

## Analyse der Waldentwicklung unter veränderten Umweltbedingungen – Neue Informationen für die Forstplanung durch Kopplung von Modellen am Beispiel des Forstbetriebes Zittau

*Analysing forest development under changing environmental conditions – novel information for the forest management by combining models demonstrated for the forest enterprise Zittau*

Ralf Moshhammer, Thomas Rötzer, Hans Pretzsch

### Abstract

*Forest growth models are versatile instruments for analysing the influence of environmental changes on plant growth. The aim of this study was to analyse possible adaptation strategies by model simulations combining different growth models. By using the process oriented growth model BALANCE we estimated the influence of climate change on tree growth. The reaction patterns of different and region specific forest stands were then implemented as algorithms in the management-oriented growth model SILVA. The growth of forest stands was simulated with SILVA over 30 years focusing on management options to test different adaptation strategies. This approach of combining models with different paradigms is demonstrated for the forest enterprise Zittau. The results of the simulations for the Zittau enterprise convey how forest planning can profit by long term information from scenario analysis. Climate change simulations show that forest stands can loose capacity – e.g. increase capacity – to react on management measures. That means a loss of regulation alternatives for forest planning under the used climate change scenario. A hardwood percentage of 27% in the Zittau forest, on the other hand, possibly has a certain buffer function and moderates the climate change effects on production.*

*Keyword: forest management, climate change, modelling, simulation, Lausitz*

### Zusammenfassung

Waldwachstumsmodelle sind ein ideales Werkzeug, um Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf das Wachstum der Bäume aufzuzeigen. Ziel des Teilprojektes „Waldwachstumsreaktionen und Systemprozesse“ im Rahmen von ENFORCHANGE war, durch die Kombination von Wachstumsmodellen mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen regionale Auswirkungen standörtlicher und klimatischer Veränderungen auf die Waldentwicklung zu analysieren und somit bessere Grundlagen für eine angepasste Forstbetriebsplanung zu schaffen. Anhand des physiologischen Wachstumsmodells BALANCE wurde der Einfluss der prognostizierten Klimaänderungen auf das Wachstum der Bäume abgeschätzt. Die für verschiedene Baumarten

und regionaltypische Bestände gewonnenen Reaktionsmuster konnten anschließend in das managementorientierte Wachstumsmodell SILVA übertragen werden. Die Entwicklung repräsentativer Waldbestände wurde in SILVA für einen Zeitraum von 30 Jahren simuliert, wobei verschiedene Nutzungsszenarien untersucht wurden, um Handlungsspielräume und mögliche strategische Planungen für Forstbetriebe aufzuzeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse für die praktische Betriebsplanung wurden am Beispiel des kommunalen Forstbetriebes Zittau dargestellt. Es wird deutlich, wie die Forstplanung von derartigen Szenarioanalysen profitieren kann. Die Simulationsrechnungen unter Annahme geänderter Klimaverhältnisse zeigen, dass die Bestände unter diesen Bedingungen ein verringertes Reaktionsvermögen auf waldbauliche Maßnahmen aufweisen, was insbesondere bei den Zuwächsen bemerkbar ist. Dabei haben Laubholzbestände, die bereits jetzt auf 27 % der Betriebsfläche stocken, vermutlich eine Pufferwirkung und mildern die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Produktivität des Gesamtbetriebes ab.

Schlüsselwörter: Forstplanung, Klimaänderung, Modellierung, Simulation, Lausitz

### 1. Einleitung

Um das Wachstum von Wäldern in Abhängigkeit von sich ändernden Umweltbedingungen wie z.B. einem sich ändernden Klima und/oder sich ändernden Bodenbedingungen darstellen und gleichzeitig die Wirkung möglicher gegensteuernder Maßnahmen abschätzen zu können, ist die Kopplung von Wachstumsmodellen von großer Bedeutung (PRETZSCH et al. 2008). Durch die Kopplung von Modellen mit unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung, aber auch mit unterschiedlichen Berechnungsalgorithmen und Zielsetzungen (z. B. Einzelbaum-, Bestandes oder Betriebsanalysen), lassen sich Wachstumssimulationen über Maßstabsebenen hinweg erstellen und analysieren. Mittels der Modellkopplung können Erkenntnisse gewonnen werden, die durch die Verwendung der einzelnen Modelle allein nicht möglich wären.

Ziel des Teilprojektes „Waldwachstumsreaktionen und Systemprozesse“ im Rahmen von ENFORCHANGE war die

Abschätzung des zukünftigen Wachstums und der Holzproduktion für typische Waldbestände in der Untersuchungsregion Obere Lausitz. Neben unterschiedlichen waldbaulichen Nutzungsintensitäten sollten auch Auswirkungen von standörtlichen und klimatischen Veränderungen auf die Waldentwicklung der Region aufgezeigt werden. Natürlich können keine exakten Vorhersagen gemacht werden. Aussagen zu mittel- bis langfristigen Entwicklungstrends bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen sind jedoch möglich. Das physiologische Wachstumsmodell BALANCE (GROTE UND PRETZSCH 2002; RÖTZER et al. 2009) wird im Rahmen dieser Studie primär als Forschungsinstrument verwendet, um Reaktionsmuster des Baum- und Bestandeswachstums auf zu erwartende Umweltveränderungen abzuschätzen. Um Aussagen über die Holzproduktion und das langfristige Waldwachstum auf einer für das forstliche Management operationalen Ebene treffen zu können, wird das Managementmodell SILVA (KAHN und PRETZSCH 1997; PRETZSCH et al. 2002) eingesetzt. Welche Informationen der forstlichen Praxis für das Betriebsmanagement mit Hilfe von Modellsimulationen zur Verfügung gestellt werden können, wird am Beispiel von Prognoserechnungen für den kommunalen Forstbetrieb Zittau gezeigt.

## 2. Datengrundlage

### Kommunaler Forstbetrieb Zittau

Der Forstbetrieb Zittau liegt in der Region Obere Lausitz im Wuchsgebiet 48 Zittauer Gebirge an der Grenze zu Polen und Tschechien. Mit über 4.000 ha ist die Stadt Zittau der größte kommunale Waldbesitzer in Sachsen. Die bestandsweisen Erhebungen im Rahmen der in den Jahren 2007/08 stattgefundenen Forsteinrichtung bilden die Grundlage für die Wachstumssimulationen.

