

**Manfred J. Lexer - Rupert Seidl**

## **Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung**

### **1. Einleitung**

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der UNO sieht es im kürzlich veröffentlichten neuen Klimabericht als hoch wahrscheinlich an, dass sich das Klima in den kommenden Jahrzehnten bedingt durch das vom Menschen verursachte Ansteigen der Treibhausgase in der Atmosphäre verändern wird. Die wahrscheinliche zukünftige Klimaentwicklung für Österreich geht dabei von einem deutlichen Temperaturanstieg zwischen 2°C und 5°C im 21. Jahrhundert aus, wobei zusätzlich mit einer Änderung der Niederschlagsverhältnisse (Verteilung innerhalb eines Jahres, Extremereignisse, Jahresniederschlagssumme) gerechnet werden muss (e.g., IPCC 2007).

Waldökosysteme sind von derartigen klimatischen Veränderungen besonders betroffen. Ein Hauptgrund dafür ist die Geschwindigkeit mit welcher die prognostizierte Klimaänderung voranschreiten könnte: Aufgrund der Langlebigkeit von Wäldern machen drastische Umweltveränderungen in nur wenigen Jahrzehnten eine natürliche Anpassung über genetische Prozesse oder natürliche Migration von Baumarten de facto unmöglich. Bildlich ausgedrückt wird ein Keimling von heute im Baumholzstadium deutlich geänderte Umweltbedingungen vorfinden. In diesem Zusammenhang muss bedacht werden, dass eine Klimaänderung nicht nur pflanzenphysiologische Prozesse wie Photosynthese oder Respiration von Baumarten und damit deren relative Konkurrenzkraft beeinflusst sondern sehr wahrscheinlich auch deutliche Auswirkungen auf das Störungsregime im Wald haben wird. Störungen wie Windwürfe oder Borkenkäferschäden – schon heute einflussreiche Faktoren in der Waldbewirtschaftung – sind meist direkt oder indirekt vom Klimageschehen abhängig und somit unmittelbar von einer Klimaänderung betroffen.

Aus der Sicht der Waldbewirtschaftung sind primär zwei Aspekte im Zusammenhang mit einer Klimaänderung relevant:

- (1) die Abschätzung wo, wann und in welcher Intensität Auswirkungen einer Klimaveränderung auftreten könnten, insbesondere unter der Annahme, dass die heute angewendeten Bewirtschaftungskonzepte beibehalten werden, und

- (2) die Erarbeitung adaptiver Bewirtschaftungskonzepte, die negative Auswirkungen einer Klimaänderung möglichst verringern und mögliche positive Konsequenzen nutzen. Wegen der in der Waldbewirtschaftung notwendigen langen Vorlaufzeiten bis zum Wirksamwerden von Maßnahmen ist es von besonderer Bedeutung, zu beurteilen, ab wann Klimaänderungsfolgen adaptive Bewirtschaftungsmaßnahmen erfordern, um die nachhaltige Bereitstellung von Waldleistungen bestmöglich sicherstellen zu können.

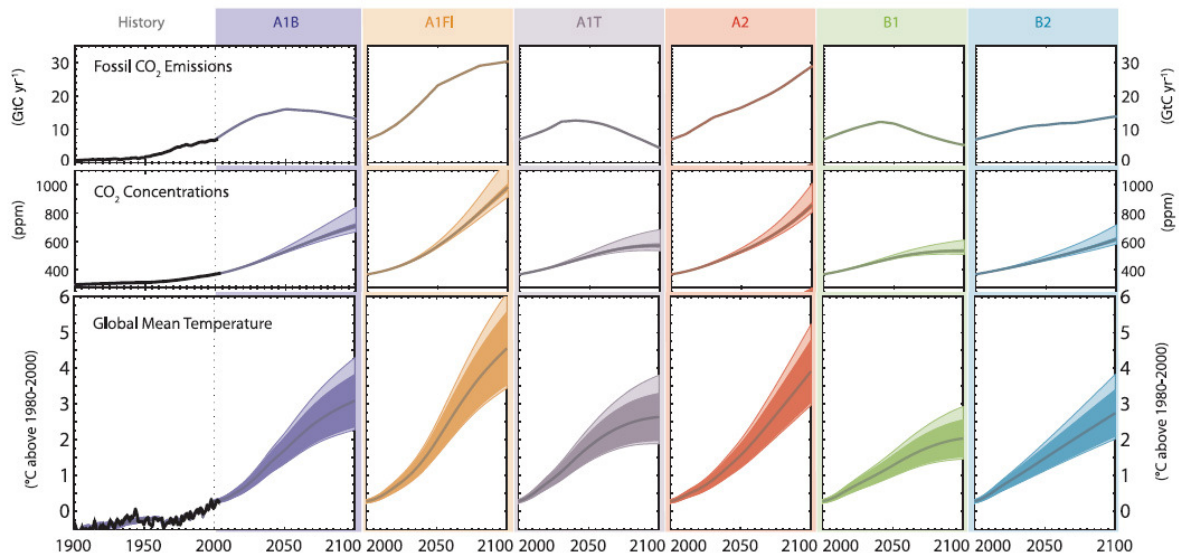
Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wald neben Klimastress in vielen Fällen zusätzlichen anderen Stressoren ausgesetzt ist (z.B. Wildverbiss, Immissionen, Folgen von Landnutzungspraktiken in der Vergangenheit), die die Anfälligkeit von Waldökosystemen gegenüber klimatischen Veränderungen weiter erhöhen. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Beitrag zuerst mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf Waldökosysteme in Österreich dargestellt und darauf aufbauend mögliche Implikationen für eine nachhaltige multifunktionale Waldbewirtschaftung anhand eines Beispielforstbetriebes diskutiert.

