DOI 10.23760300-4112-79-131

Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems "Wald und Klimawandel" (DSS-WuK)

Martin Jansen¹, Claus Döring¹, Bernd Ahrends¹, Andreas Bolte², Tomacz Czajkowski², Oleg Panferov³, Matthias Albert⁴, Hermann Spellmann⁴, Jürgen Nagel⁴, Hannes Lemme⁴, Michael Habermann⁴, Kai Staupendahl⁵, Bernhard Möhring⁵, Michael Böcher⁶, Sabine Storch⁶, Max Krott⁶, Robert Nuske⁷, Jan Carl Thiele⁷, Jens Nieschulze⁷, Joachim Saborowski⁷ und Friedrich Beese¹

¹Georg-August-Universität, Abteilung für Ökopedologie der gemäßigten Zonen, Büsgenweg 2, D-37077 Göttingen (korresponierender Autor, mjansen@gwdg.de)

²Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Alfred-Möller-Str.1, D-16225 Eberswalde
³Georg-August-Universität, Abteilung für Bioklimatologie,, Büsgenweg 2, D-37077 Göttingen
⁴Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstr. 2, D-37079 Göttingen

⁵Georg-August-Universität, Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung, Büsgenweg 5, D-37077 Göttingen ⁶Georg-August-Universität, Abteilung für Forst- und Naturschutzpolitik und Forstgeschichte, Büsgenweg 5, D-37077 Göttingen ⁷Georg-August-Universität, Abteilung für Ökoinformatik, Biometrie und Waldwachstum, Büsgenweg 4, D-37077 Göttingen

Eingegangen: 27.05.2008 Angenommen: 22.07.2008

Kurzfassung: Die sich abzeichnenden globalen Umweltveränderungen werden zukünftig unsere Waldökosysteme und Waldlandschaften Umweltfaktoren aussetzen, die sich in ihrer Kombination und Dynamik grundsätzlich von denen der Vergangenheit unterscheiden. Dies erschwert die betriebliche Entscheidungsfindung, weil zukünftige Risiken aus der bisherigen Erfahrung nur schwer ableitbar sind. Im Projekt "Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystem DSS-WuK" werden daher Modelle und Methoden entwickelt, mit der die zu erwartenden standörtlichen Veränderungen abgebildet und Stressoren wie Wind, Trockenheit und biotische Schaderreger regional differenziert abgeschätzt werden. Die räumliche Auflösung der vorliegenden Eingangsgrößen zum Klima und Standort und die drin enthaltenen Unsicherheiten lassen in erster Linie Aussagen zu strategischen Entscheidungen und zur langfristigen Ausrichtung von betrieblichen Zielen zu. Neben der Einschätzung von abiotischen und biotischen Risiken wird versucht, die wachstumskundlichen Veränderungen mithilfe eines klima- und standortssensitiven Wachstumssimulators abzuschätzen. Risikofaktoren und Wachstumsänderungen bilden die Grundlage für eine ökonomische Bewertung und die Ableitung waldbaulicher Anpassungsstrategien.

Adaptation strategies for a sustainable forest management under climate change – Development of a Decision Support System Forest and Climate Change (DSS-WuK)

Abstract: The emerging global environmental changes will expose our forest ecosystems and woodlands to environmental factors, which differ in their combination and dynamics fundamentally from those of the past. This complicates operational decision-making, since it is hard to infer future risks from previous experiences. Therefore, the project "Adaptation Strategies for Sustainable Forest Management under Changing Climatic Conditions – Development of a Decision Support System DSS-WuK" develops models and methods reflecting the expected site changes to estimate the impact of stress factors such as wind, drought and pests on a regional scale. The spatial resolution of the available input parameters covering climate and site productivity and their uncertainties permit predominantly conclusions on a strategic level. In addition to the assessment of abiotic risks the project tries to estimate the changes in forest growth with the help of a climate and site-sensitive growth model. Risk factors and changes of forest growth form the basis for an economic evaluation and derivation of silvicultural adaptation strategies.

Key words: storm damage, water stress, biotic risk, site sensitive forest growth, economic evaluation, silvicultural adaptation strategies

1 Einleitung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund globaler Umweltveränderungen werden unsere Waldökosysteme und Waldlandschaften zukünftig Umweltfaktoren ausgesetzt sein, die sich in ihrer Kombination und Dynamik grundsätzlich von denen der Vergangenheit unterscheiden. Die sich bereits vollziehenden Klimaveränderungen in Europa zeigen einen Temperaturanstieg, eine geänderte Verteilung und Intensität des Niederschlags sowie eine Häufung von Witterungsextremen in Form von Dürreperioden, Starkregen und Stürmen (IPCC 2007). Dieser Klimawandel wirkt auf den Wald zusammen mit den Änderungen des chemischen Klimas (Boisvenue u. Running 2006), wie dem Anstieg der Kohlendioxid- und Ozongehalte der Luft (Pregitzer et al. 2006, Sanderson et al. 2007),

sowie der anhaltenden Bodenversauerung und Nährstoffverarmung (Sanderson et al. 2006) sowie der Stickstoffeutrophierung (Bytnerowicz et al. 2007, Paoletti et al. 2007). Alle diese Faktoren werden in ihrer Wechselwirkung die ökologischen und ökonomischen Produktionsbedingungen der Forstwirtschaft, aber auch die Funktionen von Wäldern in der Kulturlandschaft tiefgreifend verändern.

Da die zukünftigen Umwelteinflüsse und deren Zusammenwirken neuartig sein können, sind modellgestützte Forschungsansätze notwendig, die diese Faktorenkombinationen in ihrer Wirkung auf Ökosystemebene integrieren. Nur so wird es möglich sein, die ökonomischen und sozialen Auswirkungen abzuschätzen und auf dieser Basis die notwendigen Anpassungsstrategien zu entwickeln, damit Waldbesitzer und -nutzer sowie forstpolitische Interessenvertreter rechtzeitig auf die zu erwartenden Entwicklungen reagieren können.

Die beobachteten Veränderungen im Klimageschehen lassen sich mithilfe von globalen Modellen gut beschreiben (Roeckner et al. 2006b, IPCC 2007). Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung für das 21. Jahrhundert werden unter Annahmen über die zukünftigen wirtschaftlichen, sozialen und technologischen Entwicklungen möglich.

Ziel des hier vorgestellten Entscheidungsunterstützungssystems "Wald und Klimawandel" (DSS-WuK) ist es, das vorhandene Wissen über die zu erwartenden Klimaänderungen und deren mögliche ökologische und ökonomische Auswirkungen auf die forstliche Bewirtschaftung in einem benutzerorientierten Informations- und Entscheidungsunterstützungssystem zusammenzufassen.