Die Waldflächen des Betriebes lassen sich von den Wuchsbedingungen her in zwei Hauptgebiete unterteilen: die unteren und die oberen Berglagen des Zittauer Gebirges. Die Prognoserechnungen beziehen sich auf die 1950 ha in den unteren Berglagen, da hier der Schwerpunkt der Bewirtschaftungsaktivitäten liegt. In diesem Bereich finden sich überwiegend terrestrische Standorte, auf Teilflächen kommen auch wechselfeuchte Standorte vor. Die Hauptnährkraftstufe ist für den gesamten simulierten Betriebsbereich als „mittel“ klassifiziert (LAF 2002). Für die Forstplanung wurden die einzelnen Bestände im Gelände sehr detailliert abgegrenzt und beschrieben. Insgesamt wurden im Bereich der unteren Berglagen 1287 Einzelbestände ausgeschieden, dabei reichen die Bestandesflächen von 0,1 ha bis 23 ha. Die durchschnittliche Flächengröße liegt bei 1,5 ha pro Bestand. Dominierende Baumart mit einem Grundflächenanteil von 46% ist die Fichte. Kiefer und Lärche haben zusammen einen Anteil von 27%. Die Laubhölzer nehmen insgesamt einen Anteil von etwas über einem Viertel der Gesamtgrundfläche ein, wobei Buche mit 9% und Eiche mit 7% hier den Hauptanteil aufweisen. Die restlichen 11% verteilen sich auf diverse Laubhölzer, überwiegend Weichlaub- und Pionierholzarten. Die Altersklassenverteilung in Tabelle 1 zeigt, dass die Bestände auf fast der Hälfte der Fläche bereits älter als 80 Jahre sind.

Tab. 1: Verteilung der Waldflächen im Forstbetrieb Zittau über 20-jährige Altersklassen.

Table 1: Forest area distribution over 20-year age classes of the forest enterprise Zittau.

Altersklasse	Flächenanteile	
	Ha	%
1 bis 20 Jahre	115	6 %
21 bis 40 Jahre	328	16 %
41 bis 60 Jahre	414	21 %
61 bis 80 Jahre	218	11 %
81 bis 100 Jahre	716	37 %
101 bis 120 Jahre	128	7 %
über 120 Jahre	34	2 %

Der durch die Forstplanung geschätzte aufstockende Vorrat liegt im Mittel bei 228 Efm/ha, der laufende jährliche Zuwachs auf den in die Prognoserechnungen einbezogenen Flächen wird aktuell auf 7,7 bis 8,7 Efm/ha und Jahr geschätzt. Die Planungen sehen für das nächste Jahrzehnt jährliche Nutzungen von 9.600 Efm pro Jahr vor, was im Mittel 4,9 Efm/ha und Jahr entspricht und damit deutlich unter den laufenden Zuwächsen liegt.

### Klimaszenarien

Die meteorologischen Daten der Station Görlitz stellen die Grundlage der Wachstumssimulationen für den Betrieb Zittau dar. Werte der Jahre 1981 bis 2000 bilden dabei das gegebene Klima ab. Daten der Zeiträume 2081 bis 2100 basieren auf den Klimaszenarien A2t und B1t und stellen mögliche Klimaprojektionen für den Betrieb dar (BERNHOFER et al. 2007). Den Vorgaben von IPCC (2007) entsprechend unterstellt das Szenarium A1 eine Welt mit raschem Wirtschaftswachstum und der schnellen Einführung neuer Technologien mit erhöhter Energieeffizienz, beim Szenarium B1 dagegen stehen globale Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit im Zentrum. Szenarioumlauf „t“ bedeutet, dass von den jeweiligen drei Wettreg-Simulationen (feucht, mittel, trocken) die Trockenvariante verwendet worden ist (ENKE et al. 2005). Abbildung 1 zeigt die über die 20 Jahre gemittelten Monatswerte von Temperatur und Niederschlag.

Die Temperaturen zeigen für beide Klimaszenarien in allen Monaten eine Erhöhung, die in den Wintermonaten mit bis zu 4,5 °C (A2t, Februar) am größten ist, während die Zunahme in den Sommermonaten bis 2,7 °C beträgt (A2t, Juli). Beim Niederschlag erkennt man in den Sommermonaten einen deutlichen Rückgang um bis zu 49% (A2t, Juli), im Winter hingegen nimmt der monatliche Niederschlag um bis 10% zu (A2t und B1t, Februar).

In der Summe über das Jahr ergibt sich so für das Klimaszenarium A2t bzw. B1t ein Niederschlag von 455 mm bzw. 522 mm. Über die Jahre 1981 bis 2000 liegt der mittlere jährliche Niederschlag bei 569 mm. Die Jahresmitteltemperatur dieses Zeitraums liegt bei 8,7 °C und erhöht sich unter dem Klimaszenarium A2t bzw. B1t auf 11,2 °C bzw. 10,3 °C.