## **2. Konzeptionelle Überlegungen für die Klimafolgenforschung in der Waldbewirtschaftung**

Bevor diesen Fragestellungen nachgegangen wird, sollen kurz einige methodische Aspekte Erwähnung finden. Während die klimaverändernde Wirkung anthropogener Aktivitäten mittlerweile de facto außer Zweifel steht (IPCC 2007), ist das Ausmaß und die Geschwindigkeit der zukünftigen Klimaentwicklung nicht mit Sicherheit vorhersagbar. Gründe sind u.a. die nicht vorhersehbare Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen und unvollständiges Verständnis wesentlicher Klimaprozesse (siehe Abbildung 1). Zusätzlich ist die kleinräumige hochaufgelöste Simulation von zukünftigem Klimageschehen derzeit noch nicht zufriedenstellend möglich. Die überregionale bis kontinentale Auflösung verfügbarer globaler Klimamodelle (GCM; global circulation model), die in sehr grober Auflösung (mehrere 1000 km<sup>2</sup>) die Klimakonsequenzen globaler Emissionsszenarien simulieren, ist für spezifisch standörtliche Analysen der zukünftigen Klimaentwicklung nicht ausreichend. Die „Übersetzung“ globaler Klimatrends auf lokale bis regionale Auflösung durch regionale Klimamodelle steckt derzeit „in den Kinderschuhen“.

Wenngleich auch derzeit für gebirgige Landschaften keine befriedigenden regionalen Szenariosimulationen der zukünftigen Klimaentwicklung verfügbar sind, kann die

wahrscheinliche Bandbreite der möglichen zukünftigen Klimaentwicklung in Form von Szenarioanalysen in der Klimafolgenforschung studiert werden.



**Abbildung 1:** Wie aus einem Emissions-Szenario ein Klimaszenario wird: Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen (oben), atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration (mitte) und projizierte globale Temperaturänderung (unten) für sechs illustrative IPCC Szenarien. Die Szenarien (A1B bis B2) unterstellen unterschiedliche technologische und gesellschaftliche Entwicklungen (z.B. im Hinblick auf Bevölkerungswachstum, ökonomischer Entwicklung etc.), aus welchen unterschiedliche Treibhausgasemissionen abgeleitet werden. Die Fächer geben die Unsicherheiten in der Abschätzung der jeweiligen Auswirkungen dieser Emissionsszenarios z.B. auf die globale Mitteltemperatur in unterschiedlichen Klimamodellen wieder. Historische Beobachtungen sind als schwarze Linien dargestellt (Quelle: IPCC 2007).

Um die Auswirkungen derartiger Klimaänderungsszenarien auf Waldökosysteme abzuschätzen, haben sich dynamische Waldökosystemmodelle als dem Stand des Wissens entsprechende Methode etabliert. Derartige Modelle bilden wesentliche Ökosystemprozesse ab und sind daher gut geeignet, Auswirkungen geänderter Rahmenbedingungen (z.B. Temperatur, Niederschlag) auf interagierende Ökosystemabläufe (z.B. Baumwachstum, Verjüngung, Mortalität) dynamisch über mehrere Jahrzehnte darzustellen. Solche Modelle bieten die Möglichkeit, die Konsequenzen unterschiedlicher Klimaänderungsszenarios zu analysieren (Was wäre, wenn ...) und die Bandbreite zukünftiger Entwicklungen darzustellen.

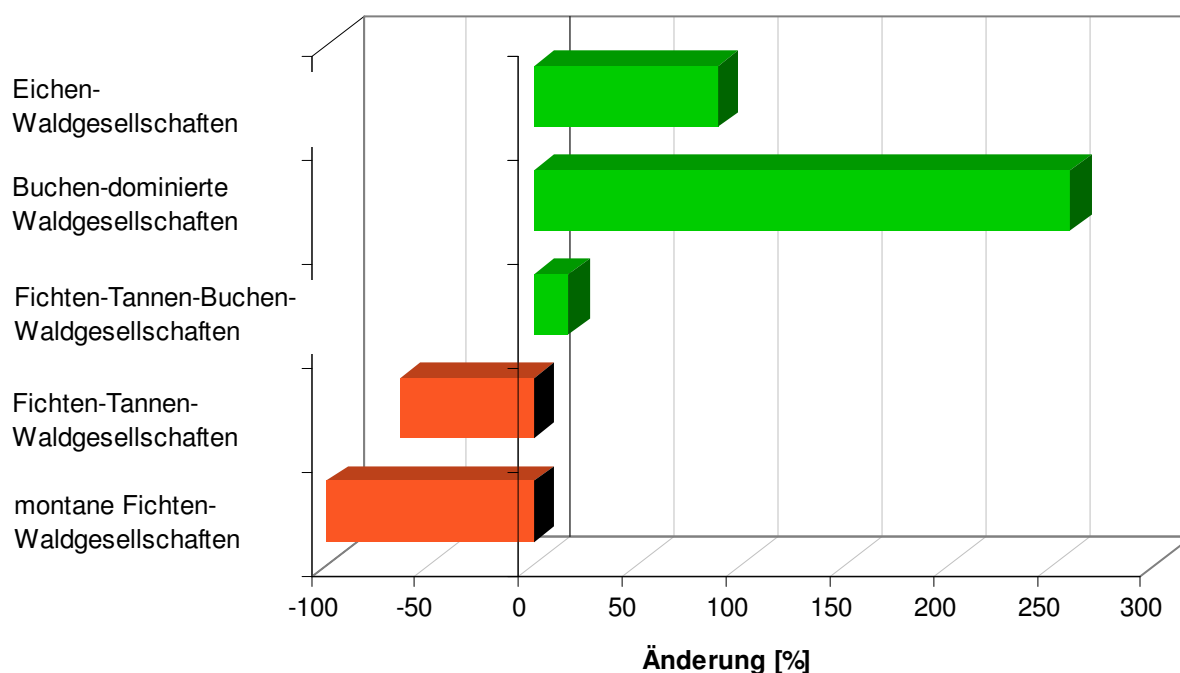
Die im folgenden präsentierten Ergebnisse basieren auf dem in mehreren Forschungsprojekten verwendeten Waldentwicklungsmodell PICUS (Lexer und Hönninger 2001, Seidl et al. 2005), welches für die Entscheidungsunterstützung in der Waldbewirtschaftung unter geänderten Klimabedingungen am Institut für Waldbau, BOKU entwickelt und getestet wurde. PICUS eignet sich sowohl zur Simulation von