Entscheidungsunterstützungssysteme spielen zur Lösung forstpraktischer Fragestellungen eine immer größere Rolle (Rauscher 1999, Varma et al. 2000, Vacik u. Lexer 2001, Reynolds 2005, Li et al. 2007). Insbesondere die seit den 90er-Jahren des vorigen Jahrhunderts integrierten räumlichen Informationssysteme sind bei der flächenexpliziten Entscheidungsfindung bedeutsam (Fabrika 2002, Hytönen et al. 2002, Shim et al. 2002, Rinner 2003, Bhargava et al. 2007). Die bearbeiteten forstlichen Fragstellungen sind dabei von unterschiedlicher Komplexität, thematisch überwiegen waldbauliche und naturschutzfachliche Fragestellungen (Rauscher 1999, Vacik u. Lexer 2001, Ostwald 2002, Pennanen u. Kuuluvainen 2002, Mosandl u. Felbermeier 2003, Ray u. Broome 2003), aber auch technische Anwendungen, wie z. B. Kalkung, werden bearbeitet (Jansen et al. 1994, 2007). Die Benutzer- und Bedienerfreundlichkeit der neueren Systeme wird dabei durch den Einsatz webbasierter Benutzerschnittstellen wesentlich verbessert (Rinner 2003, Bhargava et al. 2007, Li

Zur Erfüllung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Bewirtschaftung bedarf es operationaler, langfristig ausgelegter Anpassungsstrategien der Waldbewirtschaftung, die den Klimaszenarien Rechnung tragen, um die damit verbundenen Risiken zu reduzieren. Dafür muss vorhandenes ökologisches, ökonomisches und soziales Wissen in einem transdisziplinären Ansatz zielgerichtet neu aufbereitet und über Fachgebietsgrenzen hinweg verknüpft werden. Dazu werden im ersten Schritt die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Sturm, Trockenheit, Nährstoffmangel und biotische Schäden sowie Zuwachsveränderungen flächendifferenziert und baumartenspezifisch für Wälder in Deutschland abgeschätzt (s. Abschn. 2.3). Dies bildet die Grundlage für die ökonomische Bewertung (Abschn. 2.4) und die standortsbezogenen Empfehlungen zu Baumarten, deren Mischungen und Bewirtschaftung (Abschn. 2.5).

Zu beachten ist jedoch, dass das System und die Eingangsdaten mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Unsicherheiten resultieren sowohl aus den angenommen sozialen, politischen und wirtschaftlichen Randbedingungen der angenommenen Szenarien als auch ihren Umsetzungen in den Klimaprojektionen. Auch die Ableitungen der forstwirtschaftlichen Risiken sind aufgrund der verfügbaren raumbezogenen Informationen und des derzeitigen Wissens über Wirkungszusammenhänge unschaft und bedürfen einer stetigen Überprüfung.

2 Struktur des DSS-WuK

2.1 Grundzüge

Das DSS-WuK bietet dem Nutzer vorprozessierte bundesweite thematische Karten, z. B. Niederschlags- und Temperaturveränderung der jeweiligen unterstellten Szenarien für drei 30-Jahresperioden bis 2100 sowie den Status quo. Neben den flächenhaften Informationen kann der Nutzer regional differenziert Ergebnisse zu biotischen und abiotischen Risiken, zum Standorts-Leistungs-Bezug, zu Baumartenempfehlungen und ökonomischen Bewertungen für die Hauptbaumarten Eiche (*Quercus* spec.), Buche (*Fagus sylvatica*), Fichte (*Picea abies*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Kiefer (*Pinus*

sylvestris) abrufen.

Das Entscheidungsunterstützungssystem gliedert sich in drei Bereiche: die Eingabe, den eigentlichen Systemkern und den Bericht, der als Ergebnis der Abfrage ausgegeben wird (Abb. 1). Der Nutzer kommuniziert mit dem System über eine Eingabemaske, in der er seine Abfragen formulieren und modifizieren kann. Dabei werden die Lagekoordinaten abgefragt, um die Zuordnung zu den Rasterzellen der Klimaszenarien und den vorprozessierten Bodendaten zu ermöglichen. Falls der Nutzer über standörtliche Eingangsdaten verfügt, kann er sie in das System eingeben. Diese Eingaben werden im eigentlichen Systemkern bearbeitet, anschließend erhält der Benutzer die Ergebnisse in von ihm wählbarer Berichtsform (s. Abb. 1).

Der Systemkern ist in die drei Bereiche Datengrundlagen, thematische Module und Bewertung gegliedert.

Die Eingangsdaten zum Relief, Boden, Klima und Bestand stellen die Basis für die zu entwickelnden Module. Der bundesweite Ansatz macht eine flächenhafte Datengrundlage notwendig (s. Abschn. 2.2).

Die eigentlichen Berechnungen erfolgen in den Modulen mit prozessorientierten oder statistischen Modellen, die die wichtigsten Stressoren Wind, Trockenheit, Nährstoffmangel und Schaderreger beschreiben. Als Ergebnisse werden Überschreitungen von kritischen Grenzwerten beispielsweise des Winddrucks oder des Xylemwasserpotenzials berechnet. Die durch die Klimaänderung veränderte Wachstumsdynamik der Bestände wird mithilfe eines klimasensitiven, standortsabhängigen Wachstumssimulators beschrieben (s. Abschn. 2.3).

Anschließend werden die Ergebnisse der naturalen Modellierung ökonomisch bewertet. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten von biotischen und abiotischen Schadereignissen sowie modellierte Zuwachsveränderungen bilden dafür die Grundlage. Die ökonomische Bewertung beeinflusst wiederum die waldbaulichen Empfehlungen (s. Abschn. 2.4).

2.2 Datengrundlagen

2.2.1 Relief

Wichtige standörtliche Basisinformationen sind Reliefeigenschaften, die beispielsweise die lokale Ausprägung von Wind, Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte oder Niederschlag beeinflussen (Mues et al. 2002, Böhner 2002). Im DSS-WuK wird auf die bundesweit verfügbaren Daten der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) zurückgegriffen. Für detaillierte Modellierungen kommen Höhendaten mit höherer räumlicher Auflösung, z. B. aus dem Digitalen Gelände Modell im Maßstab 1:5.000 (DGM5), zum Einsatz.

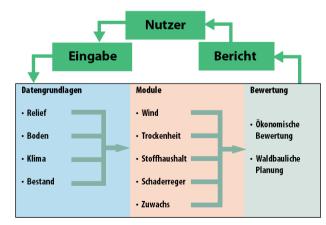


Abb. 1. Übersichtsdarstellung Entscheidungsunterstützungssystem Wald und Klimawandel (DSS-WuK).

Scheme of the Decision Support System Forest and Climate Change (DSS-Wuk).

Tab. 1. Randbedingungen der IPCC-Szenarien A1B und B1 (IPCC 2000, S. 13 ff). Basic conditions and socio-economic assumptions of the emission-scenarios A1B and B1 (IPCC 2000, p. 13 ff).

| | | Szenario A1B | | | | Szenario B1 | | |
|--|----------------------------|--------------|------|------|------|-------------|------|------|
| | | 1990 | 2020 | 2050 | 2100 | 2020 | 2050 | 2100 |
| Bevölkerung | (10 ⁹ n) | 5,3 | 7,4 | 8,7 | 7,1 | 7,4 | 8,7 | 7,1 |
| Bruttosozialprodukt | (1012 US\$/Jahr) | 21 | 56 | 181 | 529 | 53 | 136 | 328 |
| Primärenergieverbrauch | (10 ¹⁸ J/Jahr) | 351 | 711 | 1347 | 2226 | 606 | 813 | 514 |
| Anteil Kohle | (%) | 24 | 23 | 14 | 4 | 22 | 21 | 8 |
| Anteil regenerativer Energie | (%) | 18 | 16 | 36 | 65 | 21 | 30 | 52 |
| CO ₂ -Emission (foss.) Energie) | (Gt C/Jahr) | 6,0 | 12,1 | 16 | 13,1 | 10 | 11,7 | 5,2 |
| Methan | (Mt CH ₄ /Jahr) | 320 | 421 | 452 | 289 | 377 | 359 | 236 |

2.2.2 Boden

Bundesweit verfügbare Informationen zu den vorherrschenden Bodeneigenschaften von Waldökosystemen liefert bisher die Bodenübersichtskarte Wald (Wald-Bük) im Maßstab 1:1.000.000. Die Sachdatenbank der Wald-Bük enthält 124 Leitprofile, die aus der Bodenzustandserfassung im Wald (BZE, Wolff u. Riek 1999) stammen. Die Leitprofile sind bodenmorphologisch und -chemisch umfassend beschrieben. Mithilfe von Pedotransferfunktionen lassen sich die Eingangsgrößen für prozessorientierte Modelle beispielsweise zum Bodenwasserhaushalt ableiten (Teepe et al. 2003).