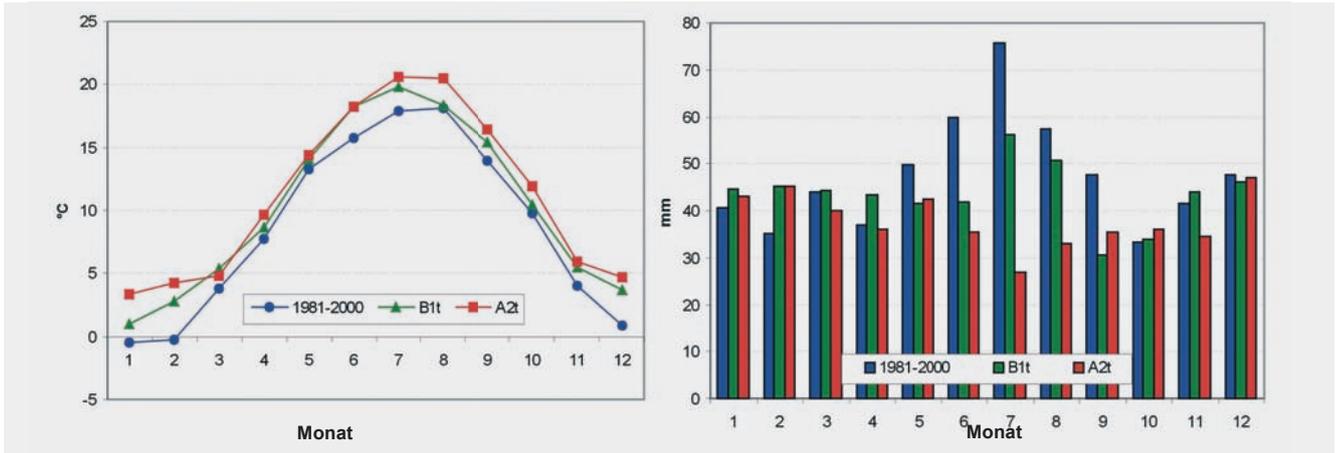


Abb. 1: Mittlere Monatswerte der Temperatur (links) und des Niederschlags (rechts) für den Zeitraum 1981–2000 sowie für die Klimaszenarien A2t und B1t über die Jahre 2081–2100 für den Betrieb Zittau.

Fig. 1: Mean monthly temperature (left) and precipitation (right) values for the period 1981–2000 and for the period 2081–2100 of the climate scenarios A2t and B1t for the forest enterprise Zittau.

### 3. Methodik

#### Modellkopplung

Für die vorliegenden Untersuchungen zur Waldentwicklung unter veränderten Umweltbedingungen im Forstbetrieb Zittau werden die Modelle BALANCE und SILVA verwendet. Hierbei müssen zunächst mit dem ökophysiologischen Prozessmodell BALANCE Reaktionsmuster des Waldwachstums für die einzelnen Baumarten aufgrund von Umweltveränderungen erzeugt werden. Für einzelne Bestände unterschiedlicher Altersklassen wird das Wachstum unter gegebenen und möglichen künftigen Klimaverhältnissen über kurze Zeitabschnitte simuliert. Die relativen Veränderungen der Biomasse, der Höhe oder des Durchmessers lassen sich dann auf die Potenzialkurven übertragen. Die artspezifischen Potenzialkurven geben die maximal mögliche Höhe eines Einzelbaumes über dem Alter vor, aus welcher dann in Abhängigkeit von Konkurrenzsituation und Zufallseffekten die tatsächlichen Höhen der Einzelbäume ermittelt werden. Sie

bilden das Verbindungsglied zum Modell SILVA, dessen standortabhängige Prognosen auf Potenzialkurven gründen (KAHN 1994). Von der Potenzialkurve des Wachstums einer Baumart unter gegebenen Klimaverhältnissen kann so auf die Potenzialkurve des Wachstums für ein Klimaszenarium geschlossen werden (siehe Abb. 2).

Die so erzeugten Veränderungen in den Wachstumsmustern der einzelnen Baumarten aufgrund von Klimaveränderungen werden anschließend als neue Potenzialkurven in das managementorientierte Waldwachstumsmodell SILVA implementiert. Auf diese Weise kann mit SILVA die Waldentwicklung für den Modellbetrieb Zittau für unterschiedliche Klimaszenarien simuliert werden.

#### Modellbeschreibung

Das ökophysiologische Wachstumsmodell BALANCE beschreibt die dreidimensionale Entwicklung einzelner Bäume bzw. eines Waldbestandes in Abhängigkeit von den äußeren Umweltfaktoren Witterung (z.B. Temperatur, Niederschlag, Strahlung), CO<sub>2</sub>, Bodenbedingungen sowie Schadstoffen und der individuellen Konkurrenz um Licht, Wasser und Stickstoff. Bei der Modellierung mit BALANCE werden zum einen die wesentlichen Flussgrößen des Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts betrachtet, zum anderen das Wachstum der Bäume, das von diesen Größen abhängt, und die Konsequenzen, die sich daraus für die Bestandesstruktur ergeben. Neben täglichen Witterungswerten und Bodenkenngrößen benötigt BALANCE als Initialgrößen Baumhöhe, Stammdurchmesser und Stammfuß-Koordinaten sowie optional Kronenansatzhöhe und Kronenradien. Die unterschiedlichen räumlichen Ebenen der Berechnung reichen vom Bestand über Einzelbäume und Baumkompartimente (Krone, Stamm, Wurzel) bis hin zu einzelnen Kronen- und Wurzelschichten, die wiederum in Segmente eingeteilt werden (GROTE und PRETZSCH 2002).

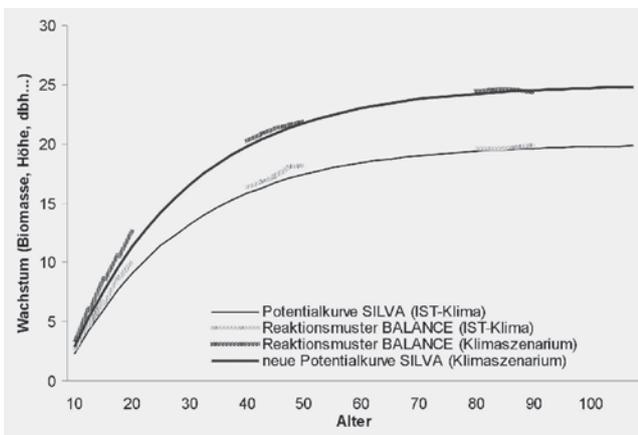


Abb. 2: Schematische Darstellung der Simulation des Reaktionsmusters und der Übertragung auf die Potenzialkurve des Wachstums einzelner Baumarten zur Simulation des Waldwachstums mit SILVA.

Fig. 2: Scheme of the growth pattern simulation and of the transfer to the potencial growth curve for the single tree species to simulate forest growth with the model SILVA.