unbewirtschafteten Naturwäldern als auch von bewirtschafteten gleichaltrigen und ungleichaltrigen Rein- und Mischbeständen. PICUS ist modular aufgebaut und verfügt u.a. über ein Modul zur Abschätzung von Schäden durch Borkenkäfer (*Ips typographus*), das in Kooperation mit dem Institut für Forstschutz an der BOKU adaptiert wurde (Seidl et al. 2007b). Detailinformation zu PICUS sind auf der Website des Instituts für Waldbau, BOKU verfügbar ([www.wabo.boku.ac.at/picus.html](http://www.wabo.boku.ac.at/picus.html)).

### **3. Die potentiell natürlichen Waldgesellschaften von Morgen als Indikator für Klimaänderungsfolgen**

Änderungen in den klimatischen Umweltbedingungen können die Standortseigenschaften und damit die Vegetationsdynamik stark beeinflussen. So könnte es z.B. zu einer Verschiebung der Konkurrenzverhältnisse der Baumarten kommen: Während manche Baumarten durch das Überschreiten von ökophysiologischen Grenzen auf bestimmten Standorten nicht mehr konkurrenzfähig sein werden, könnten aber auch frühere Einschränkungen (z.B. durch Kälte) durch den Klimawandel reduziert bzw. aufgehoben werden. Die potentiell natürliche Waldgesellschaft (PNWG; diejenige Vegetationszusammensetzung, die sich auf einem Standort ohne direkte menschliche Beeinflussung einstellen würde) wird häufig als integrierender Weiser für das Standortpotential verwendet. Eine Klimaveränderung kann nun sehr anschaulich über die Veränderung der PNWG dargestellt werden.

Eine derartige Abschätzung von ökologischen Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung auf Österreichs Wald wurde mit dem Simulationsmodell PICUS flächendeckend für Österreich auf Basis des Stichprobennetzes der Österreichischen Waldinventur durchgeführt (siehe Lexer 2001, Lexer et al. 2001, 2002). Dabei zeigte sich, dass schon eine Temperaturerhöhung von ca. 2°C bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge um 15% zu einer Veränderung der natürlichen Waldgesellschaft auf 77.8% der simulierten Waldinventurpunkte zur Folge hatte. Dies zeigt, dass schon eine als relativ gering eingestufte, und oftmals als Minimalziel der Klimaschutzpolitik definierte Erhöhung der Temperatur zu drastischen Auswirkungen auf die Ökosystemdynamik führen kann. Die Simulationsstudie von Lexer et al. (2001) zeigt ein deutliches Ansteigen des Anteils an Buchenwaldtypen von 14% unter heutigem Klima auf knapp 50% aller simulierten Waldinventurpunkten unter dem untersuchten Klimaänderungsszenario. Auch Eichenwälder gewinnen unter Klimaänderung relativ zu anderen Waldgesellschaften an Konkurrenzfähigkeit (Flächenveränderung +5%), während die montanen, Fichten-dominierten Waldgesellschaften an Konkurrenzfähigkeit verlieren (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Relative Veränderung wichtiger potentiell natürlicher Waldtypen unter einem Klimaänderungsszenario (+2°C, -15% Sommerniederschlag). Quelle: Lexer (2001).

Für die Waldbewirtschaftung kann daraus allgemein gefolgert werden, dass viele heutige Fichtendickungen und –stangenhölzer bis in mittlere Lagen auf Eichenmischwaldstandorten und trockenen Buchenstandorten stocken werden. In Ananalogschluss zu heutigen Bedingungen an solchen Standorten bedeutet dies zunehmende Störungsanfälligkeit (z.B. durch erhöhten Stress durch Trockenperioden, biotische Schädlinge wie Borkenkäfer). In höheren Lagen kommt es zu einer Vergrößerung des waldbaulichen Entscheidungsspielraumes sowohl in Fragen der Baumartenwahl als auch im Hinblick auf geeignete Naturverjüngungsverfahren. Generell kann davon ausgegangen werden, dass die Ansprüche an die waldbauliche Entscheidungsfindung durch die Klimaänderung steigen werden.