2.2.3 Klima

Im Rahmen des IPCC-Prozesses wurden verschiedene Szenarien der zukünftigen globalen Emissionen von Treibhausgasen als Randbedingungen für die globalen Klimamodelle entworfen (SRES-Szenarien, IPCC 2000, Nakićenović u. Swart 2000, Meehl et al. 2007). Es wurden zwei der SRES-Szenarien für die Entwicklung von Anpassungsstrategien ausgewählt. Beiden Szenarien liegen die gleichen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung zugrunde, mit einem Maximum von 8,7 Mrd. Menschen in der Mitte des 21. Jahrhunderts (s. Tab.1). Beim B1-Szenario wird im Gegensatz zu A1B der CO₂-Ausstoß sehr früh und wirksam reduziert, was zum großen Teil auf den Rückgang des

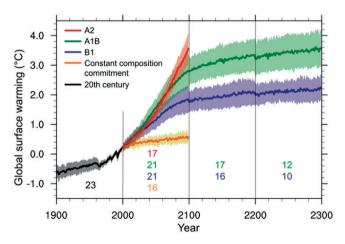


Abb. 2. Modellierte langfristige Entwicklung der weltweiten Oberflächentemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher sozialer und technischer Entwicklungen (Solomon et al. 2007).

Long-term projections of global surface temperature due to different social and technological development scenarios (Solomon et al. 2007).

Primärenergieverbrauchs zurückgeht. In beiden Szenarien erhöht sich der Anteil an regenerativen Energieträgern bis zum Jahr 2100 auf 65 % (A1B) bzw. 52 % (B1).

Bei den eher optimistischen Erwartungen des Szenarios B1 wird weltweit bereits eine Erhöhung der mittleren Durchschnittstemperatur von über 2 °C \pm 0,3 projiziert (s. Abb. 2, Solomon et al. 2007). Bei dem Szenario A1B mit höherem Primärenergieverbrauch steigt weltweit die mittlere Temperatur um ca. 3 °C bis zum Jahr 2100. Wie träge das Klima insgesamt reagiert, zeigt das Szenario "constant composition commitment", bei dem die Emissionen auf dem heutigen Stand eingefroren sind und dennoch ein globaler Anstieg der Oberflächentemperatur erfolgt.

2.2.4 Regionale Szenarien

Das atmosphärische globale Zirkulationsmodell ECHAM5 rechnet mit einer räumlichen Auflösung von ca. 2° (\approx 200 km) und das Ozean-Meereis-Modell MPI-OM mit variierenden Auflösungen von 10 km bis 150 km. Um die regionalen Konsequenzen besser abschätzen zu können, wurden für Europa bzw. für Deutschland, Österreich und die Schweiz die globalen Klimaprojektionen mit genesteten Regionalmodellen (Climate Local Model – CLM bzw. Regional Model – REMO) auf eine höhere räumliche Auflösung skaliert (Roeckner et al. 2006a). Für Deutschland sind beispielsweise die Szenarien A1B und B1 als CLM- oder REMO-Daten verfügbar (Jacob 2006, Keuler 2006). Die CLM-Daten haben eine horizontale Auflösung von 0,165° bzw. 0,2°, die REMO-Daten liegen im Raster mit 0,08° vor. Derzeitige Modellierungsgrundlage im Rahmen des DSS-WuK sind die CLM-Daten.

2.3 Thematische Module

Der Anstieg der klimarelevanten Spurengase wirkt auf Klimavariablen, wie beispielsweise Wind, Temperatur und rel. Feuchte. Eine relativ kleine mittlere Verschiebung von Klimavariablen verändert die Anzahl der Extremereignisse sehr deutlich (s. Abb. 3). Bleibt die Häufigkeitsverteilung des Merkmals weitgehend konstant, so bewirkt beispielsweise eine mittlere Temperaturerhöhung eine Abnahme der Häufigkeit der kalten Ereignisse, gleichzeitig aber eine deutliche Zunahme von warmen und das Auftreten heißer Wetterlagen (Schär et al. 2004, Schönwiese et al. 2005, Solomon et al. 2007).

2.3.1 Wind

Projektionen

Die globalen Vorhersagen des Szenarios A1B für die Veränderung des Windregimes in unseren Breiten zeigen, dass im Gegensatz zu den tropischen Stürmen die "Lage der Zugbahnen, die Gesamtzahl der

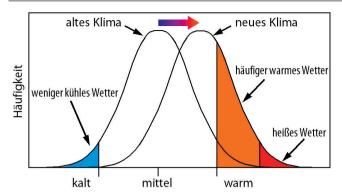


Abb. 3. Auswirkungen mittlerer Temperaturverschiebung auf die Verteilung und Häufigkeit von extremen Wetterlagen (Solomon et al. 2007, veränd.) Mean temperature shift and its effects on the distribution and frequency of weather extremes (acc. to Solomon et al. 2007, mod.).

Stürme, deren saisonale Variationen und insbesondere auch [für] die Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Windstärke" realistisch simuliert werden können (Roeckner et al. 2006a). Derzeit wird eine leichte Zunahme an extremen Stürmen projiziert (Leckebusch et al. 2007), in Mitteleuropa verbunden mit einer Zunahme der mittleren Stärke der Winterstürme um ca. 10 %. Für Deutschland wird eine Erhöhung der sturmbedingten Schäden um 21 % erwartet (Leckebusch et al. 2007).

Auswirkungen auf Wälder

Der Schadholzanteil in der Fichtenbetriebsklasse in Deutschland liegt bei 25-30 %, davon entfällt ca. die Hälfte auf Sturmschäden (Redde 2002), im jährlichen Durchschnitt ca. 400.000 fm. Das Sturmholzaufkommen wird dominiert von Einzelereignissen (Abb. 4) und ist räumlich und zeitlich nicht gleichmäßig verteilt. Untersuchungen von Mosandl und Felbermeier (1999) sowie Schelhaas et al. (2003) zeigen, dass das Schadensausmaß in den letzten Jahren und Jahrzehnten deutlich angestiegen ist.