Die Simulation des Wasserhaushaltes berücksichtigt die Bodenbedingungen in verschiedenen Schichten sowie die Beeinflussung der Interzeption und Perkolation durch die Schirmflächen- und Wurzelverteilung (GROTE et al. 2003). Die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit für einen Baum ist von dem von ihm durchwurzelten Volumen und den dortigen Bodeneigenschaften abhängig. Da das Durchwurzelungsvolumen von der Baumgröße und der Stellung zu den Konkurrenten beeinflusst wird, spiegelt sich auch hier der Einfluss der Bestandesstruktur und der Mischungsverhältnisse wider. Das Verhältnis zwischen tatsächlicher und potenzieller Verdunstung bestimmt den Grad des Wasserstresses bei der Photosynthese. Eine ausführliche Beschreibung des Modells BALANCE ist in GROTE und PRETZSCH (2002) bzw. in RÖTZER et al. (2005) sowie in RÖTZER et al. (2009) enthalten. Im Gegensatz zu BALANCE ist der Wachstumssimulator SILVA ein stochastisch basiertes Modell. Als typisches managementorientiertes Waldwachstumsmodell liefert SILVA Szenarien für forstplanerisch relevante Zeiträume, das sind mehrere Jahrzehnte bis hin zu einer Umtriebszeit. Die Rhythmik von Simulationsschritten bei SILVA beträgt fünf Jahre. Die Modellgleichungen von SILVA sind auf der Basis umfangreichen dendrometrischen Datenmaterials aus forstlichen Langzeitbeobachtungsflächen statistisch sehr gut abgesichert und gewährleisten hohe Genauigkeiten der dendrometrischen Informationen auch über längere Simulationszeiträume. Besonders wichtig ist, dass mit SILVA eine breite Palette von Durchforstungs- oder Endnutzungseingriffen realitätsnah nachgebildet werden kann. Außerdem verfügt SILVA über ein quasikausales Standort-Leistungsmodul, das die Simulation von unterschiedlichen Standortsszenarien erlaubt und auf den oben angesprochenen Potenzialkurven beruht. Unterschiedliche Datenschnittstellen erlauben die Anwendung von SILVA auf Bestandes-, Betriebs- und Landschaftsebene. Das Ausgabespektrum von SILVA beinhaltet klassische forstliche Parameter der Naturalproduktion, monetäre Kennwerte sowie Struktur- und Diversitätsindizes. Eine Übersicht zu Waldwachstumsmodellen, in denen auch BALANCE und SILVA detailliert beschrieben sind, ist in PRETZSCH et al. (2008) enthalten.

#### SILVA-Simulation auf Forstbetriebsebene

Um den Rechenaufwand bei den Wachstumssimulationen für den Betrieb Zittau in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wurden auf Basis der Beschreibungen der 1287 Einzelbestände 83 repräsentative Simulationsbestände im Wachstumsmodell SILVA generiert. Hauptklassifizierungsmerkmale waren der Bestandestyp und 10-jährige Altersklassen bei fichtendominierten Flächen bzw. 20-jährige Altersklassen bei allen anderen Flächen. Ein Bestandestyp definiert sich jeweils anhand einer Hauptbaumart sowie einer zweiten, mitdominanten Baumart, sofern es sich nicht um einen Reinbestand handelt. Die Zuordnung erfolgt jeweils auf Basis der Grundflächenanteile der Arten im Bestand. Sollte keine Haupt- und/oder Nebenbaumart ausgeschieden werden, wurden entsprechend den Mehrheitsverhältnissen Laubholz- oder Nadelholzmischung als Typ angegeben. Für jeden Simulationsbestand wurde, ausgehend vom Initialzu-

stand, eine Prognose für einen Zeitraum von 30 Jahren in jeweils sechs Fünfjahresschritten gerechnet. Weitergehende Ausführungen zur Stratifizierung von Forstbetriebsdaten für Modellrechnungen sind in MOSHAMMER (2006) enthalten.

Das im Wachstumsmodell SILVA integrierte Durchforstungsmodul wird periodisch alle fünf Jahre aktiviert und arbeitet regelbasiert. Das heißt, die Entnahme oder Förderung einzelner Stämme in der Simulation erfolgt nach festgelegten Regelmechanismen. Wie diese Mechanismen gestaltet sind, hängt vom durchzuführenden Durchforstungskonzept ab. Für alle in der forstlichen Praxis üblichen Durchforstungsarten wie Hoch-, Nieder-, Auslesedurchforstung oder Zielstärkennutzung sind jeweils bestimmte Auswahlprozeduren für Entnahmen in dem Programmmodul hinterlegt. Ziel der Einsteuerungen der virtuellen Durchforstung war es, die zukünftig im Forstbetrieb Zittau geplanten waldbaulichen Maßnahmen möglichst realitätsnah abzubilden. Dafür wurden verschiedene Durchforstungskonzepte entwickelt, die sich jeweils aus vier Durchforstungsphasen (Jungwuchs/Jung-/Altdurchforstung/Endnutzung) zusammensetzten. Für jede Phase wurden Durchforstungsart, Intensität und Beschränkungen, wie zum Beispiel das maximal zu entnehmende Volumen pro Eingriff, festgelegt. Welche Phase wann aktiviert wird, hängt von der Oberhöhe der Modellbestände im Laufe der Simulation ab. Entsprechend der Generierung der virtuellen Repräsentativbestände wurden verschiedene Konzepte passend zu den verschiedenen Bestandestypen entwickelt. Im Grundsatz entsprechen die simulierten Durchforstungskonzepte den Vorgaben zur Bestandespflege der sächsischen Landesanstalt (LAF 2002). Von jedem Konzept wurden insgesamt drei Varianten entwickelt. Neben der Normalvariante, die das geplante Vorgehen ausgehend von den Planungen für die nächsten zehn Jahre wiedergibt, wurden eine Extensiv- und eine Intensivvariante abgeleitet. Das waldbauliche Vorgehen in diesen Varianten entspricht prinzipiell dem der Normalvariante, lediglich die Nutzungsintensitäten wurden um etwa 30% reduziert bzw. erhöht. Damit wurden waldbauliche Varianten simuliert, die deutlich von der aktuellen Planung abweichen, aber durchaus noch als in der Praxis realisierbar angesehen werden können. Die extensive und intensive Nutzungsvariante markieren somit die Randbereiche eines theoretischen Handlungskorridors, innerhalb dessen sich der Forstbetrieb mittelfristig bewegen kann.