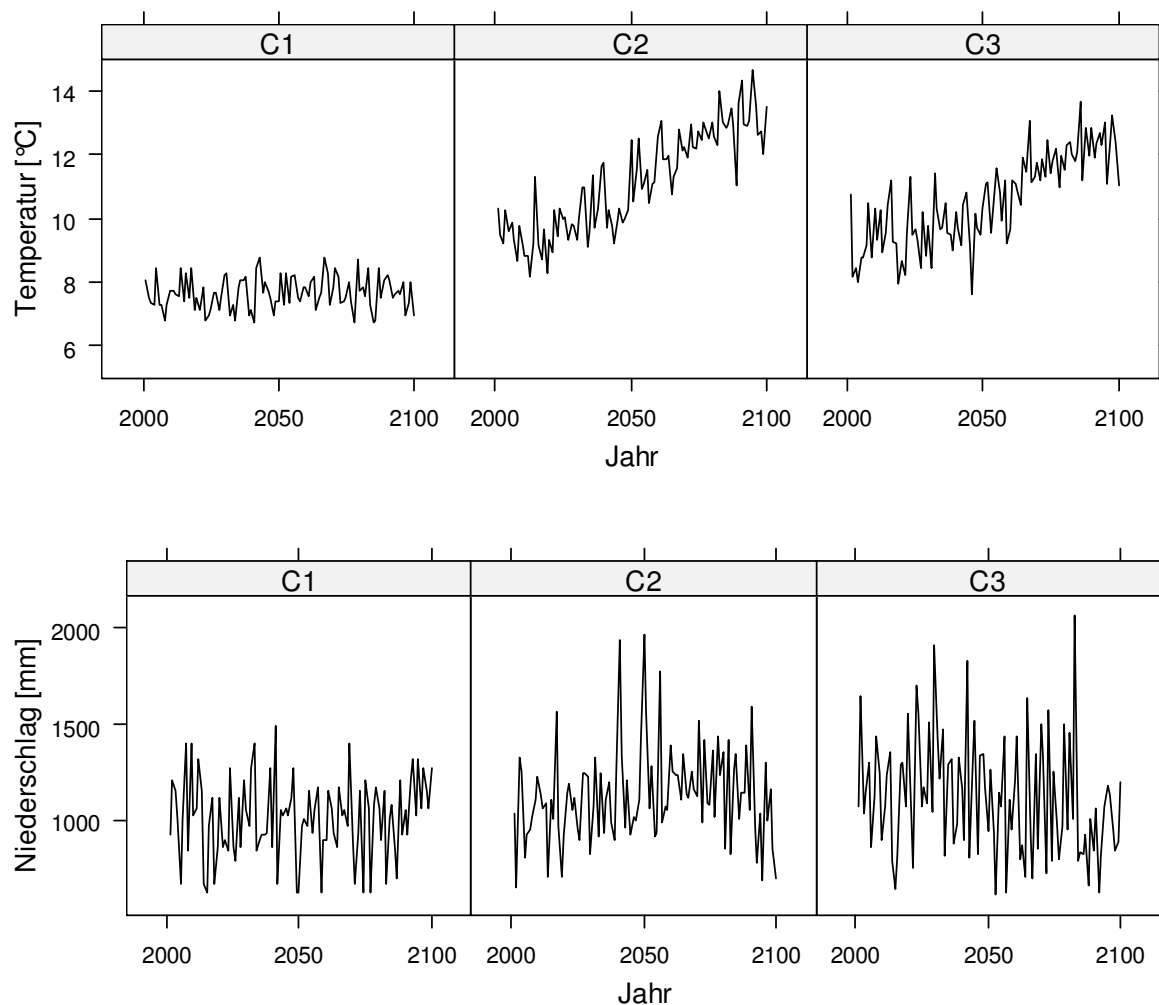
Wie nun eine Klimaänderung in der langfristigen waldbaulichen Planung berücksichtigt werden kann, soll nun anhand eines konkreten Beispielbetriebes verdeutlicht werden.

## 4. Waldbewirtschaftung im Klimawandel. Was tun?

### 4.1 Untersuchungsansatz

Hier wird nun aus der Sicht des Waldbewirtschafters am Beispiel eines Beispielforstbetriebes gezeigt, wie unterschiedliche Waldbau-Strategien unter Klimaänderungsbedingungen abschneiden. Dazu wurde ein den weiter oben angeführten „Hotspots“ (Fichte in der submontanen Höhenstufe) zuzuordnender realer Forstbetrieb als Untersuchungsobjekt ausgewählt, für welchen in einer Simulationsstudie drei alternative Waldbau-Konzepte unter aktuellem Klima und zwei Klimaänderungsszenarien (Abbildung 3) über einen Zeitraum von 100 Jahren simuliert und miteinander verglichen wurden. Der mit sekundären Fichtenwäldern bestockte Betrieb mit 250 ha Waldfläche liegt im Wuchsgebiet 6.2 (Klagenfurter Becken). Das aktuelle Klima (Szenario C1) wurde durch die Verhältnisse der Periode 1961-1990 repräsentiert (durchschnittliche Jahresmitteltemperatur 7.6°C, Jahresniederschläge ca. 1000 mm). Die beiden Klimaänderungsszenarien basieren auf den Simulationsergebnissen von zwei unterschiedlichen globalen Klimamodellen für ein „business as usual“ Emissionsszenario (IS92a, IPCC 2000). Die beiden Klimaänderungsszenarien deuten sehr gut die Unsicherheit der Einschätzungen bezüglich Klimafolgenforschung an. Im Szenario C2 steigen die Jahresmitteltemperaturen bis ins Jahr 2100 verglichen zu 1961-1990 um ca. +5°C an, im Szenario C3 um ca. +4°C. Die Niederschläge nehmen bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts zu und zeigen in der zweiten Hälfte des 100-jährigen Analysezeitraums eine variable bis abnehmende Tendenz. Insbesondere im Szenario C3 sinken die Niederschläge in den letzten 20 Jahren des Analysezeitraumes um mehr als 200 mm im Vergleich zum aktuellen Klima.

Drei alternative Waldbaukonzepte wurden auf betrieblicher Ebene untersucht: Waldbaukonzept MS1 entspricht dem aktuellen Bewirtschaftungsansatz („weiter so“ Szenario) und repräsentiert eine Fichten-Altersklassen-Bewirtschaftungsmodell mit Naturverjüngung von Fichte in kurzen schirmschlagartigen Verjüngungsverfahren. Konzept MS2 sieht die Überführung in einen Fichtendauerwald durch Strukturdurchforstung in Stangenhölzern und Zielstärkennutzung mit Naturverjüngung in Baumholzbeständen vor. Konzept MS3 ist ein Altersklassen-Mischwaldszenario, das je nach Standorts- und heutigem Bestandestyp die Begründung von Fichten/Buchen-Mischbeständen mit Voranbau von Buche/Bergahorn oder die Begründung von Eichen-Buchen-Mischbeständen nach flächiger Nutzung vorsieht. Die drei Waldbehandlungskonzepte wurden für alle drei Klimaszenarien über 100 Jahre mit dem Waldökosystemmodell PICUS v1.4 simuliert. Tabelle 1 zeigt zusammengefasst die Kurzcharakteristik der drei Waldbaukonzepte.