Arbeitsansatz

Zur Abschätzung der Windwurfschäden werden drei Teilmodelle in einem Wind-Boden-Baum-Modell gekoppelt. Zur Beschreibung

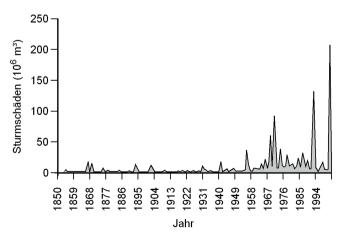


Abb. 4. Sturmholzaufkommen (10^6 m^3) in Europa (Schelhaas et al. 2003, veränd.).

Storm-felled timber volume ($10^6~{\rm m}^3$) in Europe (Schellhaas et al. 2003, mod.).

des Windes wird ein 3-D-Modell der atmosphärischen Grenzschicht (SCADIS) verwendet (Panferov et al. 2007). Es beschreibt die Dynamik der atmosphärischen Grenzschicht in reliefiertem Gelände mit heterogener Vegetationsbedeckung in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (Sogachev u. Panferov 2006). Das Windmodul liefert den Winddruck auf Bäume in Waldbeständen mit unterschiedlicher Baumartenzusammensetzung in Abhängigkeit von der Geländeposition. Zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Sturmschäden unter bekanntem Windstress sind zusätzlich Informationen zu den Bestandes- und Baumeigenschaften (H/D-Verhältnis, Einzelbaumverankerung) und zum Boden und dessen aktuelle Wassergehalte notwendig. Zur Abschätzung der Einzelbaumverankerung werden aus Literaturangaben baumarten- und standortsspezifische Strukturen von Wurzelsystemen mit verankerungsrelevanten Größen wie Wurzeltiefe, Wurzelquerschnittsareal und Wurzelmasse (vgl. Bolte et al. 2003) zusammengestellt, und daraus wird mithilfe von allometrischen Beziehungen (Le Goff u. Ottorini 2001, Lüpke v. u. Kuhr 2001, Bolte et al. 2004) ein Wurzelmodul im Waldwachstumssimulator BWINPro generiert. Die Kombination dieser Angaben mit Restriktionen zur Durchwurzelung aufgrund von begrenzter Gründigkeit oder Grundund Staunässe nach dem Bodenmodul sowie zusätzlichen bestandesstrukturellen Informationen erlaubt qualifizierte Schätzungen zur Bestandesstabilität gegenüber Wind.

2.3.2 Trockenheit

Projektionen

Die Projektionen weisen beim Niederschlag zukünftig andere jährliche Verteilungsmuster in Mitteleuropa auf. Es wird wahrscheinlich eine Zunahme intensiverer Niederschlagsperioden im Winter und eine Zunahme von sommerlichen Perioden ohne Niederschläge geben (Gerstengarbe et al. 2003, Roeckner et al. 2006a). Mit steigender Temperatur nimmt auch die Dauer von Hitzeperioden zu. Im Szenario A1B steigt die Zahl der Tage mit Temperaturen von mindestens 5 °C über dem monatlichen Klimamittel von heute 10 auf ca. 60 Tage im Jahr 2100 an. Temperatur- und Niederschlagsverteilungen, wie sie im Sommer 2003 auftraten, können dann häufiger vorkommen.

Auswirkungen auf Wälder

Die Auswirkungen niederschlagsfreier Perioden auf die Waldökosysteme werden durch standörtliche Faktoren, insbesondere die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, modifiziert (Raspe et al. 2004a, Müller 2006). Mögliche Auswirkungen von Trockenperioden auf die Wälder Mitteleuropas ließen sich beispielhaft am Sommer 2003 ermitteln. Dazu zählten die erhebliche Einschränkung der Assimilationsleistung bei reduzierten Wassergehalten bis auf 15 % des Vorjahres (Ciais et al. 2005, Graf Pannatier et al. 2006, Bolte et al. 2007, Granier et al. 2007) und damit verbundene Zuwachsverluste des Hauptbestandes sowie der nachwachsenden Verjüngung auch im Folgejahr (Raspe et al. 2004a, Czajkowski et al. 2005). Sichtbare Zeichen der Trockenheit waren ein vorzeitiger Blattfall Ende des Sommers 2003 und eine Kronenverlichtung, die sich in das Folgejahr fortsetzte (Mayer 2004, Raspe et al. 2004b, Graf Pannatier et al. 2006, Seidling 2007). Die starke Wechselwirkung von Trockenheit mit biotischen Einflüssen zeigt sich durch eine erhöhte Anfälligkeit des Baumbestands für Schaderreger (z. B. Dobbertin et al. 2007) und durch eine verschärfte Konkurrenz um knappe Wasser- und Nährstoffressourcen sowohl innerhalb des Baumbestands (Hauptbestand und Verjüngung, Czajkowski et al. 2005) als auch zwischen Baumbestand und Bodenvegetation (Müller et al. 1998). Trockenheitsinduzierte Veränderungen der Waldvegetation mit einem Ausfall von Baumarten der natürlichen Waldgesellschaft konnten bereits von Allen und Breashears (1998) und Rigling et al. (2006) beobachtet werden. Die zukünftig zu erwartende erhöhte Waldbrandgefahr stellt ein weiteres erhebliches Risiko für zukünftige Waldgenerationen in Europa dar (z. B. Badeck et al. 2004, Groisman et al. 2007).

Arbeitsansatz.

Grundlage für die regionale, flächendifferenzierte Abschätzung des Trockenstresses von Wäldern ist die Modellierung des Bestandeswasserhaushalts. Die klimatische Steuerung erfolgt über regionalisierte Klimaszenarien. Hydraulische Bodeneigenschaften werden über Leitprofile aus vorliegenden Kartenwerken, beispielsweise der BÜK1000 für Waldstandorte oder Standortskarten, zugeordnet. Die Zuordnung der Wasserhaushaltskenngrößen erfolgt über Pedotransferfunktionen (z. B. Teepe et al. 2003). Über Schwellenwerte der Xylemleitfähigkeit, die quantitative Angaben zur Einschränkung der Wasserversorgung der Baumkrone durch Embolien liefern (Cochard et al. 1996, Bréda et al. 2006), und deren Zusammenhang zum Matrixpotenzial (z. B. Bréda et al. 1995) können kritische Bodenwasserpotenziale im Bereich der unteren Hauptwurzelzone für einzelne Hauptbaumarten definiert werden. Diese können zur Abschätzung von Schadwirkungen einer Trockenheit (Dauer und Intensität) für die verschiedenen Baumarten herangezogen werden (s. Maherali et al. 2004).

2.3.3 Stoffhaushalt

Projektionen

Die Waldökosysteme werden zukünftig nicht nur von der Entwicklung der physikalischen Umwelt (z. B. Temperatur, Niederschlag), sondern auch von der Veränderung des chemischen Klimas beeinflusst. Dazu gehören neben den direkten Wirkungen von CO₂, O₃ und der UV-B-Strahlung insbesondere Stoffeinträge. Ohne die Kenntnisse der stoffhaushaltlichen Ernährungssituation von Wäldern kann die Wirkung von Klimaänderungen nicht ausreichend abgeschätzt werden (Puhe u. Ulrich 2001, Bytnerowicz et al. 2007). Durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Säureeinträge in die Wälder sowie die Depositionen von K, Mg und Ca in den letzten Jahren stark zurückgegangen (Fowler et al. 2007, Gauger et al. 2008). Da die aktuellen und erwarteten Stickstoffeinträge deutlich den Bedarf der Bestände übersteigen, wird das Wachstum der Waldbäume auch zukünftig nicht durch Stickstoffmangel limitiert werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang die Verfügbarkeit der Nährstoffkationen K, Mg und Ca.