## 4. Ergebnisse

### Wachstumsmuster in Abhängigkeit des Klimas

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Witterungsverhältnisse des gegebenen Klimas und der Klimaszenarien A2t und B1t auf das Wachstum von Kiefern- und Fichtenbeständen in der Region Zittau ist in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Aus beiden Abbildungen ist klar ersichtlich, dass unter den Bedingungen der Klimaszenarien A2t und B1t sowohl beim Fichten- als auch beim Kiefernbestand Veränderungen bei der Bestandesbiomasse vorhanden sind. Während sich unter Ist-Bedingungen über 20 Jahre eine deutliche Zunahme an Bestandesbiomasse bei der Fichte abzeichnet, nimmt die Biomasse unter beiden Klimaszenarien deutlich

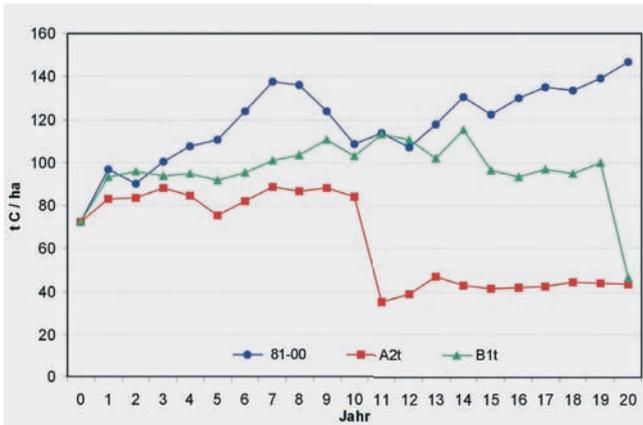


Abb. 3: Verlauf der lebenden Biomasse eines 55-jährigen Fichtenbestandes in der Region Zittau für den Zeitraum 1981–2000 sowie für die Klimaszenarien A2t und B1t über die Jahre 2081–2100.

Fig. 3: Course of the living biomass of a 55-year old spruce stand in the region Zittau for the period 1981–2000 and for the period 2081–2100 of the climate scenarios A2t and B1t.

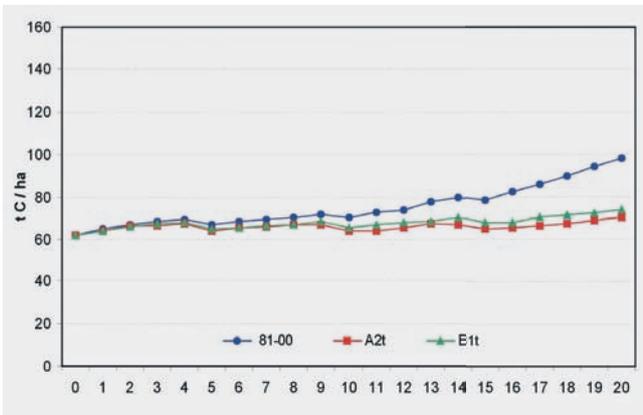


Abb. 4: Verlauf der lebenden Biomasse eines 55-jährigen Kiefernbestandes in der Region Zittau für den Zeitraum 1981–2000 sowie für die Klimaszenarien A2t und B1t über die Jahre 2081–2100.

Fig. 4: Course of the living biomass of a 55-year old pine stand in the region Zittau for the period 1981–2000 and for the period 2081–2100 of the climate scenarios A2t and B1t.

ab. Vor allem in einzelnen, extremen Jahren – wie beispielsweise im Jahr 11 unter dem Szenarium A2t oder im Jahr 20 unter dem Szenarium bei B1t – erkennt man einen markanten Rückgang der Bestandesbiomasse, vor allem aufgrund des Absterbens einzelner Bäume. Der Biomasseverlauf des Kiefernbestandes zeigt unter den Ist-Bedingungen der Jahre 1981 bis 2000 eine stetige Zunahme. Unter den veränderten Klimaverhältnissen der Szenarien A2t und B1t ist dagegen ein Gleichgewichtszustand bzw. eine nur leichte Zunahme der lebenden Biomasse zu erkennen, wobei die Unterschiede zwischen den zwei Szenarien gering ausfallen. Die hier am Beispiel von Kiefer und Fichte für die Region Zittau gezeigten Wachstumsveränderungen aufgrund von veränderten Klimaverhältnissen können entsprechend der oben dargestellten Vorgehensweise verwendet werden, um die Wachstumskurven im Modell SILVA an Klimaszenarien anzupassen. Damit ist eine Simulation des Waldwachstums verschiedener Bestände unter unterschiedlichen Behandlungen auf der Basis von veränderten Klimaverhältnissen möglich.

Wachstumssimulationen für den Betrieb Zittau

Im Folgenden werden zuerst die Entwicklungen der betrieblichen Kennwerte Nutzungen, Vorräte und Zuwächse unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen betrachtet, daran anschließend die Veränderungen, welche sich bei der Simulation mit den Klimawerten des Szenariums B1t ergaben. Das Szenario B1t bietet hierbei die Möglichkeit, Auswirkungen der Klimaänderungen auf den Forstbetrieb aufzuzeigen, wie sie bereits in den nächsten 20 bis 30 Jahren spürbar werden können. Die betrachteten Ausgabegrößen stellen nur einen ersten Schritt möglicher betriebsrelevanter Analysen dar. Welch hohes Informationspotenzial Simulationen mit Einzelbaummodellen im Rahmen der Betriebsplanung beinhalten, zeigen z. B. BÜCKING et al. (2007).

