohne grossen Programmieraufwand geändert oder angepasst werden.
8.2 modularer Aufbau	Setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: MOSES 3.0 (C++), MOSESbatch (Perl), STANDGEN (Delphi), MOSESFramework (C#), Graphical User Interface (C#)
8.3 Dokumentation	Gut bis sehr gut

Tabelle 20: Entscheidungsinformationen der AHP-Analyse für das Modell PrognAus.

1.1 räumliche Auflösung	distanzunabhängiges Einzelbaummodell
1.2 Altersabhängigkeit	unabhängig vom Alter
2.1 waldbauliche Variantenstudien	beschränkt möglich (siehe Behandlungsstrategien)
2.2 Fortschreibung von Beständen	Das Modell ist prädestiniert für die Fortschreibung von relativ kleinen Probestflächen bei Stichprobeninventuren im 5-Jahresrhythmus. Dadurch können Szenariosimulationen auf Bestandesebene aber auch auf betrieblicher, regionaler und nationaler Ebene durchgeführt werden.
2.3 geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	Der bisherige Einsatz beschränkt sich vor allem auf die Lehre und die Forschung.
3.1 Regionalbezug / Standortsbereich	Das Modell basiert auf Daten der Österreichischen Waldinventur (ÖWI). Die Gültigkeit des Modells erstreckt sich auf die gesamte bewaldete Fläche Österreichs.
3.2 Mischungstypen / Bestandesaufbau	Gleich- und ungleichaltrige gemischte Bestände
3.3 abgedeckte Behandlungsvarianten	Das interaktive Behandlungsmodell wird über die Baumart, verschiedene Baumattribute und Durchmesserklassen gesteuert. Die breite und Anzahl der Klassen (max. 20) kann vom Anwender definiert werden. Das Behandlungsmodell umfasst folgende Algorithmen: prozentuale Entnahme aus definierten BHD-Klassen, Zielstärkennutzung, Entnahme entlang einer Gleichgewichtskurve, LOGIT-Modell für Baumentnahme, definierte Anzahl an Bäumen. Ernteeingriffe können entweder interaktiv oder automatisiert durchgeführt werden.
3.4 verfügbare Baumarten	Alle gängigen Baumarten, die in Österreich vorkommen
4.1 Flächenform und Grösse	Eingabe der Flächengrösse möglich
4.2 Information aus Stichprobe / Inventur	Verarbeitung von Routine-Inventurdaten
4.3 Erzeugung fehlender Informationen	nein
5.1 Höhenwachstum	Potenzialunabhängiger Zuwachs, nach dem Evolon-Modelltyp
5.2 Dickenwachstum	Potenzialunabhängiger Zuwachs, Grundflächenzuwachsmodell
5.3 Kronenmodell	Für die Baumart Fichte wurde ein dynamisches Kronenmodell entwickelt. Für die anderen Baumarten wird die Kronenveränderung durch zweimalige Anwendung eines statischen Kronenmodells errechnet.
5.4 Mortalitätsmodell	LOGIT-Ansatz; die Ermittlung der Mortalitätswahrscheinlichkeit eines Baumes in einer 5-Jahresperiode erfolgt in Abhängigkeit des BHDs, des Kronenverhältnisses und der Grundflächendichte.
5.5 Verjüngung / Einwuchs	Das Modell ist gültig für Bäume ab einem Grenzdurchmesser von 5cm. Mit Hilfe des Einwuchsmodells werden Anzahl, Baumart und Dimension jener Bäume abgeschätzt, die innerhalb von fünf Jahren den Grenzdurchmesser überschreiten. Die Bestimmung des Einwuchses umfasst folgende fünf Submodelle zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Einwuchs: Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Baumart, Anzahl, Durchmesser und Höhe der Bäume.
5.6 Erfassung des Standorts	Das standörtliche Leistungsvermögen wird über verschiedene kontinuierliche und diskrete Standortvariablen und nicht über den darauf stockenden Baumbestand beschrieben. Der Standort wird über die Faktoren Seehöhe, Hangneigung, Exposition, Relief, Bodengründigkeit, Humusmächtigkeit, Bodentyp, Bodenfeuchte, Vegetationstyp und Wuchsraum beschrieben. Dabei handelt es sich um Faktoren, wie sie bei der ÖWI erhoben werden.
6.1 Baumlisten	Das Modell liefert grundsätzlich die Einzelbaumparameter BHD, Höhe und Kronenprozent, jeweils für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand in fünfjährigen Intervallen.

6.2 Bestandeskennwerte	Baumartenweise liefert das Modell Bestandesparameter, wie z.B. Volumen, Anzahl Stämme, Grundfläche, jährlicher Zuwachs, geerntete Holzmenge und Mortalität, Durchmesser des Grundflächenmittels sowie verschiedene Mittel- und Oberhöhen.
6.3 ökonomische Kennwerte	Sortimentierung (inkl. Einteilung in Klasse A,B,C), Berechnung von Holzerntekosten (Fällen und Rücken) und Deckungsbeiträgen
6.4 Strukturcharakteristika	Struktur Informationen auf Bestandesebene umfassen BHD-Verteilung, Baumart und verschiedene Einzelbaumattribute.
6.5 Biomassefraktionen	nein
7.1 Abbildung von Störungen	Ein Kalamitätsmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen zufälligen Nutzungen (Windwurf/-bruch, Schneebruch und Käferbefall) in Abhängigkeit vom Standort,- Bestandes- und Klimaparametern (Wind, Niederschlag und Temperatur).
7.2 Abbildung des Klimas	Das Höhenzuwachsmo­dell, sowie das Grundflächenzuwachsmo­dell wurden um klimatische Variablen erweitert. Dabei werden in den beiden Modellen jeweils der Einfluss der jährliche Temperatur- und Niederschlagssumme sowie die Aridität berücksichtigt.
8.1 Verfügbarkeit des Programmcodes	nicht frei verfügbar
8.2 modularer Aufbau	Das Modell liegt als lauffähige Windows-Applikation vor und wurde in Visual Basic programmiert.
8.3 Dokumentation	befriedigend

6.2.2 Nutzenprioritäten mittels paarweiser Vergleiche

Nachdem die Kriterien und die Hierarchie festgelegt sind, werden die einzelnen Kriterien paarweise miteinander verglichen. Hierzu werden sie in einer Evaluationsmatrix einander gegenübergestellt und auf einer AHP-Skala mit einer Bandbreite von 1 bis 9 bzw. 1 bis 1/9 Punkten paarweise bewertet (vgl. Tabelle 21). Durch diese Methode der paarweisen Vergleiche lässt sich dem Entscheider aus der Vielzahl konkurrierender Kriterien eine sehr genaue Bewertung „entlocken“. Am Beispiel der Unterkriterien aus dem Bereich Gültigkeit wird das Vorgehen erläutert (vgl. Tabelle 22). In diesem Fall hat z.B. das Kriterium abgedeckte Behandlungsvarianten laut Ermessen des Entscheiders eine „etwas höhere Bedeutung“ als das Kriterium Mischungstyp/Bestandesaufbau, d.h. in das entsprechende Feld wird der Wert 3 eingetragen. Umgekehrt ist der Mischungstyp/Bestandesaufbau „etwas weniger von Bedeutung“ als die abgedeckten Behandlungsvarianten des Modells, d.h. es wird der reziproke Wert 1/3 eingetragen. Dieses Vorgehen wird für die Hauptkriterien sowie für die jeweiligen Unterkriterien durchgeführt. Im Anhang sind alle paarweisen Vergleiche dieser Untersuchung aufgelistet.

Ausgehend von den paarweisen Vergleichen berechnet die Software CelsiEval die normierten Gewichte der jeweiligen Kriterien. Diese spiegeln die relative Bedeutung des Kriteriums für den Entscheider wider (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 21: AHP-Skala für den paarweisen Vergleich der Kriterien und der Modellalternativen.

Werte für die Paarvergleichsurteile a_{ij}	Interpretation der Werte...	
	bei der Beurteilung der relativen Bedeutung von Kriterien	bei der Beurteilung eines Modells in Bezug auf ein Kriterium
1	gleiche Bedeutung der beiden Kriterien i und j	gleiche Kriterienausprägung der beiden Modelle i und j
3	etwas höhere Bedeutung des Kriteriums i	etwas höhere Kriterienausprägung des Modells i
5	deutlich höhere Bedeutung des Kriteriums i	deutlich höhere Kriterienausprägung des Modells i
7	viel höhere Bedeutung des Kriteriums i	viel höhere Kriterienausprägung des Modells i
9	sehr viel höhere Bedeutung des Kriteriums i	sehr viel höhere Kriterienausprägung des Modells i
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Reziprokwerte für „inverse“ Präferenz, bei denen das Beurteilungsobjekt oder das Kriterium j gegenüber dem Beurteilungsobjekt bzw. dem Kriterium i bevorzugt wird.	

Tabelle 22: Bsp. für den paarweisen Kriterienvergleich auf Ebene der Unterkriterien in der Rubrik „Gültigkeitsbereich“.

Vergleich von...	Regionalbezug/ Standortsbereich	Mischungstyp/ Bestandesaufbau	abgedeckte Behandlungsvarianten	Verfügbare Baumarten	Gewicht normiert
Regionalbezug / Standortsbereich	1.00	0.33	0.20	0.20	0.0679
Mischungstyp / Bestandesaufbau	3.00	1.00	0.33	0.33	0.1523
Abgedeckte Behandlungsvarianten	5.00	3.00	1.00	1.00	0.3899
Verfügbare Baumarten	5.00	3.00	1.00	1.00	0.3899

Im nächsten Schritt werden die Modellalternativen paarweise miteinander verglichen. Hierzu muss der Entscheider für jedes Kriterium seine Alternativen auf ihre Eignung hin untersuchen und bewerten. Dabei werden jeweils immer zwei Modelle paarweise verglichen. Mit einer Punktezahl wird wiederum auch hier bewertet, welches Modell das jeweilige Kriterium besser erfüllt. Als Entscheidungsgrundlage dienen die Informationen aus den Tabellen (Tabelle 17 - Tabelle 20). Für jedes Kriterium werden so alle möglichen Kombinationen von Alternativen beurteilt. Die Beurteilung erfolgt anhand der gleichen Skala wie oben (vgl. Tabelle 21).

Anhand dieser paarweisen Vergleiche wird die relative Priorität der Modellalternativen in Bezug auf die Unterkriterien ermittelt (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23: Mit CelsiEval berechnete normierte Gewichte für die Hauptkriterien, Unterkriterien sowie für die verschiedenen Modelalternativen. Die letzte Zeile enthält die berechneten Nutzenwerte (Rangfolge der Alternativen).