Die nach den Vereinbarungen des Göteborg-Protokolls¹ projizierten Entwicklungen der wichtigsten Stoffeintragskomponenten (vgl. Abb. 5) geben den Rahmen für die zukünftige Eintragssituation vor.

Auswirkungen auf Wälder

Die Nährstoffverfügbarkeit in Waldökosystemen hängt neben der Eintragssituation hauptsächlich von der Silikatverwitterung, der Humusdynamik und dem Bestandeswachstum ab. Eine schwer zu quantifizierende Größe ist die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden und im Auflagehumus. Im Verlauf einer waldbaulichen Umtriebszeit ist die Humusauflage einer dynamischen Entwicklung unterworfen (Heinsdorf et al. 1986, Berthold u. Beese 2002, Heinsdorf 2002, Jansen et al. 2005, Prietzel et al. 2006), die sich durch den Einfluss von Temperaturerhöhung und Niederschlagsverteilung verändern wird. Dabei könnte es sowohl zu einer erwärmungsbedingten Erhöhung der Mineralisierung als auch zu einer trockenheitsbedingten Reduktion und damit zu einer verminderten Nährstofffreisetzung kommen.

Eine Vorhersage, in welche Richtung sich die Humusdynamik und damit auch die Nährstoff- und Kohlenstoffdynamik unter veränderten Klimabedingungen entwickeln wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig. Entscheidend ist, dass zwischen den labilen und den stabilen Fraktionen der organischen Substanz unterschieden wird (Jandl et al. 2007). So stammen viele der Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und Mineralisierung aus Untersuchungen der

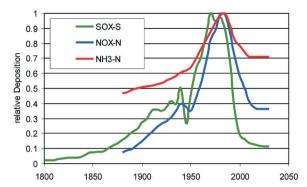


Abb. 5. Rekonstruierte und projizierte Entwicklung der Deposition von Schwefel und den Stickstoffverbindungen NO_x -N und NH_3 -N am Beispiel des Harzes (nach Schöpp et al. 2003, Alveteg et al. 1998).

Projections of past and future deposition trends of sulfur and nitrogen compounds (NO_x -N, NH_3 -N) at the Harz mountains (acc. to Schöpp et al. 2003 and Alveteg et al. 1998).

labilen Fraktionen. Demgegenüber ist weniger über die Faktoren bekannt, die die Stabilität der organischen Substanz beeinflussen (Martel u. Paul 1974, Rumpel et al. 2002, Berg u. Laskowski 2006, Schöning u. Kögel-Knaber 2006) und besonders wenig über die Wechselwirkungen dieser Faktoren unter veränderten klimatischen Bedingungen (Fontaine et al. 2007).

Arbeitsansatz.

Ein bundesweit verfügbares DSS sollte sich an Critical Loads-Konzepten (ökologische Belastungsgrenzen, Nagel u. Gregor 1999, Spranger et al. 2004) orientieren, da diese über flächendeckend anwendbare Methoden und Modelle sowie regionalisierte Kenngrößen verfügen (Gauger et al. 2008). Dynamische biochemische Modelle, wie z. B. MAGIC (Cosby et al. 1985), FORSAFE (Wallman et al. 2005) oder VSD (Posch et al. 2003), sind wichtige Instrumente für die Politikberatung im Bereich der Luftreinhaltung und Bodenversauerung (Martinson et al. 2005). Entsprechend können verhältnismäßig einfache und auf dem Massenbilanzansatz beruhende Modelle wie VSD auch als Modul im Entscheidungsunterstützungssystem eingesetzt werden. Als Eingangsgrößen werden die atmosphärische Deposition und die Verwitterung der Bodenminerale im Wurzelraum berücksichtigt. Die Bilanzgrößen, die den Austrag beschreiben, sind der Nährstoffexport durch Holzernte und der Austrag mit dem Sickerwasser.

Als Grundlage für die dynamische Modellierung der Stoffeinträge dienen die Depositionskarten des Umweltbundesamtes (Gauger et al. 2008). Diese werden mit dem Modell MAKEDEP (Alveteg et al. 1998) in die Vergangenheit und in die Zukunft extrapoliert. Der Rahmen für die historischen und zukünftigen luftbürtigen Stoffeinträge in die Wälder wird über historische Zeitreihen (Schöpp et al. 2003) und internationale Vereinbarungen zur Luftreinhaltung, wie z. B. das Göteborg-Protokoll, abgesteckt. Die Regionalisierung dieser Daten erfolgt mithilfe der vorliegenden Bestandesinformation (Baumart, Rauigkeit usw.) und des Downscaling-Ansatzes DEPOSILVA (Ahrends et al. 2007).

Die Silikatverwitterung wird für die kleinmaßstäbliche Risikoabschätzung nach dem regel-basierten Ansatz des ICP-Mapping- und Modelling-Manuals (Spranger et al. 2004) ermittelt. Die Verwitterungsraten für großmaßstäblichere Aussagen werden entweder mit dem Simulationsmodell PROFILE (Sverdrup u. Warfvinge 1995) oder über aus dem Modell abgeleitete regelbasierte Ansätze (Malessa u. Ahrends 2001, Falk 2007) abgeschätzt.

Bei den dynamischen Berechnungen der Elementbilanzen werden die baumartenspezifischen Nährstoffentzüge infolge von Biomasse-

¹Das Göteborg-Protokoll ist ein international rechtsverbindliches Instrument zur Verringerung der Luftschadstoffe. Es wurde 1999 von den meisten europäischen Staaten, den USA und Kanada beschlossen, trat 2005 in Kraft und legt Grenzen für die jährlichen Emissionen der Schadstoffe SO₂, NO₃, NH, und VOC fest (UN/ECE 2004).

nutzung durch die Kopplung der Elementkonzentration (Jacobsen et al. 2003) in verschiedenen Baumkompartimenten mit dem Waldwachstumssimulator (s. Abschn. 2.3.5) abgebildet.

2.3.4 Schaderreger

Projektionen

Grundsätzlich werden Insekten durch Änderungen im abiotischen Faktorengefüge in ihrem Massenwechsel sowohl direkt als auch indirekt beeinflusst (z. B. Schwerdtfeger 1968, 1981, Bale et al. 2002). Es kann erwartet werden, dass mit der Zunahme von sommerlichen Trockenperioden stammbrütende Insekten, die auf physiologisch geschwächte Wirtsbäume angewiesen sind, stark an Bedeutung zunehmen. Die Gradationsmuster von blatt- und nadelfressenden Insekten, die positiv auf warme Sommerwitterung reagieren, werden ebenso zunehmen. Problematisch ist die Abschätzung der Wirkung der deutlichen Zunahme der Temperaturen und Niederschläge im Winter auf im Boden überwinternde Stadien von Schadinsekten. Infolge geänderter Stoffwechselaktivität und Verpilzungsraten verändern sich die Überlebenswahrscheinlichkeiten. Somit wird der Wandel des Klimas einige Schadinsektenarten fördern, andere hemmen.