**Abbildung 3:** Temperatur- und Niederschlagsentwicklung in den drei verwendeten Klimaszenarien. C1: heutiges Klima. C2, C3: Klimaänderungsszenarien beruhend auf dem IS92a Emissionsszenario. Die Szenariodaten C2 stammt vom globalen Klimamodell HadCM2 aus Grossbritannien, C3 vom Klimamodell ECHM4 vom Max-Planck Institut in Hamburg.

Um die alternativen Bewirtschaftungskonzepte unter Klimaänderung nicht nur hinsichtlich ihrer naturalen Leistungen beurteilen zu können wurde zusätzlich eine ökonomische Analyse der Konzepte durchgeführt. Dazu wurde für alle in der Simulation vorkommenden Baumarten die mittleren Holzpreise (indexbereinigte Preise der Dekade 1990-1999) für Sortimente der Einzelstammsortentafeln verwendet. Zusätzlich wurden in der Preiskalkulation für jede der verwendeten Baumarten eine Qualitätsverteilung sowie eine bestimmte Verwendung der genutzten Sortimente (Säge, Papier, Brennholz) unterstellt. Hier werden einige ausgewählte betriebliche Erfolgsindikatoren mit Schwerpunkt auf Holzproduktion präsentiert. Detaillierte Ergebnisse sind in Seidl et al. (2007a,,c) und Vacik et al. (2007) zu finden.

**Tabelle 1:** Kurzcharakteristik der drei untersuchten Waldbau-Konzepte.**MS1 Fichten-Altersklassenkonzept**

- Umtriebszeit: 90 Jahre
- Naturverjüngung der Fichte über rasche Schirmschlagverfahren (Lichtung, Räumung)
- Stammzahlreduktion
- mehrere Auslesedurchforstungen

**MS2 Fichte-Dauerwald**

- Naturverjüngung der Fichte
- Strukturdurchforstung (Stangenhölzer)
- Zielstärkennutzung (Baumholz)

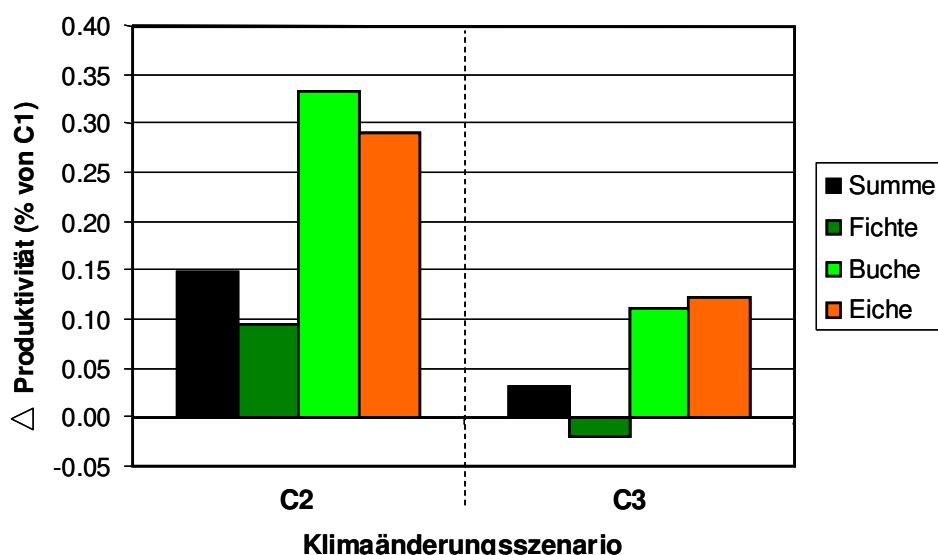
**MS3 Waldumbau Mischbestände**

- Einbringen von Buche/Bergahorn und Eiche (Pflanzung) durch Voranbau bzw. nach Räumung/Kahlschlag
- Bestockungszieltyp nach Standort/ Ausgangsbestand differenziert
- Stammzahlreduktion – Mischungsregelung – Kronenpflege
- Auslesedurchforstung