Hauptkriterien		Unterkriterien		BWINPro	SILVA	MOSES	PrognAus
Modellansatz	0.1206	räumliche Auflösung	0.8000	0.3000	0.3000	0.3000	0.1000
		Altersabhängigkeit	0.2000	0.0833	0.4167	0.0833	0.4167
Anwendungs- bereich	0.1206	waldbauliche Variantenstu- dien	0.4286	0.3899	0.3899	0.1523	0.0679
		Fortschreibung von Bestän- den	0.4286	0.3125	0.3125	0.3125	0.0625
		geeignet für Praxis, For- schung, Lehre	0.1428	0.4000	0.4000	0.1000	0.1000
Gültigkeits- bereich	0.1206	Regionalbezug / Standortsbereich	0.0679	0.0908	0.3961	0.3961	0.1170
		Mischungstypen / Bestan- desaufbau	0.1523	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
		abgedeckte Behandlungs- varianten	0.3899	0.5223	0.1998	0.1998	0.0781
		verfügbare Baumarten	0.3899	0.3750	0.1250	0.1250	0.3750
Eingabe- möglichkeiten	0.0455	Flächenform und Grösse	0.1428	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
		Information aus Stichprobe / Inventur	0.4286	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
		Erzeugung fehlender In- formationen	0.4286	0.3125	0.3125	0.3125	0.0625
Wachstum (Teilmodelle)	0.1206	Höhenwachstum	0.1429	0.1667	0.1667	0.1667	0.5000
		Dickenwachstum	0.1429	0.3750	0.1250	0.1250	0.3750
		Kronenmodell	0.1429	0.2500	0.2500	0.2500	0.3000
		Mortalitätsmodell	0.1429	0.4000	0.2000	0.2000	0.2000
		Verjüngung / Einwuchs	0.1429	0.2500	0.2500	0.2500	0.1000
		Erfassung des Standorts	0.2857	0.0833	0.4167	0.0833	0.4167
Ausgaben	0.0455	Baumlisten	0.3435	0.3000	0.3000	0.1000	0.3000
		Bestandeskennwerte	0.3435	0.3077	0.3077	0.3077	0.0769
		ökonomische Kennwerte	0.1290	0.1175	0.5650	0.2622	0.0553
		Strukturcharakteristika	0.1290	0.3750	0.3750	0.1250	0.1250
		Biomassefraktionen	0.0551	0.3125	0.3125	0.3125	0.0625
Umwelteinflüsse	0.1206	Abbildung von Störungen	0.1250	0.1000	0.1000	0.4000	0.4000
		Abbildung des Klimas	0.8750	0.1523	0.3899	0.0679	0.3899
Software	0.3059	Verfügbarkeit des Pro- grammcodes	0.4000	0.6250	0.1250	0.1250	0.1250
		modularer Aufbau	0.4000	0.5233	0.1998	0.1998	0.0781
		Dokumentation	0.2000	0.3899	0.1523	0.3899	0.0679
		Nutzenwert der Modelle		0.3570	0.2569	0.1986	0.1875

Ausgehend von den errechneten Werten wird die Rangfolge der Alternativen bestimmt, indem die relativen Prioritäten der Alternativen mit den relativen Wichtigkeiten der Kriterien multipliziert und über alle Kriterien summiert werden. Daraus ergibt sich der Nutzenwert für die verschiedenen Modellvarianten.

Am Beispiel der Hauptkriterien „Modellansatz“, „Anwendungsbereich“ und „Gültigkeitsbereich“ wird nachfolgende für das Modell BWINPro die Berechnung des Nutzenwerts veranschaulicht:

$$0.1206 * (0.8000 * 0.3000 + 0.2000 * 0.0833) = 0.0310$$

$$0.1206 * (0.4286 * 0.3899 + 0.4286 * 0.3125 + 0.1428 * 0.4000) = 0.0432$$

$$0.1206 * (0.0679 * 0.0908 + 0.1523 * 0.2500 + 0.3899 * 0.5223 + 0.3899 * 0.3750) = 0.0475$$

Die gleiche Rechenoperation erfolgt für die übrigen Hauptkriterien. Die Summe der Zwischenwerte ergibt am Ende den entsprechenden Nutzenwert für das Modell.

Anhand der Abstufung der Nutzenwerte, wird die Rangfolge der Modellalternativen abgeleitet. Im Rahmen der hier durchgeführten AHP-Analyse erhält das Modell BWINPro mit 0.3570 den höchsten Nutzenwert (vgl. Tabelle 23). Es ist dementsprechend das Modell, welches für die festgesetzten Zielvorgaben die beste Eignung verspricht.

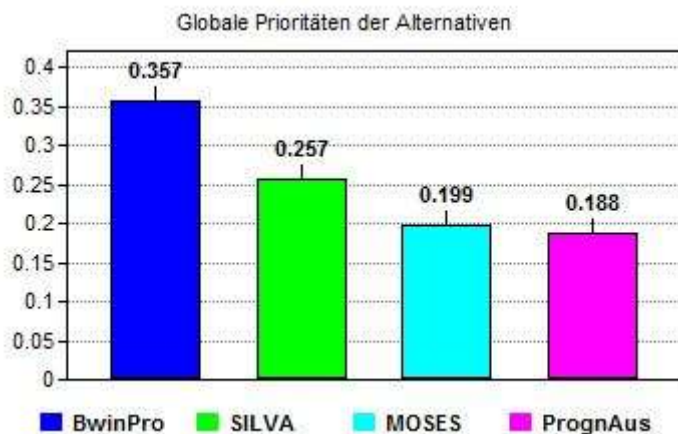


Abbildung 9: Mit AHP ermittelte Nutzenwerte für die vier Modellalternativen.

Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass die Bewertung auf Basis der recherchierten Informationen zu den Modellen getroffen wurde. Gleichzeitig spiegelt sie die Meinung des Entscheidungsträgers wieder. Es ist somit anzumerken, dass auf Basis einer anderen (besseren oder schlechteren) Informationsgrundlage und eines anderen Entscheidungsträgers das Ergebnis abweichen würde.

6.2.3 Konsistenz und Sensitivität

Die Software CelsiEval bietet die Option, die Konsistenz der Paarvergleichsurteile in einer Evaluationsmatrix mithilfe eines Konsistenzindex (C.I. = Consistency Index) und eines Konsistenzwerts (C.R. = Consistency Ratio) zu überprüfen (Saaty 1995, 2005):

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

Formel 35

Hierzu berechnet CelsiEval zuerst den Konsistenzindex auf Basis des maximalen Eigenwerts $\lambda_{\max}$ und der Dimension n der jeweils betroffenen Evaluationsmatrix. Die Ermittlung des Konsistenzindex basiert auf folgender Beziehung: Der maximale Eigenwert $\lambda_{\max}$ einer Evaluationsmatrix ist bei vollständiger Konsistenz der Evaluationsmatrix gleich ihrer Dimension n .

Darüber hinaus wird zur Überprüfung der Konsistenz der Paarvergleichsurteile auf den so genannten Random Index (R.I.) zurückgegriffen. Für eine Matrixdimension mit $n = 2$ bis 10 lassen sich die Werte des Random Index aus nachfolgender Tabelle entnehmen.

Tabelle 24: Wertetabelle für den Random Index (Saaty 1995).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Auf Basis des Konsistenzindex C.I. und des Random Index R.I. wird der Konsistenzwert C.R. gemäß der oben angegebenen Formel ermittelt. Der Konsistenzwert C.R. wird beim AHP als Indikator zur Bewertung der Logik der Paarvergleichsurteile einer Evaluationsmatrix verwendet.

Saaty and Vargas (2012) geben als heuristische Empfehlung an, dass eine Überarbeitung der Paarvergleichsurteile einer Evaluationsmatrix wegen ungenügender Konsistenz zu erfolgen hat, sofern der Konsistenzwert C.R. über 0.1 liegt.

Für das in Tabelle 22 dargestellte Beispiel einer Evaluationsmatrix ergeben sich ausgehend vom maximalen Eigenwert $\lambda_{\max}$ folgender Konsistenzindex und Konsistenzwert:

$\lambda_{\max} = 4.043$

C.I. = 0.014

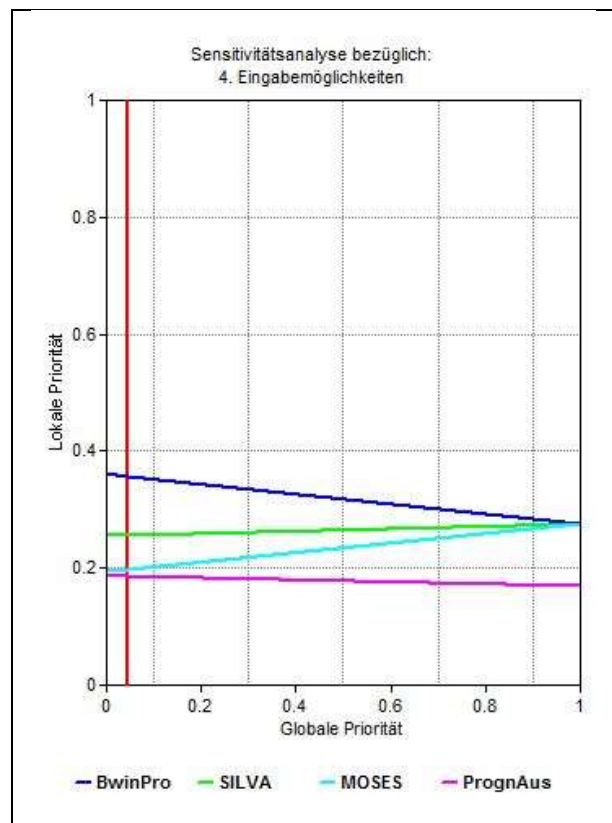
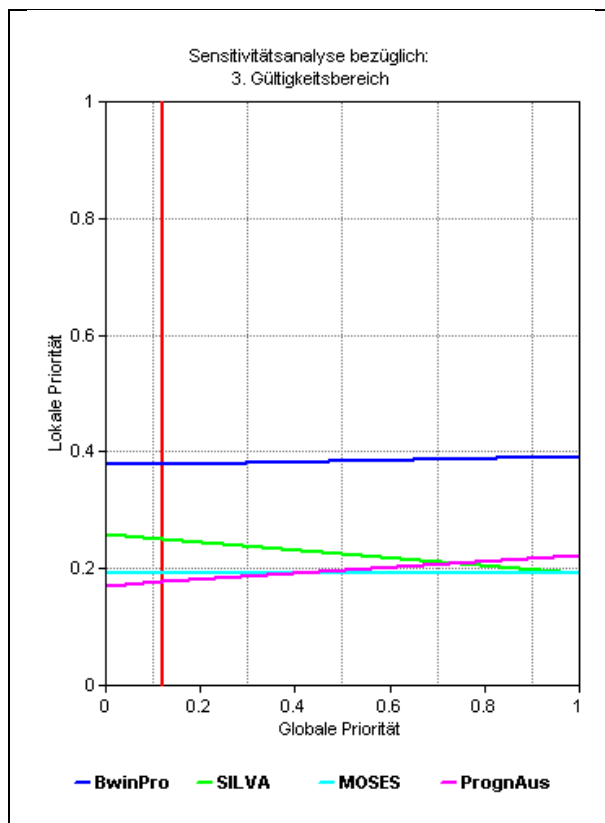
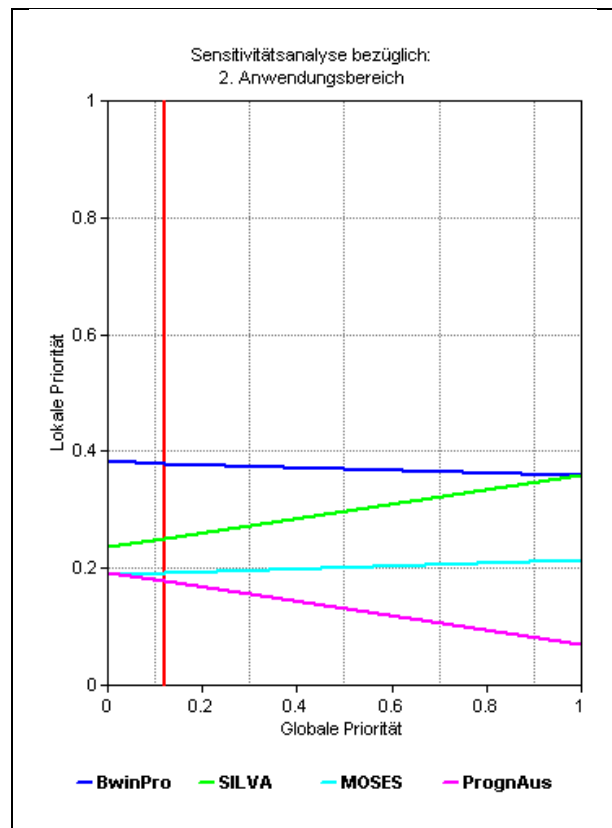
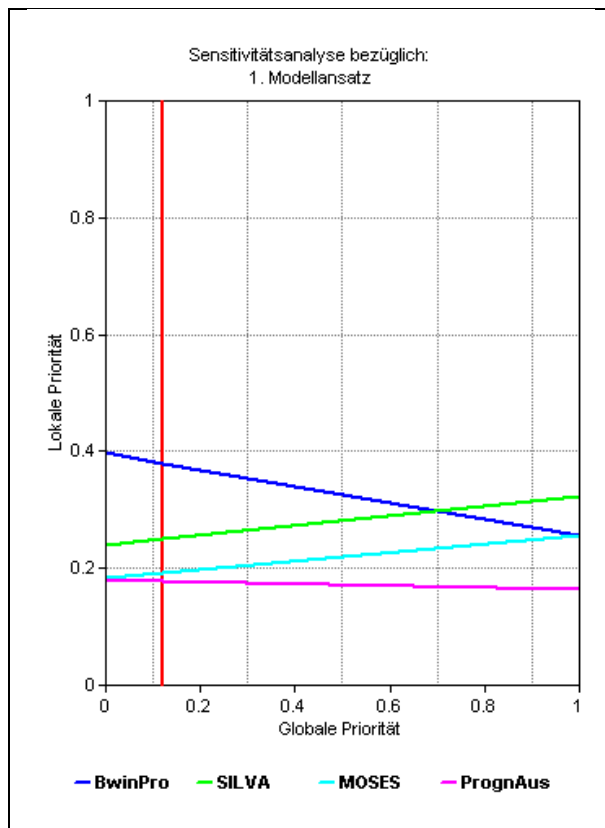
C.R. = 0.016

Der C.R. liegt deutlich unter der Grenze von 0.1. Daraus lässt sich schliessen, dass die Logik der Bewertung widerspruchsfrei ist. Auch für alle übrigen paarweisen Vergleiche wurden diese Grenzen eingehalten (siehe Anhang).

Zusätzlich bietet CelsiEval die Möglichkeit, mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse zu eruieren, wie stabil die Nutzenwerte bleiben, wenn die Gewichtung der Kriterien, die exakt durch paarweise Vergleiche ermittelt wurden, nachträglich etwas verändert würde. Die nachfolgenden 8 Diagramme geben grafisch die Sensitivitätsanalyse des Programmes CelsiEval für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführte AHP-Analyse wieder.

Der Schnittpunkt der jeweiligen senkrechten roten Linie mit der x-Achse spiegelt die aktuelle Gewichtung des jeweiligen Hauptkriteriums (siehe Werte in Tabelle 23). Die Schnittpunkte der roten Linie mit den vier Linien für die Modelle zeigen den jeweiligen Nutzenwert der Modelle. Durch verschieben der roten Linie nach links oder nach rechts, kann die Gewichtung des jeweiligen Hauptkriteriums verringert oder erhöht werden. Dabei lässt sich erkennen, dass geringe Änderungen der Kriteriengewichte keine Änderung in der Reihenfolge der Nutzenwerte zur Folge hätten. Teilweise würde sich erst bei starker Übergewichtung eines Kriteriums, wie z.B. beim Kriterium Modellansatz, Wachstum oder Ausgaben, die Rangfolge der Nutzenwerte ändern und BWINPro wäre nicht mehr an erster Stel-

le. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass das Resultat der AHP-Analyse hinreichend stabil und BWINPro somit das am besten geeignete Modell ist.



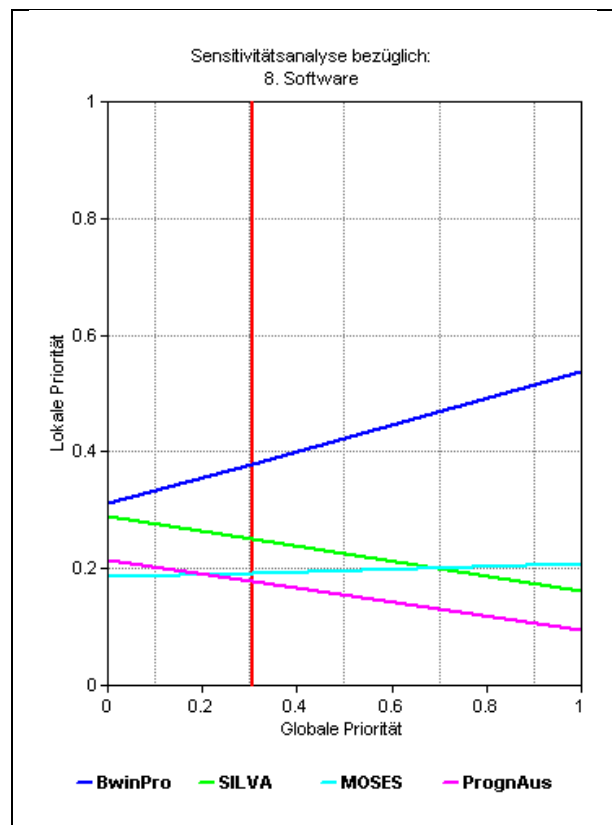
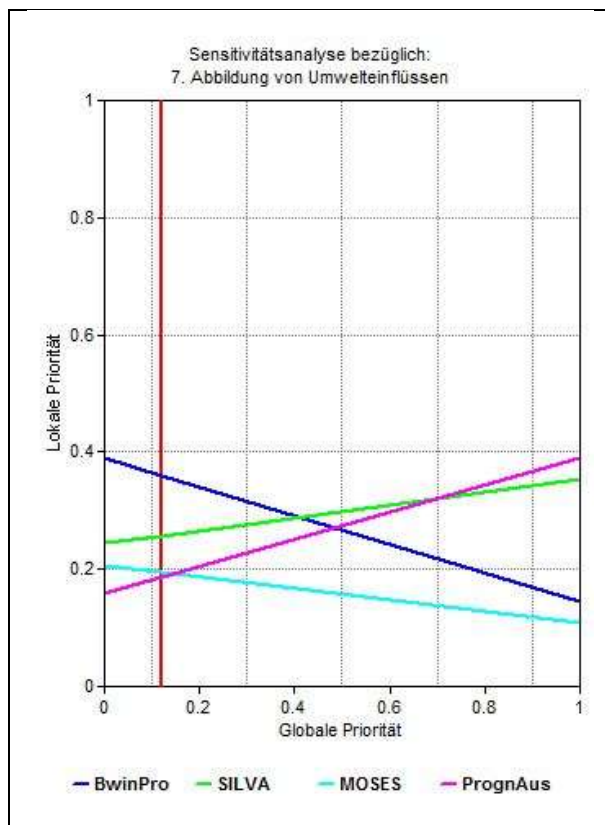
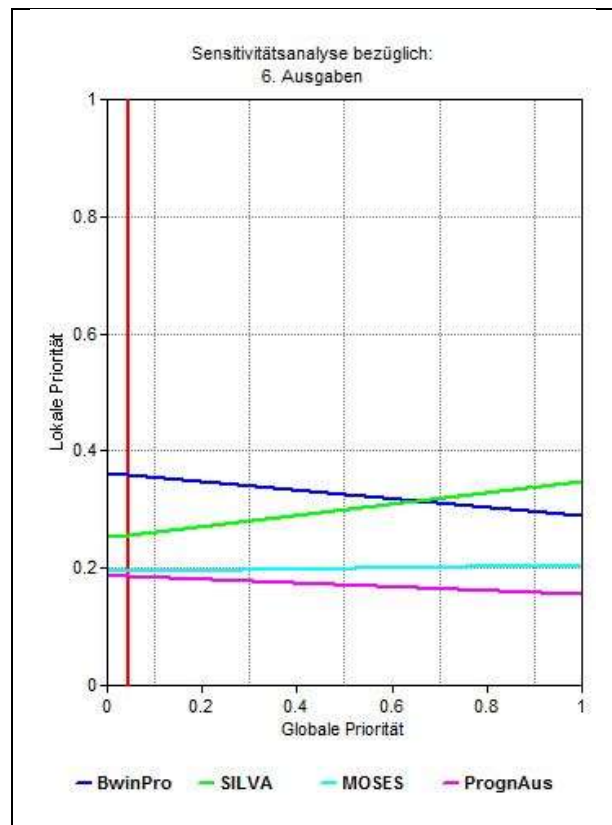
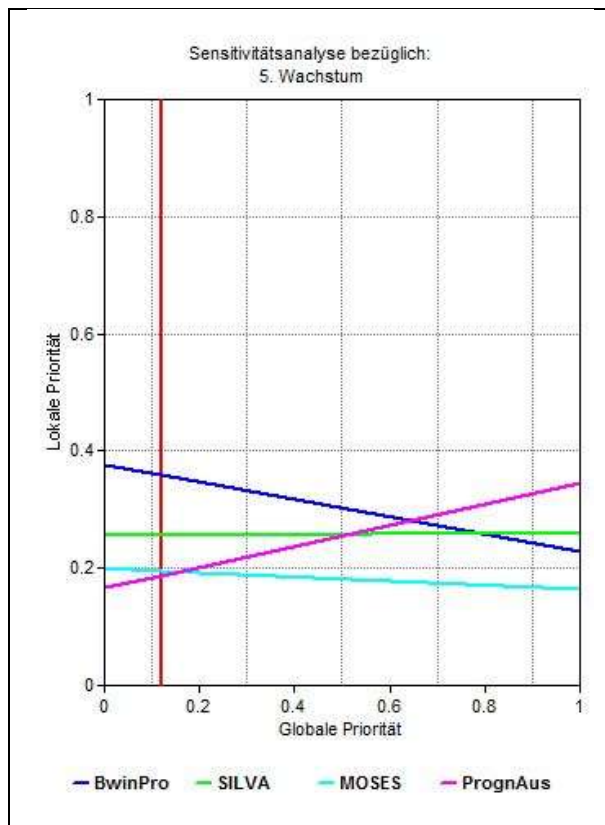


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Sensitivitätsanalyse für die acht Hauptkriterien.