Auswirkungen auf Wälder

Durch die baumartspezifische Wirkung von Massenvermehrungen einzelner Schadinsektenarten wird die interspezifische Konkurrenzfähigkeit einzelner Baumarten an einem Standort wesentlich beeinflusst (Schowalter 1996). Insbesondere bei der Fichte, möglicherweise auch der Kiefer, werden durch rindenbrütende Insekten nach extremer Sommertrockenheit die Schäden deutlich ansteigen. Zudem können durch mögliche Arealvergrößerung süd- und südosteuropäischer Schadinsekten als auch durch veränderte Etablierungschancen von Neozoen neue, heute noch unbekannte Schadursachen hinzutreten.

Arbeitsansatz

Ziel des Teilprojekts ist die Entwicklung von artspezifischen Modellen für ausgewählte wichtige Forstschadinsekten wie Buchdrucker, Kiefernprachtkäfer und Kiefernspinner, mit denen sich veränderte Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Schädlingsbefall unter den klimatischen Szenarien vorhersagen lassen. Für eine Reihe von forstlich bedeutsamen Schadinsekten gibt es bekannte, gut abgesicherte Zusammenhänge der Verbreitungsmuster mit klimatischen Variablen.

Die Integration von Modellen zu biotischen Schaderregern in das DSS erleichtert betriebsspezifischen Entscheidungen z. B. über Baumartenwahl, Bestandespflegemodelle, Bestandesstrukturen, Produktionszeiträume und Begrenzung von Produktionsrisiken. Aussagen zur Prophylaxe, zu erforderlichen Monitoring- und Überwachungsmaßnahmen sowie möglichen Bekämpfungsmaßnahmen sollen den Nutzern eine weitere Hilfestellung geben.

2.3.5 Standorts-Leistungs-Bezug

Projektioner

Der Zuwachs der Bestände ist ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit und nachhaltige Produktion der Forstbetriebe. Eine klimainduzierte Verstärkung der Stressoren, insbesondere eine Zunahme des Trockenstresses und biotischer Schaderreger, wird die Vitalität der Bestände schwächen und negativ auf den Zuwachs wirken. Der Zuwachs ist damit ein integraler Indikator für die veränderten Standortsfaktoren.

Neben anderen Standortsfaktoren beeinflussen die klimasensitiven Parameter "pflanzenverfügbares Wasser" und "mittlere Temperatur in der Vegetationszeit" die Leistungsfähigkeit der Bestände am stärksten. Der Wechselwirkung von Temperatur und Niederschlag kommt dabei besondere Bedeutung zu (Mäkinen et al. 2003). Schadauer (1999) zeigt bei der Modellierung der Höhenbonität der Fichte in Österreich, dass der Effekt der Temperatur wesentlich stärker die Bonität beeinflusst

als der Niederschlag; d. h., bei gleichbleibender Niederschlagssumme führt eine Temperaturzunahme zu einer stärkeren Bonitätssteigerung als umgekehrt mehr Niederschlag bei gleicher Temperatur. Des Weiteren weist die Bonität eine Maximumbeziehung über der Temperatur auf. Ab einer gewissen mittleren Temperatur wirkt dieser Faktor folglich reduzierend auf den Zuwachs. Schadauer (2006) schlägt als Erklärungsansatz die bei höheren Durchschnittstemperaturen längeren Trockenperioden mit ihren negativen Auswirkungen auf den Zuwachs vor. Offensichtlich spiegelt im Höhenbonitätsmodell die Niederschlagssumme einer ganzen Vegetationsperiode solch zeitlich begrenzte Trockenperioden innerhalb der betrachteten Zeitspanne nicht hinreichend wider. Für die Fichte und auch die Buche in Niedersachsen und Schleswig-Holstein bestätigen Albert und Schmidt (2008) den Befund, dass der Effekt der mittleren Temperatur in der Vegetationszeit auf die Höhenbonität der Bestände stärker ist als der Einfluss des Wasserhaushalts. Mäkinen et al. (2000, 2001, 2003) weisen ebenfalls die größere Bedeutung der Temperatur gegenüber dem Niederschlag für den Radialzuwachs von Fichten nach.

Auswirkungen auf Wälder

Die in Klimaszenarien prognostizierte Zunahme der mittleren Temperatur in der Vegetationszeit wird, ausreichende Wasserversorgung am Standort vorausgesetzt, die Leistungsfähigkeit der Bestände steigern. Die prognostizierte Abnahme der Sommerniederschläge wird hingegen wachstumsreduzierend wirken. Der positive Temperatureffekt auf das Wachstum und der negative Niederschlagseffekt kompensieren sich daher teilweise. Ein Niederschlagsrückgang wird insbesondere dann kritisch, wenn damit Trockenstress verbunden ist (s. Abschn. 2.3.2). Dies ist vor allem auf Grenzstandorten zu erwarten, die bereits heute Trockenstress für die Bestände aufweisen (vgl. Rehfuess 1999, Pretzsch et al. 2002, Dittmar et al. 2003, Spellmann et al. 2007). Zu beachten ist hierbei, dass ein gesteigertes Trockenstressrisiko direkt durch verminderte Niederschläge und indirekt durch eine erhöhte Evapotranspiration bei steigenden Temperaturen hervorgerufen werden kann

Da die Reaktion auf die Standortsveränderungen baumartenspezifisch ist, wird sich auch die interspezifische Konkurrenz am Standort verändern (Pretzsch u. Dursky 2002).

Für Baumartenempfehlungen wird somit hinsichtlich der Wuchsleistung der standortsspezifische Wasserhaushalt der bestimmende Einflussfaktor sein, der ggf. einzelne Baumarten für einen wirtschaftlichen Anbau ausschließt.

Arbeitsansatz

Herkömmliche Bonitierungssysteme unterstellen eine Konstanz der Standortsfaktoren, die bereits seit mehreren Jahrzehnten nicht mehr gegeben ist (vgl. z. B. Röhle 1995, Sterba 1995, Elving u. Nyström 1996, Spiecker et al. 1996, Schadauer 1999). Die Modellierung des Standorts-Leistungs-Bezuges unter Klimawandel verwendet daher einen Bonitierungsansatz auf Basis der Arbeit von Mehtätalo (2004), der den sich ändernden Umweltbedingungen Rechnung trägt. Auf der Grundlage ertragskundlicher Daten der Bundeswaldinventur und regionalisierter Klimadaten wird mithilfe des longitudinalen Höhen-Durchmesser-Bonitierungsansatzes (Schmidt 2008) die Leistungsfähigkeit der Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer in Bezug auf Standortsfaktoren analysiert. Die Optimal-, die Potenz- und die Grenzbereiche der Baumarten werden durch Schätzung der Höhenbonität in Abhängigkeit der entsprechenden Standortsvariablen mithilfe von Quantilsregressionen mit nichtlinearen Effekten identifiziert (R Development Core Team 2006, Koenker 2007). Dies stellt eine Weiterentwicklung gegenüber den bisher verwendeten Klimahüllen-Ansätzen nach Kölling (2007) dar, die nur die synökologischen Grenzbereiche abbilden und nicht die autökologischen Potenz- und Optimalbereiche (Wagner 2008).