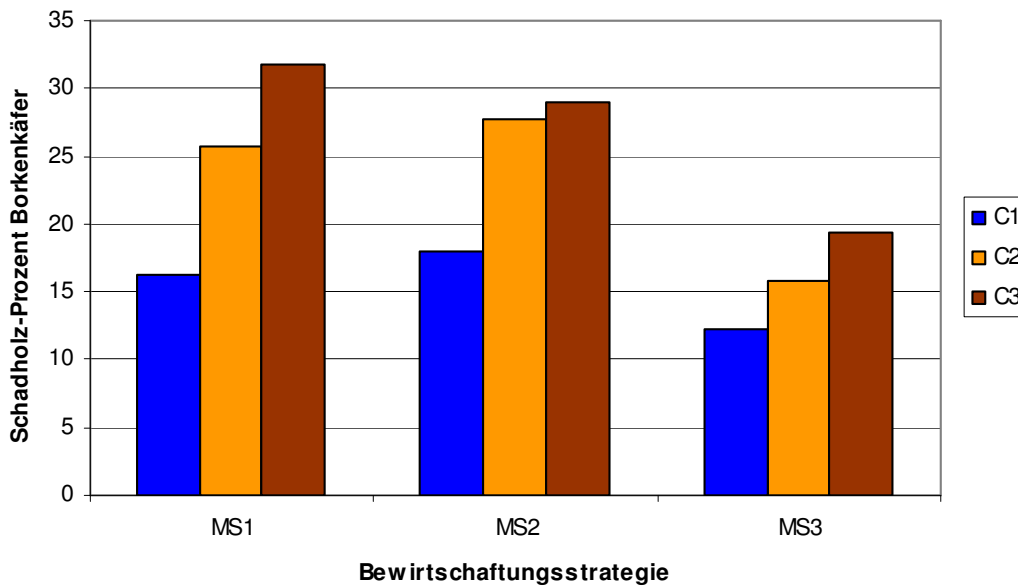
## 4.2 Klimaänderung und Produktivität

In bezug auf die Baumartenzusammensetzung am Ende des 100-jährigen Betrachtungszeitraumes hebt sich die Waldumbaustrategie MS3 deutlich von den anderen Bewirtschaftungsvarianten ab: Während in den Waldbaukonzepten Fichte-Altersklasse (MS1) und Fichte-Dauerwald (MS2) der anfänglich vorhandene geringe Anteil von eher zufällig eingemischten Baumarten (Kiefer, Stieleiche) weiter zurückging, da keine spezielle Begünstigung dieser Mischbaumarten im Zuge der Pflege und Verjüngungsverfahren durchgeführt wurden, zeigte die mit moderater Intensität geführte Umbauvariante (MS3) im Simulationsjahr 2100 bereits einen Anteil von 28.1% Buche und 9.2% Eiche am gesamtbetrieblichen Holzvorrat. In diesem Zusammenhang ist von Interesse, wie sich die unterschiedlichen Klimaszenarien auf den Zuwachs an Schaftderbholz auswirken. Unter aktuellem Klima (C1) zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den drei Waldbaukonzepten, wobei sich tendenziell das Dauerwaldkonzept MS2 am produktivsten darstellte. Die Klimaänderungsszenarien C2 und C3 hatten jedoch einen deutlichen Einfluss auf die Produktivität. Unter dem Szenario C2 stieg die Produktivität bei allen Waldbaukonzepten zwischen 8,5% und 17% verglichen mit dem Ergebnis unter aktuellem

Klima an, dabei konnte das Waldumbauszenario MS3 am meisten profitieren. Unter dem Szenario C3, das am Ende der Analyseperiode deutlich trockener wird, gingen die Zuwächse für die Konzepte Fichte-Altersklasse (MS1) und Fichte-Dauerwald (MS2) leicht zurück, während das Umbauszenario auch hier noch +4% Zuwachssteigerung aufwies. In Abbildung 4 werden die wichtigsten Baumarten im Umbauszenario MS3 in Bezug auf ihr Zuwachsverhalten mit dem aktuellem Klima verglichen. Unter beiden Erwärmungsszenarien C2 und C3 sind eindeutig die Laubbaumarten begünstigt. Während unter C2 sogar die Fichte noch eine geringfügige Zuwachssteigerung aufwies, wendet sich das Blatt unter dem trockeneren Erwärmungsszenario C3 endgültig: Die Fichte leidet unter der Trockenheit und ständigen Borkenkäferschäden, während die Laubbaumarten von der längeren Vegetationsperiode profitieren können. Innerhalb der Laubbaumarten wendet sich der Trend nun allerdings zugunsten der Eiche. Eine weitere deutliche Änderung verursacht die Klimaänderung bezüglich des Störungsregimes im Beispielforstbetrieb. Liegt der Anteil der Kalamitätsnutzungen aufgrund von Borkenkäferbefall am Gesamteinschlag unter aktuellem Klima noch zwischen 8% und 12%, nehmen die simulierten Borkenkäferschäden unter den Klimaänderungsszenarien in allen Waldbaukonzepten stark zu (bis zu +27% unter dem trockeneren Erwärmungsszenario C3). Den geringsten Anstieg aller simulierten Waldbaukonzepte verzeichnet dabei die Waldumbaustrategie MS3 (siehe Abbildung 5).



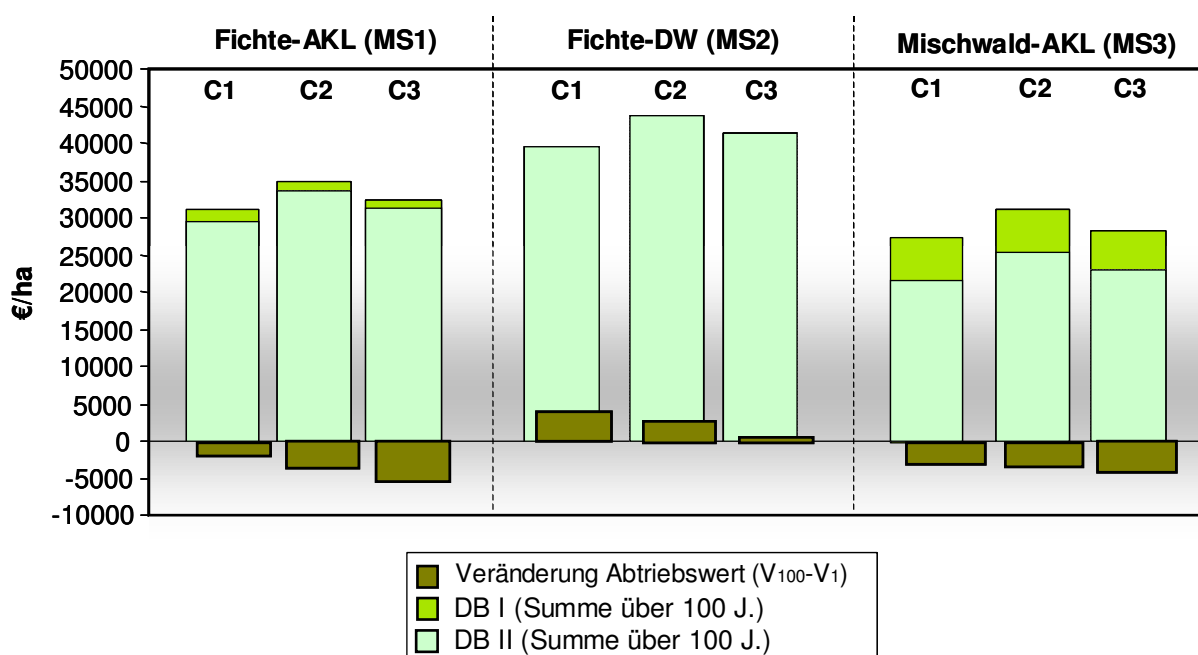
**Abbildung 4:** Klimabedingte Zuwachsveränderung der Baumarten im Waldbaukonzept MS3 (Waldumbau-Mischbestände) relativ zum Wachstum unter heutigem Klima.