6.2.4 Bewertung der AHP-Analyse

Anhand eines Stärken-Schwächen-Diagramms lässt sich erkennen, in welchen Kriterien die Modelle in ihren Eigenschaften oder Funktionalitäten überwiegen, bzw. einem anderen Modell unterlegen sind. Davon ausgehend kann auch eine Bewertung der durchgeführten AHP-Analyse erfolgen. Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, ist BWINPro nicht in allen Kriterien das beste Modell, sondern ist in einigen Punkten SILVA und PrognAus unterlegen oder gleichauf mit MOSES. Das BWINPro letzten Endes mit dem höchsten Nutzenwert aus der Analyse herausgeht, liegt vor allem an dem guten Abschneiden in den Hauptkriterien „Gültigkeitsbereich“ und „Eingabemöglichkeit“ sowie dem letzten Hauptkriterium „Software“.

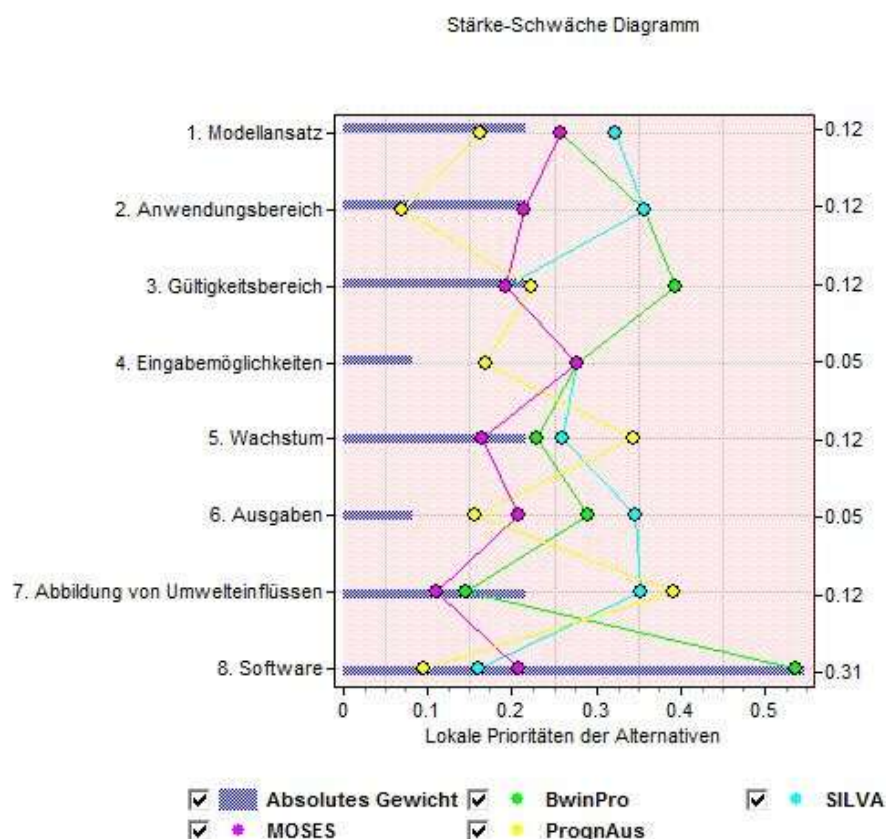


Abbildung 11: Stärken-Schwächen-Diagramm der vier Modelle.

Nachfolgend wird die Ausprägung der Kurvenverläufe für jedes Kriterium erläutert.

Modellansatz: Silva ist altersunabhängig und verfolgt einen distanzabhängigen Ansatz über Einzelbaumkoordinaten. Es erhält dadurch eine höher Priorität als BWINPro und MOSES, die beide altersabhängig sind und an zweiter Stelle liegen. PrognAus erhält die geringste Priorität. Das Modell ist ebenfalls altersunabhängig, aber bei der Gewichtung der Kriterien wurde das Unterkriterium „räumliche Auflösung“ höher bewertet als die „Altersabhängigkeit“. PrognAus verfolgt einen distanzunabhängigen Ansatz, welcher aus Sicht des Entscheidungsträgers weniger gut geeignet erscheint, um Strukturcharakteristika in Beständen abzubilden.

Anwendungsbereich: BWINPro und SILVA erfüllen die gesetzten Anforderungen in den Unterkriterien „waldbauliche Variantenstudien“, „Forstschreibung von Beständen“ und „Eignung für Praxis, Forschung und Lehre“ gleichermassen gut. Sie erhalten dementsprechend die gleiche Priorität. MOSES erhält wegen seiner geringeren Funktionsvielfalt zur Abbildung waldbaulicher Variantenstudien so-

wie seines primären Einsatzgebietes für die Praxis eine geringere Priorität. PrognAus landet auf der untersten Stufe. Ausschlaggebend hierfür war, dass bei diesem Modell waldbauliche Variantenstudien nur begrenzt möglich sind, zudem erfolgt die Fortschreibung von Daten lediglich auf der Ebene von relativ kleinen Probeflächen aus Stichprobeninventuren.

Gültigkeitsbereich: Obwohl SILVA und MOSE teilweise mit Schweizer Daten aus langfristigen Versuchsflächen parametrisiert wurden, erhält BWINPro bei diesem Kriterium eine höhere Priorität als die anderen Modelle. Dies liegt unter anderem an dem leichten Vorteil in der Rubrik „abgedeckte Behandlungsvarianten“. So bietet BWINPro die Option von verschiedenen Behandlungskonzepten zum Zwecke des Naturschutzes, wie z.B. den Schutz von Bäumen ab einem vorgegebenen BHD oder die Möglichkeit einer Habitatbaumauswahl. Zudem ist das Modell für eine ganze Reihe von Baumarten parametrisiert. Diese Auswahl an Baumarten bietet daneben nur das Modell PrognAus in ähnlichem Umfang an. Weiterhin besteht die Möglichkeit, eigene regionale Versionen zu erstellen, indem die Wachstumsfunktionen anhand eigener Versuchsflächendaten parametrisiert werden. Solche Anpassungen können für die anderen Modelle ebenfalls durchgeführt werden, jedoch bieten die Entwickler von BWINPro hierfür auch vorgefertigte Skripte an, die im Statistik-Programm R geschrieben wurden und welche diese Arbeit erleichtern sollen (Nagel 2009).

Eingabemöglichkeiten: BWINPro, SILVA und MOSES erhalten in diesem Hauptkriterium die gleiche Priorität. PrognAus erhält eine niedrigere Priorität. Entscheidend hierfür war das Fehlen eines Struktur-/Bestandesgenerators, der bei unvollständiger Datengrundlage fehlende Informationen, wie z.B. Durchmesserverteilungen, fehlende Höhenwerte, Kronenverhältnisse oder Baumkoordinaten ergänzt.

Wachstum (Teilmodelle): Bei der Bewertung in den sechs Unterkriterien im Bereich Wachstum erhält PrognAus die höchste Priorität. Der Grund für dieses Ergebnis resultiert vor allem aus seinem potenzialunabhängigen Ansätzen zur Beschreibung des Höhen- und Dickenwachstums, der aus Sicht des Entscheidungsträgers gegenüber den anderen Modellen höher bewertet wurde, sowie seinem Ansatz zur Beschreibung des standörtlichen Leistungsvermögens über verschiedene Standortvariablen. Das Modell ist wie SILVA, das ebenfalls verschiedene Standortvariablen aggregiert, nicht auf die altersabhängige Oberhöhenbonität angewiesen. In den Unterkriterien „Kronenmodell“, „Mortalität“ und „Verjüngung/Einwuchs“ wurden die vier Modelle nahezu gleich bewertet, da keine direkte Aussage getroffen werden kann, welcher der verfolgten Ansätze der Beste ist, ohne das ein Vergleich von Modellresultaten mit realen Versuchsflächendaten durchgeführt wird. Lediglich im Unterkriterium Mortalität erhält BWINPro gegenüber den anderen Modellen eine leicht höhere Bewertung, da es neben einer rein dichtebedingten Mortalität auch eine altersbedingte Mortalität berücksichtigt.

Ausgaben: SILVA erhält in diesem Bereich die höchste Priorität. Es liefert in allen Unterkategorien eine Vielzahl von Ausgaben, die für die Planung und Bewirtschaftung (ökonomisch wie ökologisch) von Waldbeständen notwendig sind. BWINPro erhält die zweithöchste Priorität. Grund für diese Abstufung sind die geringen Ausgaben im Bereich der ökonomischen Kennwerte. Bislang bietet das Modell lediglich eine Sortimentierung der modellierten Bäume, einschliesslich der Möglichkeit zur Berechnung der Holzerlöse, aber keine Holzerntekostenberechnung. PrognAus bietet im Bereich der ökonomischen Kennwerter wie BWINPro ebenfalls nur die Möglichkeit zur Sortimentierung. Da PrognAus zusätzlich auch keine Ausgaben zu ökologischen Kennwerten sowie zu Biomassefraktion liefert, erhält das Modell die niedrigste Priorität.

Abbildung von Umwelteinflüssen: PrognAus umfasst ein Kalamitätsmodell, das den Zusammenhang zwischen zufälligen Nutzungen (Windwurf/-bruch, Schneebruch und Käferbefall) in Abhängigkeit von

Standorts-, Bestandes- und Klimaparametern beschreibt. Gleichzeitig wurde das Höhen- sowie das Grundflächenzuwachsmmodell um klimatische Variablen erweitert. Das Modell erhält dadurch die höchste Priorität in diesem Kriterium. SILVA folgt an zweiter Stelle. Das Modell bildet keine Störungen ab, ist jedoch ebenfalls in der Lage Simulationen von Umweltveränderungen durchzuführen, die im Rahmen der empirische Datenbasis abgedeckt sind. BWINPro folgt an dritter Stelle. Das Modell ist in der aktuellen Version nicht klimasensitiv. Derzeit sind jedoch Bestrebungen im Gang, das Modell in eine klimasensitive Version weiterzuentwickeln. MOSES erhält demgegenüber die niedrigste Priorität, da es weder Störungen noch das Klima abbilden kann.