Ein klimasensitives Modell des Standorts-Leistungs-Bezugs kann schließlich auf zwei methodischen Ansätzen beruhen, nämlich den

bereits von Kahn (1994) verwendeten Wirkungsfunktionen oder einem regressionsanalytischen Ansatz (vgl. z. B. Wykoff et al. 1982, Sterba et al. 1995, Kändler u. Riemer 2005). Nach Implementierung des Standorts-Leistungs-Modells in den Waldwachstumssimulator BWINPro (Nagel 1999, Nagel et al. 2002) kann der Wachstumsgang eines Bestandes klimasensitiv prognostiziert und damit können ertragskundliche Kenngrößen berechnet werden.

2.4 Ökonomische Bewertung

Eine betriebswirtschaftliche Bewertung der oben beschriebenen Module kann nur vor dem Hintergrund der betrieblichen Ziele Rentabilität, Liquidität, Risikominderung und Flexibilität erfolgen. Die Folgen des Klimawandels können als Abweichungen der Erfüllung dieser ökonomischen Zielkriterien von der "Normallage" aufgefasst und bewertet werden. Den Überlebenswahrscheinlichkeiten der wichtigsten Hauptbaumarten auf den verschiedenen Standortstypen kommt hierbei größte Bedeutung zu, da diese integrierender Ausdruck aller auf einen Bestand letal wirkenden Stressoren sind (z. B. König 1996, Möhring 1986, Kouba 2002). Die Überlebenswahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Waldbestand auf gegebenem Standort und mit bekanntem Alter ein Intervall bestimmter Länge überlebt (marginale Betrachtung) bzw. auf gegebenem Standort ein bestimmtes Zielalter erreicht (kumulative Betrachtung). Sie kann auch als Anteil der ursprünglichen Bestandesfläche interpretiert werden, der zu einem bestimmten Alter noch vorhanden ist. Beinhofer und Knoke (2007) entwickelten auf der Basis dieses Ansatzes und unter Verwendung empirischer Daten der letzten 50 Jahre die Altersklassenverteilung einer Fichtenbetriebsklasse unter Risikoeinfluss und zeigten damit exemplarisch, dass bereits jetzt naturale Risiken die ökonomischen Resultate der Forstwirtschaft z. T. erheblich beeinflussen. Dies wird bei der Bewertung der in Zukunft zu erwartenden klimabedingten Risiken zu berücksichtigen sein.

Für die Vergangenheit ergeben sich im Durchschnitt der Verhältnisse in Deutschland die in Abbildung 6 dargestellten Kurven, wenn man die von Knoke et al. (2008) publizierten Wahrscheinlichkeitsverläufe in die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Potenzfunktion transformiert: p_0 gibt dabei die Überlebenswahrscheinlichkeit zum Bezugsalter t_0 und damit das Niveau des Gesamtrisikos an, während der Formparameter b den zeitlichen Verlauf des Absterbeprozesses bestimmt.

Mittels dieser Potenzfunktion und entsprechend angepasster Parameter soll die Gefährdung der Hauptbaumarten und deren Veränderung in Abhängigkeit von Standortstyp und Klimaszenarien beschrieben werden. Dies könnte über den primären Zweck dieses Projektes hinaus auch zu einer Standardisierung der Risikobeschreibung für Baumarten-Standorts-Beziehungen beitragen.

Arbeitsansatz

Zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Zuwachsveränderungen und kalamitätsbedingter Nutzungen sollen zunächst die kalkulatorischen Grundlagen in Form von dimensionsabhängigen Erlös- und Kostenfunktionen für eine reguläre und eine kalamitätsbedingte Holzernte entwickelt werden. Hierbei wird nach Baumarten, Schadereignissen und Ernteverfahren zu differenzieren sein.

Die von den anderen Modulen quantifizierten Stressoren Trockenheit, Nährstoffmangel, Wind und Schaderreger sollen in einem Risiko-Bewertungsmodell zusammenfließen, das unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Zuwachsveränderungen erlaubt, die unter dem gegebenen Klimaszenario und den gegebenen Standortsbedingungen wahrscheinliche Entwicklung einer Betriebsklasse der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche und die damit verbundenen Zahlungsströme bis zum Jahr 2100 abzubilden. Da das Ergebnis von Kalkulationen über solch lange Zeiträume mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, sollen mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen Wahrscheinlichkeits-Verteilungen der Zielgrößen (z. B. der Annuität) ermittelt werden. Eine solche Angabe spiegelt die Unsicherheiten der

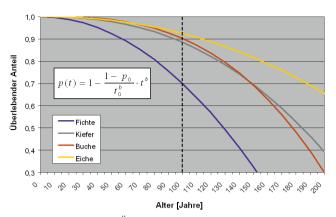


Abb. 6. Durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeiten der Hauptbaumarten in Abhängigkeit vom Alter *t*, modelliert mithilfe einer Potenzfunktion (Datengrundlage: Knoke et al. 2008).

Mean survival rate of major tree species regarding age t, modelled with a power function according to information of Knoke et al. (2008).

Prognose angemessen wider und erlaubt im Sinne der Portfolio-Theorie Bewertungen bei unterschiedlicher Risikobereitschaft.

Auf diesen Kalkulationsmodellen aufbauend, sollen in Kooperation mit Partnern aus der forstlichen Praxis unter Berücksichtigung der betriebsindividuellen Zielsetzungen für konkrete, für die Problematik relevante Forstorte Anpassungsstrategien entwickelt und in ihren betriebswirtschaftlichen Folgen bewertet werden.

2.5 Waldbauliche Planung

Der erste wichtige Schritt zur Unterstützung der Forstbetriebe bei langfristigen strategischen Entscheidungen ist die Abschätzung der Entwicklung möglicher Stressfaktoren (Abschn. 2.3). Die Dispositionen für naturale Stressoren werden im Hinblick auf die Abweichungen von den betrieblichen Zielen ökonomisch bewertet (Abschn. 2.4). Dies liefert die Grundlage für die waldbauliche Bewertung und die Empfehlungen möglicher Handlungsalternativen.

Generell sind drei verschiedene Optionen für eine gesteigerte Anpassung der Wälder an Umweltveränderungen zu unterscheiden, nämlich (1) die Steigerung der Widerstandsfähigkeit bestehender Waldbestände gegenüber Stress, (2) die Erhöhung der Bestandesresilienz nach klimainduzierten Störungen, z. B. durch schnellen Lückenschluss oder zügige Regeneration bestehender Bestände, und (3) die Unterstützung einer dynamischen Waldentwicklung bzw. Sukzession, d. h. aktives oder passives Ersetzen wenig angepasster Baumarten durch anpassungsfähigere Arten (Parker et al. 2000, Spittlehouse u. Stewart 2003, Millar et al. 2007). Die erste Option ist nur auf Standorten mit geringer Umweltveränderung, anpassungsfähigen Baumarten und/oder sehr wertvollen Beständen sinnvoll, die das Risiko eines katastrophalen Waldverlustes gering erscheinen lässt bzw. dieses rechtfertigt (vgl. Harris et al. 2006). Die dritte Option auf Hochrisiko-Standorten beinhaltet auch den möglichen Aufbau von Waldbeständen, die sich bewusst nicht an der jetzigen potenziellen natürlichen Vegetation (pnV) orientieren (Bolte u. Ibisch 2007, "neo-native" Wälder, Millar et al. 2007), sondern im Sinne einer Risikominimierung solche Baumarten bevorzugen, die ein möglichst hohes Anpassungspotenzial an die zukünftigen Klimabedingungen aufweisen (Lüpke v. 2004). Dabei sollen Mischungen von Baumarten bevorzugt werden, die eurvöke Arten mit hohem Besiedelungs- und Regenerationspotenzial integrieren (Thomasius 1991, Lüpke v. 2004, Wagner 2004, 2008). Die Berücksichtigung von eingeführten Herkünften wirtschaftlich bedeutsamer Arten aus anderen Teilen ihres natürlichen Verbreitungsgebiets, deren derzeitiges Klima unserem

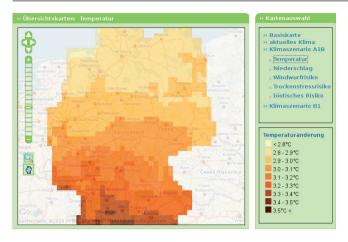


Abb. 7. Beispielhafte bundesweite Übersichtskarte der ersten Informationsebene des DSS-WuK zur Beschreibung von Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wälder, CLM-Klimaszenario A1B: regionale Änderung der Lufttemperatur bis zum Jahr 2100.