**Abbildung 5:** Simulierte Kalamitätsnutzungen durch Borkenkäfer in den Bewirtschaftungsstrategien MS1 (Fichten-Altersklassenwald), MS2 (Fichten-Dauerwald) und MS3 (Altersklassen-Mischwald) unter heutigem Klima (C1) sowie zwei Klimaänderungsszenarien (C2, C3).

### 4.3 Ökonomische Implikationen

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Betrachtung von wirtschaftlichen Kennzahlen der drei untersuchten Bewirtschaftungsstrategien. In Abbildung 6 sind der Deckungsbeitrag (DB) I (erntekostenfreie Erlöse aus den Nutzungen) und II (DB I zuzüglich der Waldbaukosten) sowie die Vermögensveränderung (bewertet als erntekostenfreie Abtriebswerte des stehenden Vorrats) über den Analysezeitraum dargestellt. Die höchsten DB I und II wurden erwartungsgemäß unter dem Dauerwaldkonzept erreicht (116-118% des Fichtenaltersklassenkonzeptes MS1), der DB II im Mischwaldszenario wurde durch die konservativ geschätzten Kosten für das Einbringen der Laubhölzer deutlich gedrückt (86-88% des Fichtenaltersklassenkonzeptes MS1). Das Fichten-Altersklassenkonzept baut wegen der starken Borkenkäferschäden insbesondere unter den Klimaänderungsszenarien Vermögen ab, das Umbauszenario MS3 hauptsächlich wegen der schlechter bewerteten Laubholzanteile. Nur im Dauerwaldkonzept erhöhte sich der Wert des stehenden Vorrats trotz ebenfalls starker Käferschäden.



**Abbildung 6:** Ökonomische Kennzahlen des Beispielbetriebes für drei Bewirtschaftungsstrategien MS1 (Fichten-Altersklassenwald), MS2 (Fichten-Dauerwald) und MS3 (Altersklassen-Mischwald) unter heutigem Klima (C1) sowie zwei Klimaänderungsszenarien (C2, C3). DB I: Deckungsbeitrag 1 (erntekostenfreier Abtriebsertrag); DB II: DB I abzüglich der Waldbaukosten.

#### 4.4 Zusammenfassung

Anhand der Analyseergebnisse kann gefolgert werden:

- (i) In Bezug auf den Zuwachs profitieren unter den Klimaänderungsszenarien vor allem die Laubbaumarten. Wird es wärmer und trockener, sinkt die Produktivität der Fichte. Vor allem Niederschlagsreduktionen in der Vegetationsperiode stellen eine Gefährdung für die Fichte dar.
- (ii) Das Hauptproblem für die Fichte stellt allerdings nicht die abnehmende Produktivität dar sondern die extreme Kalamitätsanfälligkeit, sobald das Klima trockener und wärmer wird.
- (iii) Solange das Dauerwaldkonzept MS2 ausschließlich auf Fichte setzt, vermag es langfristig die negativen Auswirkungen einer Klimaerwärmung nicht wesentlich zu mildern. Verbesserte Vertikalstrukturen alleine können die physiologischen Eigenschaften der Fichte nicht verbessern.

Für den betrachteten Beispielbetrieb wäre eine erfolgversprechende Bewirtschaftungsstrategie, die Vorteile des Dauerwaldkonzeptes (MS2) mit jenen des Waldumbaukonzeptes (MS3) zu kombinieren indem (a) (Laub)mischbaumarten eingebracht werden (z.B. Buche, Ahorn, Tanne); (b) die Vorratshöhe niedriger angesetzt wird als im

gezeigten Beispiel, um stärkere Verjüngungsdynamik und gleichzeitig verringertes Risiko zu erzielen. Durch Ausschöpfung des Naturverjüngungspotenziales von Mischbaumarten können die Kosten des Umbaukonzeptes deutlich gesenkt werden. Dies würde allerdings eine verbesserte Kontrolle des Standortsfaktors Wild erfordern. Ein hoher Anteil der Kosten für den Waldumbau zu Mischbeständen wird zudem von Wildschutzmaßnahmen verursacht.