Software: In diesem Hauptkriterium, welches gegenüber den anderen Kriterien die höchste Gewichtung erhält (siehe blauer Balken und Werte auf der rechten Seite – vgl. auch Tabelle 23 zweite Spalte), hat BWINPro mit Abstand die höchste Priorität. Das Modell bietet gegenüber den anderen drei Modellen den Vorteil, dass es frei über das Internet zur Verfügung gestellt wird. Es wurde im Rahmen des Projektes TreeGrOSS (Tree Growth Open Source Software) in der Programmiersprache Java programmiert. Hierfür wurden Softwarepakete aus dem Open Source Bereich verwendet. Dies bietet den Vorteil, dass die Software kostenfrei ist, der Sourcecode einsehbar und die Benutzer das Programm leicht verwenden und an ihre speziellen Bedürfnisse anpassen können. Dies ist aus wissenschaftlicher Sicht absolut unerlässlich. Ein weiterer Vorteil von BWINPro ist seine objektorientierte Softwarestruktur, die aus mehreren Java Packages besteht. SILVA und MOSES bestehen ebenfalls aus Teilmodulen und Komponenten. Die beiden Modelle wurden jedoch gegenüber BWINPro niedriger bewertet, da hierzu weniger Informationen zur Verfügung standen. SILVA erhält zudem eine etwas schlechtere Priorität als MOSES, weil kein Benutzerhandbuch zur Verfügung stand. Ansonsten ist das Modell aber gut dokumentiert. PrognAus erhält die niedrigste Priorität, da es in allen drei Unterkriterien schlecht abgeschlossen hat. Dies liegt aber vor allem auch an der lückenhaften Dokumentation des Modells.

Welche Werte im Detail beim paarweisen Vergleich der einzelnen Modelle in Bezug auf die verschiedenen Unterkriterien vergeben wurden, kann im Anhang nachgelesen werden.

6.2.5 Fazit

Die AHP-Analyse bietet einen strukturierten Evaluationsprozess zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in der Modellauswahl. Ausgehend von individuellen qualitativen Bewertungen ermöglicht AHP eine Ableitung von quantitativen Verhältniszahlen, indem eine paarweise Vergleichsmatrix verwendet wird. Die Entscheidungsfindung wird somit erleichtert, da (Lemm and Thees 2009):

- 1) der Kriterienauswahlprozess
- 2) die paarweisen Vergleiche der Kriterien untereinander und
- 3) die paarweisen Bewertungen der Alternativen bezüglich jedes Kriteriums

auf eine transparente und nachvollziehbare Grundlage gestellt werden. So kann eine nachvollziehbare Rangfolge der Alternativen ermittelt werden. Durch quantitative Darstellungen werden die Ergebnisse vergleichbar und „Bauchentscheidungen“ deutlich reduziert. Der grosse Vorteil von AHP liegt aber nicht nur in der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung, sondern auch darin, dass die Entscheidungskriterien und Argumente einer genauen Prüfung unterzogen werden. Durch diese Offenlegung der Modellvorstellungen, die den Rahmen für die Entscheidungen liefern, ist eine kritische Diskussion möglich.

Schwächen der AHP-Methode sind vor allem, dass die Methode bei einer grossen Anzahl an Kriterien sehr aufwändig ist. Die Bewertung aller Paarvergleiche erfordert dadurch wesentlich mehr Zeit, als wenn nur eine absolut notwendige Anzahl Paarvergleiche bewertet wird. Eine umfassende Bewertung führt vielfach auch zu „unnötigen Bewertungen“ und kann durch diese Überbestimmung auch Widersprüche verursachen (Lemm and Thees 2009).

Generell hat sich gezeigt, dass sich AHP zur Evaluation eines klimasensitiven Waldwachstums- und Behandlungsmodells gut eignet. Es gilt jedoch festzuhalten, dass auch AHP nur eine subjektive Entscheidungsbasis schafft. Der subjektive Spielraum wird jedoch durch die Konsistenzprüfung eingeschränkt. Gleichzeitig kann durch die Sensitivitätsanalyse kontrolliert werden, ob eine leicht veränderte Gewichtung der Kriterien das Ergebnis massgeblich verlagern würde. Zusätzlich zu diesen beiden Verfahren wäre es auch denkbar, dass bei der Durchführung der AHP-Analyse unterschiedliche Entscheidungsträger berücksichtigt werden. Somit könnten alternative Resultate generiert werden, die einen „finalen“ Endvergleich erlauben würden.

7 Nächste Schritte

Die dargestellte Evaluation eines klimasensitiven Waldwachstums- und Behandlungsmodells für die Schweiz bildet die Basis für eine Reihe weiterer Projekte, die auf dem gewonnenen Wissen und dem Resultat aufbauen.

So dient es als Vorauswahl für das Projekt „Parametrisierung eines klimasensitiven Waldmanagementmodells für die Schweiz“, welches durch das Programm „Wald und Klimawandel“ gefördert und an der WSL bearbeitet wird. Mit dem Projekt wurde vor kurzem begonnen. Der Abschluss ist für das Jahr 2015 vorgesehen.

Das Ziel dieses Projektes ist es, ein klimasensitives Wachstums- und Behandlungsmodell für das forstliche Management in der Schweiz zu parametrisieren, sodass es für Prognoserechnungen (Volumen, erntekostenfreie Erlöse, Struktur) auf Bestandesebene verwendet werden kann. Aufbauend auf dem Gerüst des Waldwachstumssimulator BWINPro, welcher als Grundlage für die Beschreibung des Waldwachstums dient, werden die wesentlichen Komponenten des Modells – Durchmesser- und Höhenzuwachs, Mortalität und Einwuchs – mit passenden Funktionen klimasensitiv beschrieben und mit Hilfe angemessener Methoden die neuen Parameter geschätzt. Erst durch die Parametrisierung für Schweizer Verhältnisse erlaubt das Modell verlässliche Aussagen über die Waldentwicklung zu treffen.

Auf Basis dieses klimasensitiven Waldwachstumsmodells soll in einem weiteren Schritt ein multikriterielles Decision Support System (DSS) für die Schweiz entwickelt werden. Das DSS ermöglicht eine nachhaltige und quantitative Bewertung verschiedener waldbaulicher Behandlungsalternativen, um im Zuge der forstlichen Planung auf Betriebsebene die optimale Bewirtschaftungsstrategie ermitteln zu können.

Mit Hilfe eines DSS kann ein Forstbetrieb auf der Ebene des Bestandes die optimale waldbauliche Behandlungsstrategie ermitteln, um z.B. die Zielvorgaben der Waldpolitik 2020⁵ zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung bestmöglich zu berücksichtigen und die ökonomischen Auswirkungen auf den Betrieb abzuschätzen. Für eine Bewertung der finanziellen Auswirkungen unterschiedlicher waldbau-

⁵ Waldpolitik 2020, <http://www.bafu.admin.ch/wald/01152/11490/index.html?lang=de>

licher Behandlungsstrategien sind jedoch zudem Modelle zur Abschätzung der Holzerntekosten sowie der Sortimentsaufteilung notwendig, welche mit dem Simulationsmodell verknüpft werden sollen. Hierzu existieren in der Schweiz die Modelle HeProMo (Holzernteproduktivitätsmodell) (Frutig et al. 2009) und SorSim (Sortimentssimulator) (Holm et al. 2012). Diese gilt es an das DSS anzubinden.

Weiterhin dient die Vorauswahl als Basis für das Rahmenprojekt zum Thema „Mit internetbasierten, IT-gestützten Entscheidungsgrundlagen die Planung und Steuerung des Forstbetriebes verbessern“.

Ziel dieses Rahmenprojektes ist die Entwicklung einer Sammlung von internetbasierten und softwaregestützten Entscheidungsgrundlagen für eine adaptive bestandesbezogene Planung und Steuerung des Forstbetriebes. Dabei sollen alle wesentlichen forstlichen Prozesse abgebildet werden, angefangen von der Inventur, über die Waldbewirtschaftung bis hin zur Holzernte und den Transport des Holzes sowie einer Bewertung der vorhandenen Waldstrukturen.

Die Modellevaluation, die Parametrisierung sowie die Entwicklung des DSS bilden zusammen die zentrale Basis dieses Rahmenprojekts, das gegenwärtig in der WSL-Forschungsgruppe Forstliche Produktionssysteme ausgearbeitet wird. Das System hilft, mittels Simulation (Szenarienanalysen, Alternativenbewertung) Bewirtschaftungsalternativen zu erarbeiten, ihre Wirkungen zu ermitteln und zu bewerten. Eine mögliche Förderung dieses Rahmenprojektes könnte durch die Kommission für Technologie und Innovation KTI erfolgen.

8 Literatur

- Aber, J. D. and C. A. Federer. 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia* **92**:463-474.
- Albrecht, A., U. Kohnle, and J. Nagel. 2010. Parametrisierung und Evaluierung von BWinPro für Baden-Württemberg anhand von waldwachstumskundlichen Versuchsflächendaten. Pages 11-16 in J. Nagel, editor. Jahrestagung, 17.-19. Mai 2010, Körbecke am Möhnesee. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde.
- Ammann, P. L. 2004. Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbeständen - Biologische Rationalisierung der waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, Bergahorn und Buche. ETH Zürich, Zürich.
- Ammer, C., C. Ziegler, and T. Knoke. 2005. Zur Beurteilung von intra- und interspezifischer Konkurrenz von Laubbaumbeständen im Dickungsstadium. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **176**:85-94.
- Baldwin, V. C., H. E. Burkhart, J. A. Westfall, and K. D. Peterson. 2001. Linking growth and yield and process models to estimate impact of environmental changes on growth of loblolly pine. *Forest Science* **47**:77-82.
- Botkin, D. B. 1993. *Forest dynamics: an ecological model*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Botkin, D. B., J. F. Janak, and J. R. Wallis. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *The Journal of Ecology* **60**:849-872.
- Bugmann, H. 1996. A Simplified Forest Model to Study Species Composition Along Climate Gradients. *Ecology* **77**:2055-2074.
- Bugmann, H. 2001. A review of forest gap models. *Climatic Change* **51**:259-305.
- Bugmann, H. K. M. and A. M. Solomon. 2000. Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. *Ecological Applications* **10**:95-114.
- Burkhart, H. E. and M. Tomé. 2012. *Modeling Forest Trees and Stands*. Springer Science+Business Media, Dordrecht.
- Canadell, J. G. and M. R. Raupach. 2008. Managing forests for climate change mitigation. *Science* **320**:1456-1457.
- Crookston, N. L. and G. E. Dixon. 2005. The forest vegetation simulator: A review of its structure, content, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture* **49**:60-80.
- Crookston, N. L., G. E. Rehfeldt, G. E. Dixon, and A. R. Weiskittel. 2010. Addressing climate change in the forest vegetation simulator to assess impacts on landscape forest dynamics. *Forest Ecology and Management* **260**:1198-1211.
- Currie, W. S., K. J. Nadelhoffer, and J. D. Aber. 1999. Soil detrital processes controlling the movement of ¹⁵N tracers to forest vegetation. *Ecological Applications* **9**:87-102.
- Davis, L. S., K. N. Johnson, P. S. Bettinger, and T. E. Howard. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic and social values*. McGraw Hill, Boston.