Obwohl – im Gegensatz zu den realen 1 287 Einzelbeständen – für die Simulationen der Kommunalwald Zittau aus nur 83 virtuellen Repräsentativbeständen aufgebaut wurde, sind die Kennwerte des realen und des Modellbetriebes annähernd repräsentativ. Bei den Anteilen der Baumartengruppen ergeben sich keine Abweichungen und der mittlere Vorrat der Modellbestände liegt mit 232 Efm/ha lediglich 2% über dem im Betriebswerk aufgeführten Wert von 228 Efm/ha. Die nach der ersten Simulationsperiode ermittelten laufenden Zuwächse liegen mit 8,4 Efm/ha und Jahr ebenfalls im Erwartungsrahmen der Forsteinrichtung. Die Nutzungsvorgaben der Normalvariante führten in den ersten zehn Jahren der Simulation zu einem Hiebsatz von 9 500 Efm/Jahr, was lediglich 1% unter der von der Forstplanung veranschlagten Nutzungsmenge für diesen Zeitraum liegt. Die Intensivvariante erbrachte mit 12 400 Efm/Jahr (6,4 Efm/ha und Jahr) um 29% höhere, die Extensivvariante mit 6 600 Efm/Jahr (3,4 Efm/ha und Jahr) um 31% niedrigere Nutzungsmengen als die Normalvariante. Auf Grund der richtlinienkonformen Vorgaben zur Behandlung der Bestände fie-

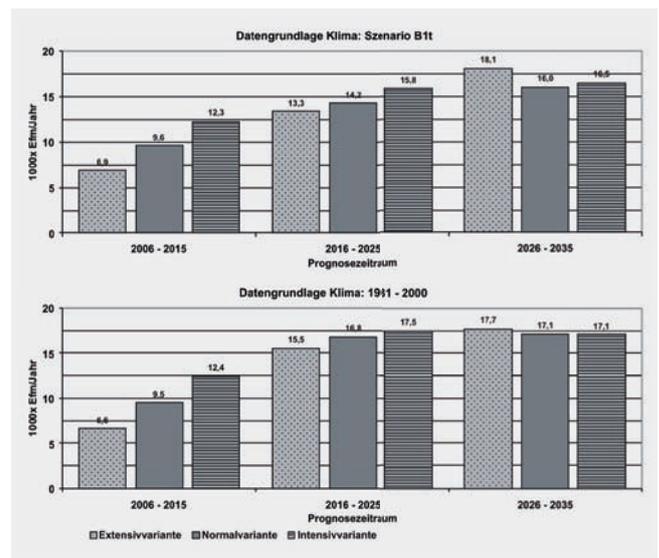


Abb. 5: Jährliche Nutzungsmengen in den einzelnen Jahrzehnten für die drei Nutzungsvarianten aus der SILVA-Simulation unter den gegenwärtigen Klimabedingungen (unten) und dem Klimaszenarium B1t (oben).

Fig. 5: Annual amount of cut over decades for three different exploitation intensities based on SILVA-simulations for the present climate (bottom) and climate scenario B1t (top).

len mit fortlaufender Simulationsdauer große Teile der Betriebsflächen in die Endnutzungsphase, was bei allen drei Nutzungsvarianten zu deutlich höheren Hiebsätzen für die zweite und dritte Dekade der Betriebsprognose führte (siehe Abb. 5 unten). Auffallend ist, dass sich für den Prognosezeitraum von 2026 bis 2035 im Mittel für alle drei Varianten annähernd gleiche jährliche Einschlagsmengen ergeben. Die Entwicklung der Vorräte in Abbildung 6 zeigt für alle drei Behandlungsvarianten den von der Betriebsleitung angestrebten Vorratsaufbau, dem jedoch im weiteren Verlauf immer wieder eine Verringerung des aufzustockenden Holzvolumens folgt. Dabei unterscheiden sich die drei Varianten klar im Niveau der Vorratsentwicklungen sowie in den Perioden, in denen jeweils der Kulminationspunkt erreicht wurde. Eine detaillierte Auswertung ergab, dass bei allen drei Nutzungsvarianten das waldbauliche Planungsziel, die kontinuierliche Erhöhung der Laubholzanteile im Betrieb über alle Perioden hinweg erreicht wird. Die Mehrnutzungen, insbesondere bei der Intensivvariante sowie bei der Extensiv- und Normalvariante im zweiten und dritten Jahrzehnt der Prognosen, wurden vor allem im Bereich der Endnutzungen fichtendominierter Bestände realisiert.

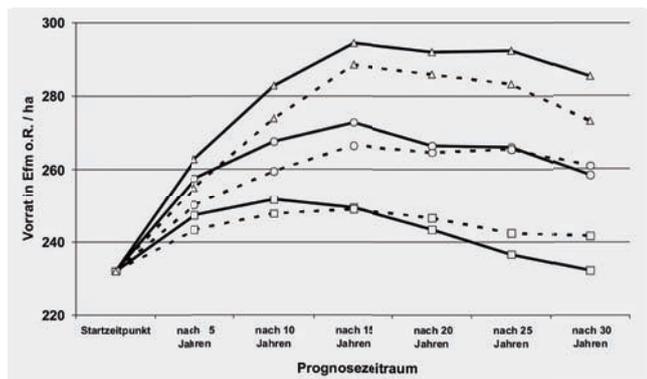


Abb. 6: Entwicklung der mittleren Vorräte im Forstbetrieb Zittau über 30 Jahre aus SILVA-Simulationen unter den gegenwärtigen Klimaverhältnissen und dem Klimaszenario B1t (gestrichelt) jeweils für die drei Nutzungsvarianten Normal (Kreis), Extensiv (Dreieck) und Intensiv (Quadrat).

Fig. 6: Mean stock development for the forest enterprise Zittau over 30 years based on SILVA-simulations for the present climate and climate scenario B1t (dashed), for the three exploitation intensities normal (circles), extensive (triangles) and intensive (rectangles), separately.