## 5. Ausblick

Eine Klimaänderung wird deutlichen Einfluss auf Waldökosysteme in Österreich haben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die den hier präsentierten Abschätzungen zugrunde liegenden Klimaänderungsszenarien keine Extremszenarien darstellen sondern sich in etwa im mittleren Bereich des IPCC Szenario-Fächers befinden (vgl. Abbildung 1). Klimabedingte Änderungen in Wuchsbedingungen, Konkurrenzverhältnissen und Störungssystemen haben potentiell große Auswirkungen auf die nachhaltige Bewirtschaftung von Waldökosystemen. Eine mögliche Zunahme von Stressfaktoren für große Teile des österreichischen Waldes könnte einer nachhaltigen Erfüllung der stetig anwachsenden gesellschaftlichen Anforderungen an den Wald entgegenstehen. So haben Klimaänderungsfolgen nicht nur, wie für den Beispielbetrieb gezeigt, deutliche Auswirkungen auf die „klassische“ Waldfunktion Holzproduktion. Eine Klimaänderung kann sich unter anderem ebenso auf die im Wald gespeicherten Kohlenstoffvorräte auswirken, was bei einer klimabedingten Verringerung dieser Speicher (z.B. durch großflächige Störungen, vermehrten Umsatz im Boden) ein verstärkendes Feedback auf die klimarelevante atmosphärische Treibhausgaszusammensetzung haben kann (siehe Seidl et al. 2007c). Dabei ist zu bedenken, dass der Wald bei weitem den größten terrestrischen Kohlenstoffspeicher in Österreich darstellt, und dieser Speicher in den letzten Jahren stetig zunahm, d.h. eine Senke für atmosphärischen Kohlenstoff darstellte und somit dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegenwirkte (Weiss et al. 2000). Weitere vor allem im Alpenraum bedeutende Waldfunktionen wie Schutz vor Bodenerosion oder Naturgefahren können ebenfalls negativ durch Klimaänderungsfolgen beeinflusst werden. Eine schlechtere Anpassbarkeit der Baumarten ausgelöst durch klimatische Änderungen könnte in manchen Bereichen zu einer Destabilisierung der Schutzwälder beitragen. Dieser Prozess kann durch verjüngungshemmende Verbissbelastung weiter verschärft werden. Bedeutend sind in diesem Zusammenhang vor allem biotische Störfaktoren wie Borkenkäfer, welche unter Klimaänderung auch in den montanen und subalpinen Bereichen zunehmend zu Schäden führen könnten. Da in derartigem Gelände aber herkömmliche Forstschutzroutinen zusätzlich erschwert sind, stellen solche potentiellen klimainduzierten Veränderungen eine große

Herausforderung für die nachhaltige Bereitstellung von Waldfunktionen (z.B. Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren) dar.

Um derartigen Herausforderungen zu begegnen, ist eine fundierte Analyse und für den Fall einer sich abzeichnenden Anfälligkeit die zeitgerechte Anpassung in Form von Adaptionsstrategien unerlässlich (Stern 2006). Dies umso mehr, da durch die in der Forstwirtschaft notwendigen Produktionshorizonte mit ausgesprochen langen Vorlaufzeiten bis zum Wirksamwerden derartiger Maßnahmen zu kalkulieren ist. Die natürlichen Rahmenbedingungen für eine zukünftige Waldbewirtschaftung - unter geänderten Umweltbedingungen - werden Jahrzehnte vorher vorgegeben. Analysen wie die hier vorgestellte können aufzeigen, welche Vor- und Nachteile mit unterschiedlichen Waldbau-Strategien verbunden sind. Aufgrund der hohen räumlichen und strukturellen Heterogenität des Österreichischen Waldes (z.B. Standorte, Besitzstruktur, Besitzerinteressen) ist allerdings zu berücksichtigen, dass es kein allgemeingültiges Konzept geben kann. In diesem Sinn ist es von großer Bedeutung, erfolgversprechende Anpassungsstrategien, wie sie für den Beispielbetrieb in der vorgestellten Studie exemplarisch aufgezeigt wurden, für wichtige Standorts- und Bestandestypen des österreichischen Waldes zu erarbeiten um sowohl den Waldbewirtschaftern als auch den politischen Entscheidungsträgern eine entscheidungsunterstützende Grundlage für die herausfordernde Aufgabe der Waldbewirtschaftung im Klimawandel zur Seite stellen zu können. Anwendungsreife Waldökosystemmodelle, die sowohl realistische Waldbaumassnahmen als auch die Reaktion von Baumarten auf Klimaveränderungen simulieren können, werden als Planungsinstrumente an Bedeutung stark gewinnen.

## 6. Literatur

- IPCC, 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Nebojsa Nakicenovic. ISBN-13: 9780521800815
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Final Report Working Group 1, Intergovernmental Panel on Climate Change Assessment Report 4. Geneva, Switzerland, p. 987. available online <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html> (2007-05-21).
- Lexer, M.J., Hönninger, K., 2001. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. *Forest Ecology and Management* 144, 43-65.
- Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: A large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management* 162, 53-72.

- Lexner, M.J., 2001. Simulation der potentiellen natürlichen Vegetation für Österreichs Wälder. Vergleich von statischen und dynamischen Modellkonzepten. Band 16, Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur Wien. 166 p.
- Lexner, M.J., Hönningern, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., 2001. The sensitivity of Central European forests to scenarios of climatic change. A large-scale risk assessment. M-132, Umweltbundesamt, Wien. 132 p.
- Seidl, R., Lexner, M.J., Jäger, D., Hönninger, K., 2005. Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model. *Tree Physiology* 25, 939-951.
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., Currie, W.S., Lexner, M.J., 2007a. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management*, in press. doi:10.1016/j.foreco.2007.02.035.
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., Lexner, M.J., 2007c. Biotic disturbance and forest management under climate change: effects on timber production and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* (accepted).
- Seidl, R., Rammer, W., Schopf, A., Lexner, M.J., 2007b. Modelling tree mortality from bark beetle infestation in Norway spruce forests. *Ecological Modelling* (accepted).
- Stern, N., 2006. *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 712. available online [http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm) (2007-03-17).
- Vacik, H., Wolfslehner, B., Seidl, R., Lexner, M.J., 2007. Integrating the DPSIR-approach and the Analytic Network Process for the assessment of forest management strategies. In: Reynolds K., Rennolls K., Köhl M., Thomson A., Shannon M., Ray D. (Eds.). *Sustainable Forestry: From Monitoring and Modelling to Knowledge Management and Policy Science*. CAB International, Cambridge. 393-411. ISBN 9781845931742.
- Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Radunsky, K. & Englisch, M. 2000. Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. M-106, Umweltbundesamt Wien. 94 p.

**Autoren:****ao Univ. Prof. DI Dr. Manfred J. Lexner****DI Rupert Seidl**

Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Waldbau, Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Peter Jordan Strasse 82

1190 Wien

[mj.lexner@boku.ac.at](mailto:mj.lexner@boku.ac.at)[rupert.seidl@boku.ac.at](mailto:rupert.seidl@boku.ac.at)