- Degenhardt, A. 1998. Simulation von Baumverteilungsmustern in Mischbeständen. Beitr. Forstwirtsch. Landsch.ökol **32**:130-133.
- Di Lucca, C. M. 1999. TASS/SYLVER/TIPSY: systems for predicting the impact of silvicultural practices on yield, lumber value, economic return and other benefits. Pages 7-16 *in* Stand Density Management Conference: Using the Planning Tools. November 23-24, 1998. Clear Lake Ltd., Edmonton, AB.
- Didion, M., A. D. Kupferschmid, M. J. Lexer, W. Rammer, R. Seidl, and H. Bugmann. 2009. Potentials and limitations of using large-scale forest inventory data for evaluating forest succession models. Ecological Modelling **220**:133-147.
- Dixon, G. E. 2002. Essential FVS: A User's Guide to the Forest Vegetation Simulator. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center, Fort Collins, CO.
- Duda, H. A. A. 2006. Vergleich forstlicher Managementstrategien: Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Ďurský, J. 1997. Modellierung der Absterbeprozesse in Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Buche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **168**:131-134.
- EAFV. 1966-. Ertragstabeln - Tables de production Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen EAFV, Birmensdorf.
- Erni, V. and R. Lemm. 1995. Ein Simulationsmodell für den Forstbetrieb - Entwurf, Realisierung und Anwendung. Eidg. Forsch.anst. WSL, Birmensdorf.
- Flury, P. 1907. Ertragstabeln für die Fichte und Buche der Schweiz nebst ergänzenden Hilfstabellen für die Zwecke der Bonitierung und Holzmassen-Ermittlung reiner geschlossener Bestände Fäsi & Beer, Zürich.
- Fontes, L., J.-D. Bontemps, H. Bugmann, M. Van Oijen, C. Gracia, K. Kramer, M. Lindner, T. Rötzer, and J. P. Skovsgaard. 2010. Models for supporting forest management in a changing environment. Forest Systems:8-29.
- Frutig, F., O. Thees, R. Lemm, and F. Kostadinov. 2009. Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo - Kenzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. Pages 441-466 *in* O. Thees and R. Lemm, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. vdf Hochschulverlag, Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Gadow, K. v. 2003. Waldstruktur und Wachstum: Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003 / 2004 Universitätsverlag, Göttingen.
- Gillet, F. 2008. Modelling vegetation dynamics in heterogeneous pasture-woodland landscapes. Ecological Modelling **217**:1-18.
- Goudie, J. W., C. M. Di Lucca, W. Klenner, I. R. Cameron, R. Parish, and K. R. Polsson. 2005. Application of Simulation Models to the Design and Analysis of silvicultural Systems in British Columbia. Pages 175-186 *in* Workshop on balancing ecosystem values: Innovative experiments for sustainable forestry. USDA Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-635, Portland, Oregon.
- Gower, S. T. 2003. Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. Pages 169-204.

- Grote, R. and H. Pretzsch. 2002. A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology* **4**:167-180.
- Gschwantner, T., G. Kindermann, and T. Ledermann. 2010. Weiterentwicklung des Wachstumssimulators PrognAus durch Einbindung klimarelevanter Parameter. Pages 11-43 *in* M. Neumann, editor. Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wälder - Entwicklung und vergleichende Evaluierung unterschiedlicher Prognosemodelle (WAMOD), unpublished.
- Hallenbarter, D., H. Hasenauer, and A. Zingg. 2005. Validierung des Waldwachstumsmodells MOSES für Schweizer Wälder. *Schweiz. Z. Forstwes.* **156**:149-156.
- Hasenauer, H. 1994. Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-, Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und Experimentelle Baumforschung, Wien.
- Hasenauer, H. 2000. Die simultanen Eigenschaften von Waldwachstumsmodellen. Parey, Berlin.
- Hasenauer, H. 2006a. Concepts within Tree Growth Modelling. Pages 3-17 *in* H. Hasenauer, editor. Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer, Berlin.
- Hasenauer, H. 2006b. Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer-Verlag, Berlin.
- Hasenauer, H., G. Kindermann, and P. Steinmetz. 2006. The Tree Growth Model MOSES 3.0. Pages 64-70 *in* H. Hasenauer, editor. Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer, Berlin.
- Hasenauer, H. and D. Merkl. 1999. Mortalitätsschätzungen in ungleichaltrigen Fichtenwäldern mit Hilfe Neuronaler Netze. *Umweltinformatik '99 - Umweltinformatik zwischen Theorie und Industrieanwendung*.
- Hinrichs, L. 2006. Untersuchungen zur Simulation von Behandlungspfaden für Buchen-Fichten-Mischbestände. Universität Göttingen.
- Hoffmann, C. W., A. Haller, C. Butz, and V. Plosinjak. 1997. Calibrating the FORECAST forest simulation model to middle European data. Internal report. Page 22. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Holm, S., R. Lemm, and V. Erni. 2012. Handbuch Sortimentsimulator "SorSim" Version 2.0. Page 43 S, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Hynynen, J., A. Ahtikoski, J. Siitonen, R. Sievänen, and J. Liski. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management* **207**:5-18.
- Kahn, M. 1994. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort, München.
- Kaufmann, E. 2001a. Estimation of Standing Timber, Growth and Cut. Pages 162-196 *in* P. Brassel and H. Lischke, editors. Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessment. Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf.

- Kaufmann, E. 2001b. Prognosis and management scenarios. Pages 197-206 in P. Brassel and H. Lischke, editors. Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessment. Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf.
- Kaufmann, E. 2011. Nachhaltiges Holzproduktionspotenzial im Schweizer Wald. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **162**:300-311.
- Keller, W. 1976. Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz, Birmensdorf.
- Keller, W. 1992. Bonität in Fichten-Folgebeständen ehemaliger Fichten-Versuchsflächen der WSL. Pages 123-129 Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde. Jahrestagung vom 1.-3. Juni 1992, Grillenburg/Sachsen. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten Freiburg i. Br.
- Kellomäki, S. and H. Väisänen. 1997. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. Ecological Modelling **97**:121-140.
- Kimmins, J. P., J. A. Blanco, B. Seely, C. Welham, and K. Scoullar. 2010. Forecasting forest futures: a hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values. Earthscan, London.
- Kimmins, J. P., D. Mailly, and B. Seely. 1999. Modelling forest ecosystem net primary production: The hybrid simulation approach used in FORECAST. Ecological Modelling **122**:195-224.
- Kindermann, G. 2004. Wachstumssimulation in Mischbeständen. Universität für Bodenkultur, Wien.
- Kindermann, G. 2010. Eine klimasensitive weiterentwicklung des kreisflächenzuwachmodells aus PrognAus. Austrian Journal of Forest Science **127**:147-178.
- Kittenberger, A. 2003. Generieren von Baumverteilungsmustern. Universität für Bodenkultur, Wien.
- Klopf, M., C. Thurnher, and H. Hasenauer. 2011. MosesFramework - Benutzerhandbuch. Page 124. Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau.
- Köhl, M., R. Hildebrandt, K. Olschofsky, R. Köhler, T. Rötzer, T. Mette, H. Pretzsch, M. Köthke, M. Dieter, M. Abiy, F. Makeschin, and B. Kenter. 2010. Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. Carbon Balance and Management **5**:9.
- Landsberg, J. J. and R. H. Waring. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. Forest Ecology and Management **95**:209-228.
- Larocque, G. R. 2009. Forest Models. Pages 1663-1673 Encyclopedia of Ecology. Elsevier, Oxford.
- Ledermann, T. 2002. Ein Einwuchsmodell aus den Daten der Österreichischen Waldinventur 1981-1996. Centralbl Ges Forstwesen **119**:40-77.
- Ledermann, T. 2004. PROGNAUS - ein Waldwachstumsmodell zur Fortschreibung von Inventurdaten. Page 6. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft BFW, Institut für Waldwachstum und Waldbau, Wien.
- Ledermann, T. 2007. Holz- und Biomassenaufkommensstudie für Österreich - Bedeutung der Baumkrone für die Abschätzung von Zuwachs, Ast- und Nadelmasse. Pages 193-199 in J.

- Nagel, editor. Jahrestagung, Alsfeld-Eudorf, 21.-23. Mai 2007. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Göttingen.
- Ledermann T. 2006. Description of PrognAus for Windows 2.2. Pages 71-78 in H. Hasenauer, editor. Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer, Berlin.
- Lemm, R. 1991. Ein dynamisches Forstbetriebs-Simulationsmodell - Prognosen von betriebsspezifischen Waldentwicklungen, Waldschäden und deren monetäre Bewertung unter variablen Einflussgrößen. ETH Zürich, Diss. Nr. 9369.
- Lemm, R. and V. Erni. 1994. FBSM - Ein Simulationsmodell für Forstbetriebe, Benutzeranleitung. Eidg. Forsch.anst. WSL, Birmensdorf.
- Lemm, R. and O. Thees. 2009. Evaluation von IT-Systemen für forstliches E-Business mittels Analytic Hierarchy Process (AHP). Pages 469-498 in O. Thees and R. Lemm, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. vdf Hochschulverlag, Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Lewandowski, A. and K. Von Gadow. 1997. Ein heuristischer Ansatz zur Reproduktion von Waldbeständen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **168**:170-174.
- Lexer, M. J. and K. Hönninger. 2001. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. Forest Ecology and Management **144**:43-65.
- Lin, C. R., J. Buongiorno, and M. Vasievich. 1996. A multi-species, density-dependent matrix growth model to predict tree diversity and income in northern hardwood stands. Ecological Modelling **91**:193-211.
- Lischke, H., N. E. Zimmermann, J. Bolliger, S. Rickebusch, and T. J. Löffler. 2006. TreeMig: A forest-landscape model for simulating spatio-temporal patterns from stand to landscape scale. Ecological Modelling **199**:409-420.
- Liski, J., T. Palosuo, M. Peltoniemi, and R. Sievänen. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. Ecological Modelling **189**:168-182.
- Mäkelä, A., J. Landsberg, A. R. Ek, T. E. Burk, M. Ter-Mikaelian, G. I. Ågren, C. D. Oliver, and P. Puttonen. 2000. Process-based models for forest ecosystem management: Current state of the art and challenges for practical implementation. Tree Physiology **20**:289-298.
- Matala, J., J. Hynynen, J. Miina, R. Ojansuu, H. Peltola, R. Sievanen, H. Väisänen, and S. Kellomäki. 2003. Comparison of a physiological model and a statistical model for prediction of growth and yield in boreal forests. Ecological Modelling **161**:95-116.
- Matala, J., R. Ojansuu, H. Peltola, H. Raitio, and S. Kellomäki. 2006. Modelling the response of tree growth to temperature and CO₂ elevation as related to the fertility and current temperature sum of a site. Ecological Modelling **199**:39-52.
- Matala, J., R. Ojansuu, H. Peltola, R. Sievänen, and S. Kellomäki. 2005. Introducing effects of temperature and CO₂ elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. Ecological Modelling **181**:173-190.
- Milner, K. S., D. W. Coble, A. J. McMahan, and E. L. Smith. 2003. FVSBGC: a hybrid of the physiological model STAND-BGC and the forest vegetation simulator. Can. J. For. Res. **33**:466-479.