Die spezifische Kombination von Bestandestypen, Alterklassen und Standortverhältnissen im Forstbetrieb Zittau führt dazu, dass die Nutzungsintensitäten einen direkten Einfluss auf die Höhe der laufenden Zuwächse haben (siehe Abb. 7). Die Extensivvariante dürfte hierbei das oberste Zuwachsniveau repräsentieren, da sich hier bereits vor dem Beginn des Vorratsabbaus ein absteigender Trend der Entwicklung der laufenden Zuwächse zeigt. Insgesamt kann man die abwärts gerichtete Zuwachsreaktion als eher mäßig bezeichnen, woraus sich für den Betrieb ein relativ großer Handlungsspielraum ergibt, ohne massive Zuwachseinbußen befürchten zu müssen. Die Simulation und Prognose der Entwicklungstendenzen der Zittauer Waldflächen unter Annahme des Klimaszenarios B1t basieren auf den identischen Startbeständen, wie zuvor die Prognosen bei den mittleren klimatischen Bedingungen von 1981 bis 2000. Lediglich die wald-

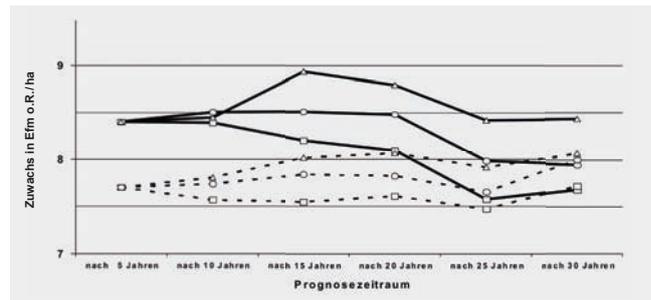


Abb. 7: Entwicklung der lfd. Zuwächse im Forstbetrieb Zittau über 30 Jahre aus SILVA-Simulationen unter den gegebenen Klimaverhältnissen und dem Klimaszenario B1t (gestrichelt) jeweils für die drei Nutzungsvarianten Normal (Kreis), Extensiv (Dreieck) und Intensiv (Quadrat).

Fig. 7: Current annual increment development for the forest enterprise Zittau over 30 years based on SILVA-simulations for the present climate and climate scenario B1t (dashed), for the three exploitation intensities normal (circles), extensive (triangles) and intensive (rectangles), separately.

wachstumkundlichen Rahmenwerte im Standort-Leistungsmodul von SILVA wurden entsprechend den Erkenntnissen aus den Rechnungen mit BALANCE neu angepasst. Durch Anpassung der Eingriffsvorgaben im Durchforstungsmodul des Wuchsmodells SILVA konnten die Entnahmemengen bei der Betriebssimulation unter Annahme des Klimaszenarios B1t auf einem vergleichbaren Niveau wie bei der Prognose unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen gehalten werden (siehe Abb. 5 oben). Die Nutzungssteigerungen in der zweiten und dritten Dekade der B1t-Prognose fielen insgesamt jedoch etwas schwächer aus. Veränderungen im Prognoseverlauf in Abhängigkeit der neuen Klimadaten ergaben sich somit in erster Linie bei der Entwicklung der Holzvorräte und der laufenden Zuwächse.

Auf Grund der veränderten Wuchsbedingungen ergab sich unter dem B1t-Szenario für den Gesamtbetrieb zum Startzeitpunkt der Prognose nur noch ein mittlerer Zuwachs von 7,7 Efm/ha und Jahr, was eine Reduktion von 9% gegenüber dem aktuellen Zuwachs bedeutet. Umgerechnet auf die gesamte Betriebsfläche wachsen somit jedes Jahr 1.400 Efm weniger zu. Die Zuwachskurven verlaufen dementsprechend auf niedrigerem Niveau mit ähnlichen Tendenzen bei den drei Nutzungsvarianten (siehe Abb. 7). Die Unterschiede zwischen den Varianten fallen hier allerdings geringer aus.

Gleiche Nutzungsintensitäten bei geringeren Zuwächsen führten erwartungsgemäß dazu, dass die Vorratsentwicklungen ebenfalls auf niedrigerem Niveau stattfanden. Dass die Kurven der B1t-Szenarien nach zehn Jahren fast parallel zu den Trendlinien der 1981–2000-Szenarien verlaufen (siehe Abb. 6), und nicht weiter scherenartig auseinandergehen, liegt an den Regelwerken der Durchforstungsvorgaben. Weniger Zuwachs führt zu geringeren Dichten und verminderter Konkurrenz und damit zu geringeren Entnahmemengen, vor allem im Bereich der Vornutzungsbestände.

## 5. Diskussion

Erst durch die Verknüpfung des physiologisch basierten Prozessmodells BALANCE mit dem managementorientierten Modell SILVA ist es möglich, die Auswirkungen von verän-

veränderten Umweltbedingungen wie z. B. Klimaveränderungen auf das Waldwachstum unter Einbeziehung von unterschiedlichen Waldbaustrategien zu untersuchen. Durch die Kopplung der beiden Modelle wird eine Brücke vom Einzelbaum bis hin zur Betriebs- und Waldlandschaftsebene geschlagen. Zudem eröffnet sich die Möglichkeit, unterschiedliche Anpassungsstrategien an veränderte Umwelt- und Klimabedingungen näher zu untersuchen (RÖTZER 2008).

Die Simulationen mit dem Wachstumsmodell SILVA auf Betriebs-ebene machen die weit reichenden Konsequenzen der aktuellen waldbaulichen Planungen offensichtlich. Damit hat der Betrieb die Möglichkeit, Entwicklungstendenzen bis zu einem weit entfernt liegenden Zeithorizont abschätzen und gegebenenfalls frühzeitig unerwünschten Entwicklungen entgegenzuwirken. Die drei unterschiedlichen Nutzungsvarianten spannen dabei, ausgehend von der Normalvariante, einen Handlungskorridor auf, in dem sich der Betrieb voraussichtlich bewegen wird. Welche Konsequenzen sich ergeben, wenn Planung oder später tatsächliches Handeln von der Normalvariante abweichen, lassen sich mit Szenarienanalysen gut nachvollziehen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen muss immer bedacht werden, dass es sich um Entwicklungstendenzen und Tendaussagen handelt. Zudem handelt es sich um eine Modellbetrachtung unter *ceteris-paribus*-Bedingungen, d. h. ohne Berücksichtigung von Risikofaktoren. Insbesondere die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wind-, Schnee- oder Insektenkalamitäten muss mit ins Kalkül gezogen werden.