- Monserud, A. 1975. Trials with program FOREST: Growth and reproduction simulation for mixed species even-or uneven-aged forest stands. Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Research Notes **30**:56-73.
- Monserud, R. A. 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *FBMIS* **1**:35-47.
- Monserud, R. A. and H. Sterba. 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management* **80**:57-80.
- Monserud, R. A. and H. Sterba. 1999. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management* **113**:109-123.
- Moore, A. D. 1989. On the maximum growth equation used in forest gap simulation models. *Ecological Modelling* **45**:63-67.
- Nachtmann, G. 2006. Height increment models for individual trees in Austria depending on site and competition. *Austrian Journal of Forest Science* **123**:199-222.
- Nagel, J. 1999. Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines Waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Sauerländer, Frankfurt am Main.
- Nagel, J. 2003. TreeGroSS Tree Growth Open Source Software - a tree growth model component. Page 25. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum.
- Nagel, J. 2009. Waldwachstumssimulation mit dem Java Software Paket TreeGroSS - Handbuch. Page 83. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Nagel, J. and G. S. Biging. 1995. Schätzung der Parameter der WEIBULL-Funktion zur Generierung von Durchmesservertellungen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **166**:185-189.
- Nagel, J. and M. Schmidt. 2006. The Silvicultural Decision Support System BWINPro. Pages 59-63 in H. Hasenauer, editor. *Sustainable forest management: growth models for Europe*. Springer, Berlin.
- Neumann, M. 2010. Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wälder - Entwicklung und vergleichende Evaluierung unterschiedlicher Prognosemodelle (WAMOD). Page 147 Projektendbericht, unpublished.
- Okudan, G. 2006. A multi-criteria decision-making methodology for optimum selection of a solid modeller for design teaching and practice. *Journal of Engineering Design* **17**:159-175.
- Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole, and D. S. Ojima. 1987. Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**:1173-1179.
- Parton, W. J., J. W. B. Stewart, and C. V. Cole. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* **5**:109-131.
- Pommerening, A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* **75**:305-324.
- Porté A. and Bartelink H.H. 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling* **150**:141-188.

- Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud, and A. M. Solomon. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* **19**:117-134.
- Pretzsch, H. 1993. Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN.
- Pretzsch, H. 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag, Berlin.
- Pretzsch, H. and P. Biber. 2005. A re-evaluation of Reineke's rule and stand density index. *Forest Science* **51**:304-320.
- Pretzsch, H., P. Biber, and J. Ďurský. 2002a. The single tree-based stand simulator SILVA: Construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* **162**:3-21.
- Pretzsch, H., P. Biber, J. Ďurský, K. v. Gadow, H. Hasenauer, G. Kändler, G. Kenk, E. Kublin, J. Nagel, T. Pukkala, J. P. Skovsgaard, R. Sadtke, and H. Sterba. 2002b. Recommendations for Standardized Documentation and Further Development of Forest Growth Simulators. *Forstw. Cbl.* **121**:138-151.
- Pretzsch, H., P. Biber, J. Ďurský, and R. Sadtke. 2006. The Individual-Tree-Based Stand Simulator SILVA. Pages 78-84 in H. Hasenauer, editor. *Sustainable forest management: growth models for Europe*. Springer, Berlin.
- Pretzsch, H. and J. Ďurský. 2001. Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum- und Bestandesebene. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **172**:146-150.
- Pretzsch, H., R. Grote, B. Reineking, T. Rötzer, and S. Seifert. 2008. Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Annals of Botany* **101**:1065-1087.
- Pretzsch, H. and S. Seifert. 2000. Methoden zur Visualisierung des Waldwachstums. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **119**:100-113.
- Pukkala, T. and J. Miina. 2006. STAND: A Decision Support System for the Management of Even-Aged Stands in Finland. Pages 85-91 in H. Hasenauer, editor. *Sustainable forest management: growth models for Europe*. Springer, Berlin.
- Rasche, L., L. Fahse, A. Zingg, and H. Bugmann. 2011. Getting a virtual forester fit for the challenge of climatic change. *Journal of Applied Ecology* **48**:1174-1186.
- Rasche, L., L. Fahse, A. Zingg, and H. Bugmann. 2012. Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecological Modelling* **232**:133-143.
- Rehfeldt, G. E., N. L. Crookston, M. V. Warwell, and J. S. Evans. 2006. Empirical analyses of plant-climate relationships for the Western United States. *International Journal of Plant Sciences* **167**:1123-1150.
- Rehfeldt, G. E., D. E. Ferguson, and N. L. Crookston. 2009. Aspen, climate, and sudden decline in western USA. *Forest Ecology and Management* **258**:2353-2364.
- Reineke, L. H. 1933. Prefecting a stand density index for even-aged forests. *J. Agric. R.* **46**:627-638.

- Risch, A. C., C. Heiri, and H. Bugmann. 2005. Simulating structural forest patterns with a forest gap model: A model evaluation. *Ecological Modelling* **181**:161-172.
- Rötzer, T., T. Seifert, and H. Pretzsch. 2009. Modelling above and below ground carbon dynamics in a mixed beech and spruce stand influenced by climate. *European Journal of Forest Research* **128**:171-182.
- Running, S. W. and J. C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* **42**:125-154.
- Saaty, T. L. 1995. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS Publications, Pittsburgh, PA.
- Saaty, T. L. 2005. Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. RWS Publications, Pittsburgh, PA.
- Saaty, T. L. and L. L. Vargas. 2012. Models, methods, concepts & application of the analytic hierarchy process New York, Springer.
- Salminen, H., M. Lehtonen, and J. Hynynen. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Computers and Electronics in Agriculture* **49**:103-113.
- Schädelin, W. 1934. Die Durchforstung als Auslese- und Veredlungsbetrieb höchster Wertleistung. Haupt, Bern.
- Schmid, S., E. Thürig, E. Kaufmann, H. Lischke, and H. Bugmann. 2006a. Effect of forest management on future carbon pools and fluxes: A model comparison. *Forest Ecology and Management* **237**:65-82.
- Schmid, S., A. Zingg, P. Biber, and H. Bugmann. 2006b. Evaluation of the forest growth model SILVA along an elevational gradient in Switzerland. *European Journal of Forest Research* **125**:43-55.
- Schumacher, S. and H. Bugmann. 2006. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Global Change Biology* **12**:1435-1450.
- Schumacher, S., H. Bugmann, and D. J. Mladenoff. 2004. Improving the formulation of tree growth and succession in a spatially explicit landscape model. *Ecological Modelling* **180**:175-194.
- Schütz J.P. 2006. Funktionelle Bestandescharakterisierung: Die Fortschreibung der Stammzahlverteilungen, ein versprechender Weg zur Modellierung der Bestandesentwicklung. Pages 54-63 in J. Nagel, editor. Jahrestagung, Stauf, 29-31. Mai 2006. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Göttingen.
- Schütz J.P. 2008. Ertragsniveau und maximale Bestockungsdichte als Grundlage für die Modellierung der natürlichen Mortalität. Pages 123-132 in J. Nagel, editor. Jahrestagung, Trippstadt, 5-8. Mai 2008. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Göttingen.
- Schütz J.P. and Zingg A. 2007. Zuwachsprognose nach der sozialen Hierarchie im Entwicklungs- und Wachstumsmodell SiWaWa. Pages 180-187 in J. Nagel, editor. Jahrestagung, Alsfeld-Eudorf, 21.-23. Mai 2007. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Göttingen.

- Schütz J.P. and Zingg A. 2010. Improving estimations of maximal stand density by combining Reineke's size-density rule and the yield level, using the example of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. For. Sci* **67**:12.
- Schütz J.P., Zingg A., and R. Chr. 2008. Neue Ertragstafeln dritter Generation. Page 8.
- Schwalm, C. R. and A. R. Ek. 2004. A process-based model of forest ecosystems driven by meteorology. *Ecological Modelling* **179**:317-348.
- Seidl, R., P. Baier, W. Rammer, A. Schopf, and M. J. Lexer. 2007. Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests. *Ecological Modelling* **206**:383-399.
- Seidl, R., M. J. Lexer, D. Jäger, and K. Hönninger. 2005. Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model. *Tree Physiology* **25**:939-951.
- Seidl, R., W. Rammer, and M. J. Lexer. 2009. Schätzung von Bodenmerkmalen und Modellparametern für die Waldökosystems simulation auf Basis einer Großrauminventur. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **180**:35-44.
- Seidl, R., W. Rammer, and M. J. Lexer. 2011. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Climatic Change* **106**:225-254.
- Shugart, H. H. and D. C. West. 1977. Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journ. Environ. Manag.* **5**:161-179.
- Söderbergh, I. and T. Ledermann. 2003. Algorithms for simulating thinning and harvesting in five European individual-tree growth simulators: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* **39**:115-140.
- Solomon, D. S., D. A. Herman, and W. B. Leak. 1995. FIBER 3.0: an ecological growth model for northeastern forest types. Northeastern Forest Experiment Station, Radnor, Pa.
- Sprauer, S., M. Schmidt, and J. Nagel. 2011. Quantitative Grundlagen zur Ableitung asymmetrischer Kornen in Nordwestdeutschland. Pages 81-91 in J. Nagel, editor. Jahrestagung 6.- 8. Juni 2011, Cottbus. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde Göttingen.
- Stage, A. R. 1973. Prognosis Model for Stand Development. Res. Pa INT-137. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT 84401.
- Sterba, H. 1981. Natürlicher Bestockungsgrad und Reinekes SDI. *Centralbl Ges Forstwesen* **98**:101-116.
- Strandman, H., H. Vaisanen, and S. Kellomaki. 1993. A procedure for generating synthetic weather records in conjunction of climatic scenario for modelling of ecological impacts of changing climate in boreal conditions. *Ecological Modelling* **70**:195-220.
- Thürig, E. and E. Kaufmann. 2010. Increasing carbon sinks through forest management: A model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. *European Journal of Forest Research* **129**:563-572.