Die zusätzliche Darstellung der Entwicklungen der Waldflächen unter geänderten klimatischen Verhältnissen helfen dem Forstbetrieb, auch die zukünftigen waldbaulichen Rahmenbedingungen einzuschätzen. Für die Forstbetriebsprognosen wurde dabei bewusst das Klimaszenarium B1t zugrunde gelegt, obwohl aktuell das Szenarium A2t als das wahrscheinlichere angesehen wird. Die geringeren klimatischen Änderungen im B1t-Szenarium, welche in den Modellrechnungen immer von Beginn an wirksam sind, erlauben eine Interpretation der Ergebnisse unter der Annahme, dass Wachstumsänderungen dieses Umfangs tatsächlich in den nächsten Jahrzehnten für den Forstbetrieb spürbar und somit auch schon planungsrelevant werden.

Insgesamt deuten die Auswertungen der Betriebssimulationen unter den geänderten Klimabedingungen auf eine Abnahme des Reaktionsvermögens der Waldbestände auf Bewirtschaftungsmaßnahmen hin, was gleichbedeutend mit einem Verlust an Steuerungsmöglichkeiten für den Waldplaner ist. Dies zeigt sich an dem schmäleren Handlungskorridor (Abb. 6), der durch die intensive und extensive Nutzungsvariante aufgespannt wird. Aus einer geringeren Elastizität der Zuwachsreaktionen (Abb. 7) folgt, dass zum Beispiel Verjüngungsgänge weniger beeinflussbar sind. Rechnet man noch das prognostizierte häufigere Auftreten von Schadergebnissen (HÖPPE 2008) hinzu, besteht die Gefahr, dass der Betrieb zukünftig waldbaulich nur noch reagieren und nicht mehr steuern kann, was letztendlich auch immer zu wirtschaftlichen Einbußen führen wird (STANG 2008; KNOKE 2008). Der immerhin 27%ige Laubholzanteil im Zittauer Wald dürfte hierbei eine gewisse Pufferfunktion mit Blick auf die Zu-

wachseinbußen ausüben. In Waldflächen mit deutlich geringeren Laubholzanteilen würden die Auswirkungen der Klimaänderungen noch mehr zum Tragen kommen (RÖTZER und MOSHAMMER 2008).

## 6. Danksagung

Für die Datenbereitstellung bedanken sich die Autoren bei allen Mitarbeitern des ENFORCHANGE-Projekts, insbesondere bei Prof. Dr. C. Bernhofer, Dr. V. Goldberg und B. Fischer (Professur für Meteorologie, TU Dresden). Das Modell BALANCE wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“ entwickelt. Das Teilprojekt wurde im Rahmen von ENFORCHANGE (FKZ 03306434L) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert.

## Literatur

- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V., SURKE, M., FISCHER, B. (2007): Regionalisierung von Klimaelementen in den Modellregionen Dübener Heide und Oberlausitz im Projekt ENFORCHANGE. Statusbericht ENFORCHANGE, Dresden: 50–62.
- BÜCKING, M., MOSHAMMER, R., ROEDER, A. (2007): Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm gewachsener Z-Bäume. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 62/07, 295 S.
- ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W. (2005): Results of five regional climate studies applying a weather pattern based down-scaling method to ECHAM4 climate simulations. *Meteorologische Zeitschrift* 14: 247–257.
- GROTE, R., PRETZSCH, H. (2002): A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology* 4: 167–180.
- GROTE, R., PATZNER K., SEIFERT T. (2003): Modelling Water Availability in Individual Trees – a Contribution of Process-Based Simulation to the Prediction of Development in Heterogeneous stands. *Umweltinformatik aktuell* 31: 804–812.
- IPCC (2007): BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., S. WU AND J.P. PALUTIKOF, EDS. (2008): *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 S.
- HÖPPE, P. (2008): Links between Global Warming and Significant Trends of Increasing Weather related Catastrophes. *Proceedings of the 18. International Conference of Biometeorology*, Tokyo, Japan.
- KAHN, M. (1994): Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Forstliche Forschungsberichte München Nr. 141, 204 S.

- KAHN, M., PRETZSCH, H. (1997): Das Wachstumsmodell SILVA 2.1- Parametrisierung für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. AFJZ 168 – 6/7: 115–123.
- KNOKE, TH. (2008): Herausforderungen für die Forstbetriebsplanung. AFZ 63 (17): S.900–901.
- LAF SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (2002): Richtlinie zur Bestandespflege und Wertästung im Staatswald des Freistaates Sachsen, 40 S.
- MOSHAMMER, R. (2006): Vom Inventurpunkt zum Forstbetrieb. AFZ 61 (21): 1164–1165.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKY, J. (2002): The single tree based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. Forest. Ecol. and Manage. 162: 3–21.
- PRETZSCH, H., GROTE, R., REINEKING, B., RÖTZER, T., SEIFERT, S. (2008): Models for Forest Ecosystem Management – A European Perspective. Annals of Botany 101: 1065–1087.
- RÖTZER, T., GROTE, R., PRETZSCH, H. (2005): Effects of environmental changes on the vitality of forest stands. European Journal of Forest Research 124, S. 349–362.
- RÖTZER, T., SEIFERT, T., PRETZSCH H. (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
- RÖTZER, T., MOSHAMMER, R. (2008): Waldentwicklungsszenarien für die Dübener Heide. FuH 10 (63): 18–22.
- RÖTZER, T. (2008): Effects of droughts on the carbon dynamics of forest stands in Central Europe. Proceedings of the 18<sup>th</sup> International congress of Biometeorology, Tokyo, Japan.
- STANG, S. (2008): Optimierung der Forstbetriebsplanung zur Bewertung von Nutzungseinschränkungen. AFZ 63 (17): S.905–907.

#### Autorenanschriften

Ralf Moshhammer, Thomas Rötzer, Hans Pretzsch  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde  
Am Hochanger 13, D-85354 Freising  
Ralf.Moshhammer@lrz.tu-muenchen.de