- Thürig, E., E. Kaufmann, R. Frisullo, and H. Bugmann. 2005. Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. *Forest Ecology and Management* **204**:51-66.
- Tremer, N. 2008. Untersuchungen zur Verjüngung von Waldbeständen in Nordwestdeutschland. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Vanclay, J. K. 1992. Modelling regeneration and recruitment in a tropical rain forest. *Canadian Journal of Forest Research* **22**:1235-1248.
- Weiskittel, A. R., D. W. Hann, J. A. Kershaw, and J. K. Vanclay. 2011. *Forest Growth and Yield Modeling*. Wiley-Blackwell, Sussex.
- Zeide, B. 1993. Analysis of Growth Equations. *Forest Science* **39**:594-616.

Anhang

A1 Paarweiser Vergleich der Kriterien	107
A2 Paarweiser Vergleich der Modelle	111

A1 Paarweiser Vergleich der Kriterien

Vergleich von...	Modellansatz	Anwendungsbereich	Gültigkeitsbereich	Eingabemöglichkeit	Wachstum	Ausgaben	Umwelteinflüsse	Software	Gewicht normiert
Modellansatz	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	0.33	0.1206
Anwendungsbereich	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	0.33	0.1206
Gültigkeitsbereich	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	0.33	0.1206
Eingabemöglichkeit	0.33	0.33	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.25	0.0455
Wachstum	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	0.33	0.1206
Ausgaben	0.33	0.33	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.25	0.0455
Umwelteinflüsse	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	0.33	0.1206
Software	3.00	3.00	3.00	4.00	3.00	4.00	3.00	1.00	0.3056

$\lambda_{\max} = 8.106$

C.I. = 0.015

C.R. = 0.011

Vergleich von...	räumliche Auflösung	Altersabhängigkeit	Gewicht normiert
räumliche Auflösung	1.00	4.00	0.80
Altersabhängigkeit	0.25	1.00	0.25

$\lambda_{\max} = 2.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

Vergleich von...	waldbauliche Variantenstudien	Forstschreibung von Beständen	geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	Gewicht normiert
waldbauliche Variantenstudien	1.00	1.00	3.00	0.4286
Forstschreibung von Beständen	1.00	1.00	3.00	0.4286
geeignet für Praxis, Forschung, Lehre	0.33	0.33	1.00	0.1428

$\lambda_{\max} = 3.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

Vergleich von...	Flächenform/Grösse	Informationen aus Stichprobe/Inventur	Erzeugung fehlender Informationen	Gewicht normiert
Flächenform/Grösse	1.00	0.33	0.33	0.1428
Informationen aus Stichprobe/Inventur	3.00	1.00	1.00	0.4286
Erzeugung fehlender Informationen	3.00	1.00	1.00	0.4286

$\lambda_{\max} = 3.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

Vergleich von...	Höhen-wachstum	Dicken-wachstum	Kronenmodell	Mortalitäts-modell	Verjüngung/ Einwuchs	Erfassung des Standorts	Gewicht nor-miert
Höhen-wachstum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.1429
Dicken-wachstum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.1429
Kronenmodell	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.1429
Mortalitäts-modell	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.1429
Verjüngung/ Einwuchs	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.1429
Erfassung des Standorts	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	0.2857

$\lambda_{\max} = 6.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

Vergleich von...	Baumlisten	Bestandes-kennwerte	ökonomische Kenn-werte	Struktur-charakteristika	Biomassefraktionen	Gewicht normiert
Baumlisten	1.00	1.00	3.00	3.00	5.00	0.3435
Bestandes-kennwerte	1.00	1.00	3.00	3.00	5.00	0.3435
ökonomische Kenn-werte	0.33	0.33	1.00	1.00	3.00	0.1290
Struktur-charakteristika	0.33	0.33	1.00	1.00	3.00	0.1290
Biomassefraktionen	0.20	0.20	0.33	0.33	1.00	0.0551

$\lambda_{\max} = 5.056$

C.I. = 0.014

C.R. = 0.013

Vergleich von...	Abbildung von Störungen	Abbildung des Klimas	Gewicht normiert
Abbildung von Störungen	1.00	0.1429	0.1250
Abbildung des Klimas	7.00	1.00	0.8750

$\lambda_{\max} = 2.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

Vergleich von...	Verfügbarkeit des Programmcode	modularer Aufbau	Dokumentation	Gewicht normiert
Verfügbarkeit des Programmcode	1.00	1.00	2.00	0.4000
modularer Aufbau	1.00	1.00	2.00	0.4000
Dokumentation	0.50	0.50	1.00	0.2000

$\lambda_{\max} = 3.000$

C.I. = 0.000

C.R. = 0.000

A2 Paarweiser Vergleich der Modelle

Kriterium			BWINPro	SILVA	MOSES	PrognAus	
1.1	räumliche Auflösung	BWINPro	1.00	1.00	1.00	3.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	3.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	3.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.33	0.33	0.33	1.00	
1.2	Altersabhängigkeit	BWINPro	1.00	0.20	1.00	0.20	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	5.00	1.00	5.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	0.20	1.00	0.20	C.R. = 0.000
		PrognAus	5.00	1.00	5.00	1.00	
2.1	waldbauliche Variantenstudien	BWINPro	1.00	1.00	3.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.043
		SILVA	1.00	1.00	3.00	5.00	C.I. = 0.014
		MOSES	0.33	0.33	1.00	3.00	C.R. = 0.016
		PrognAus	0.20	0.20	0.33	1.00	
2.2	Fortschreibung von Beständen	BWINPro	1.00	1.00	1.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	5.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	5.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.20	0.20	0.20	1.00	
2.3	geeignet für Praxis sowie Forschung und Lehre	BWINPro	1.00	1.00	4.00	4.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	4.00	4.00	C.I. = 0.000
		MOSES	0.25	0.25	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.25	0.25	1.00	1.00	
3.1	Regionalbezug / Standortsbereich	BWINPro	1.00	0.20	0.20	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.033
		SILVA	5.00	1.00	1.00	3.00	C.I. = 0.011
		MOSES	5.00	1.00	1.00	3.00	C.R. = 0.012
		PrognAus	1.00	0.33	0.33	1.00	
3.2	Mischungstypen und Bestandesaufbau	BWINPro	1.00	1.00	1.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	1.00	1.00	
3.3	abgedeckte Behandlungsvarianten	BWINPro	1.00	3.00	3.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.043
		SILVA	0.33	1.00	1.00	3.00	C.I. = 0.014
		MOSES	0.33	1.00	1.00	3.00	C.R. = 0.016
		PrognAus	0.20	0.33	0.33	1.00	
3.4	verfügbare Baumarten	BWINPro	1.00	3.00	3.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	0.33	1.00	1.00	0.33	C.I. = 0.000
		MOSES	0.33	1.00	1.00	0.33	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	3.00	3.00	1.00	
4.1	Flächenform und Größe	BWINPro	1.00	1.00	1.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	1.00	1.00	
4.2	Eingabeinformation aus Stichprobe / Inventur	BWINPro	1.00	1.00	1.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	1.00	1.00	
4.3	Erzeugung fehlender Informationen	BWINPro	1.00	1.00	1.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	5.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	5.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.20	0.20	0.20	1.00	

5.1	Höhenwachstum	BWINPro	1.00	1.00	1.00	0.33	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	0.33	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	0.33	C.R. = 0.000
		PrognAus	3.00	3.00	3.00	1.00	
5.2	Dickenwachstum	BWINPro	1.00	3.00	3.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	0.33	1.00	1.00	0.33	C.I. = 0.000
		MOSES	0.33	1.00	1.00	0.33	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	3.00	3.00	1.00	
5.3	Kronenmodell	BWINPro	1.00	1.00	1.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	1.00	1.00	
5.4	Mortalitätsmodell	BWINPro	1.00	2.00	2.00	2.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	0.50	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	0.50	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.50	1.00	1.00	1.00	
5.5	Verjüngung / Einwuchs	BWINPro	1.00	1.00	1.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	1.00	1.00	
5.6	Erfassung des Stand-orts	BWINPro	1.00	0.20	1.00	0.20	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	5.00	1.00	5.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	0.20	1.00	0.20	C.R. = 0.000
		PrognAus	5.00	1.00	5.00	1.00	
6.1	Baumlisten	BWINPro	1.00	1.00	3.00	1.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	3.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	0.33	0.33	1.00	0.33	C.R. = 0.000
		PrognAus	1.00	1.00	3.00	1.00	
6.2	Bestandeskennwerte	BWINPro	1.00	1.00	1.00	4.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	4.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	4.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.25	0.25	0.25	1.00	
6.3	ökonomische Kenn-werte	BWINPro	1.00	0.20	0.33	3.00	$\lambda_{\max}$ = 4.117
		SILVA	5.00	1.00	3.00	7.00	C.I. = 0.039
		MOSES	3.00	0.33	1.00	5.00	C.R. = 0.044
		PrognAus	0.33	0.14	0.20	1.00	
6.4	Strukturcharakteristika auf Bestandes- und Betriebsebene	BWINPro	1.00	1.00	3.00	3.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	3.00	3.00	C.I. = 0.000
		MOSES	0.33	0.33	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.33	0.33	1.00	1.00	
6.5	Biomassefraktionen	BWINPro	1.00	1.00	1.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	1.00	5.00	C.I. = 0.000
		MOSES	1.00	1.00	1.00	5.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.20	0.20	0.20	1.00	
7.1	Störungen	BWINPro	1.00	1.00	0.25	0.25	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	1.00	1.00	0.25	0.25	C.I. = 0.000
		MOSES	4.00	4.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	4.00	4.00	1.00	1.00	
7.2	Klimaeinfluss	BWINPro	1.00	0.33	3.00	0.33	$\lambda_{\max}$ = 4.043
		SILVA	3.00	1.00	5.00	1.00	C.I. = 0.014
		MOSES	0.33	0.20	1.00	0.20	C.R. = 0.016
		PrognAus	3.00	1.00	5.00	1.00	

8.1	Verfügbarkeit es Programmcode	BWINPro	1.00	5.00	5.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.000
		SILVA	0.20	1.00	1.00	1.00	C.I. = 0.000
		MOSES	0.20	1.00	1.00	1.00	C.R. = 0.000
		PrognAus	0.20	1.00	1.00	1.00	
8.2	modularer Aufbau	BWINPro	1.00	3.00	3.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.043
		SILVA	0.33	1.00	1.00	3.00	C.I. = 0.014
		MOSES	0.33	1.00	1.00	3.00	C.R. = 0.016
		PrognAus	0.20	0.33	0.33	1.00	
8.3	Dokumentation	BWINPro	1.00	3.00	1.00	5.00	$\lambda_{\max}$ = 4.043
		SILVA	0.33	1.00	0.33	3.00	C.I. = 0.014
		MOSES	1.00	3.00	1.00	5.00	C.R. = 0.016
		PrognAus	0.20	0.33	0.20	1.00	