Nationwide map for assessing climate change impacts on forests, CLM scenario A1B: regional change of air temperatures until the year 2100.

zukünftigen ähnlich sein könnte ("Climate matching approach", Bradshaw et al. 2005), ist ebenfalls eine wichtige Handlungsoption (Bolte u. Ibisch 2007).

Arbeitsansatz

Die waldbaulichen Handlungsalternativen umfassen in erster Linie räumlich explizite Empfehlungen zur Verwendung von anpassungsfähigen Baumarten bzw. Baumartenmischungen als Konsequenz des Umweltwandels. Anhand der Analyse der Optimal-, Potenz- und Grenzbereiche der Leistungsfähigkeit der fünf Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer (vgl. Abschn. 2.3.5) werden dreidimensionale Ökogramme (vgl. Ellenberg 1996) erstellt. Über die Kombination aus Wasserhaushalt, Temperatur und Nährstoffversorgung können räumlich explizite Baumartenempfehlungen aus den Ökogrammen abgeleitet werden. Im Ergebnis werden digitale Karten zu Vorrang- bzw. Ausschlussgebieten von Baumarten und einzelnen Baumartenherkünften dargestellt (vgl. Spellmann et al. 2007).

3 Technische Umsetzung

Um bundesweit Informationen für Waldbesitzer und andere interessierte Nutzer über die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wälder zur Verfügung zu stellen, wurde ein web-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem konzipiert. Dieses System bietet dem Benutzer drei Informationsebenen an.

In der ersten Ebene geben Übersichtskarten einen Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels. Dazu werden die verwendeten Klimaprojektionen sowie beispielhaft räumliche Darstellungen des Trockenstresses und des Windwurfs in Form von interaktiven Karten angeboten (s. Abb. 7). Mögliche Gefährdungen der Baumarten können so im Vergleich zu anderen Gebieten abgeschätzt werden. Damit wird dem Nutzer ein erster Einstieg geboten, sich über das Ausmaß und die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder seiner Region zu informieren.

In der zweiten Ebene erhält der Nutzer nach Eingabe seiner Standortkoordinaten und der Auswahl eines Bodenprofils einen Bericht zu allen 5 Hauptbaumarten. Es werden für die drei Perioden 2011-40, 2041-70, 2071-2100 Einschätzungen der Gefährdung für Baumarten in Abhängigkeit von dem gewählten Klimaszenario auf einer regionalen Skala (20 km x 20 km Auflösung) gegeben. Die Abbildung 8 zeigt beispielhaft, wie die Auswirkungen der beiden Klimaszenarien auf die abiotischen und biotischen Risiken der Baumarten vergleichend betrachtet werden können. Je größer die eingenommene Fläche ist, desto günstiger sind die Bedingungen für die Baumart (geringeres Risiko, höherer Deckungsbeitrag und Zuwachs).

Die dritte Ebene ermöglicht die Abschätzung der klimatischen Entwicklung und der Risiken auf der lokalen Ebene. Dazu werden die Klimadaten in Abhängigkeit der lokalen Topographie auf eine höhere räumliche Auflösung skaliert. Für die Abschätzung der abiotischen und biotischen Gefährdungen der Baumarten werden die Module gekoppelt und Interaktionen berücksichtigt. Die Simulationen erfolgen benutzerspezifisch auf Anfrage. Die Ergebnisse können aufgrund der längeren Rechenzeiten nur zeitverzögert geliefert werden.

Das DSS wird durch ein umfassendes Hintergrundinformationssystem ergänzt, in dem der Nutzer Informationen zum Klimawandel sowie zur Benutzung des Systems erhält. Zudem werden hier die Dokumentationen der Module zur Verfügung stehen. Dazu wird ein eigenständiges Content-Management-System in das DSS eingebettet.

Das Entscheidungsunterstützungssystem wird als web-basierte Anwendung jedem Interessierten über einen Webbrowser zugänglich sein. Sowohl die inhaltliche als auch die technische Entwicklung verläuft rückgekoppelt mit potenziellen Nutzern. Dafür werden in Nutzerforen Prototypen vorgestellt und Vorschläge zur Verbesserung des Systems fortlaufend eingearbeitet. Die nachgefragte Benutzer-

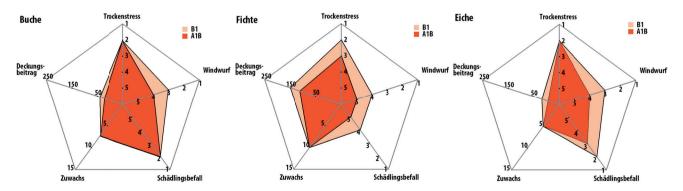


Abb. 8. Beispielhafte Ergebnisdarstellung der Risikoanalyse für verschiedene Baumarten und CLM-Klimaszenarien. (1: geringes Risiko, 5: hohes Risiko; Zuwachs: dGZ fm, Deckungsbeitrag: €).

Example of risk assessment for different tree species and CLM-scenarios. (1: low risk, 5: high risk; growth: fm, economic yield: €).

freundlichkeit wird dabei durch die oben beschriebene Untergliederung des Systems, einen leistungsstarken Server sowie eine performante Implementierung mit einem bewährten Webapplikations-Framework gewährleistet. Für die Übersichtskarten ist eine Web-GIS-Architektur mit einem klientenseitigen Web-Mapper, einem auf dem Server installierten Web- sowie einem Map-Server und zusätzlichen Karten- und OGC-Diensten von externen Servern eingerichtet worden. Die Klimadaten für die Simulationsläufe sowie die vorprozessierten Simulationsergebnisse werden in einer PostGreSQL-Datenbank mit PostGIS-Erweiterung vorgehalten. Die Koordination der dynamischen, gekoppelten Modellierung wird durch die Modell-Engine übernommen. Diese leitet sich aus dem zentralen Modell und den Schnittstellendefinitionen ab und sorgt für die Koppelung der Module zu einem Gesamtsystem (s. Abb. 9).

4 Wissenstransfer

Das Entscheidungsunterstützungssystem dient dazu, strategische Entscheidungen zur langfristigen Ausrichtung von Forstbetrieben zu unterstützen. Wichtige potenzielle Nutzer sind daher Entscheidungsträger auf der betrieblichen Ebene. Die betrieblichen Optionen im Wald sind aber auch für alle Stakeholder wichtig, die die politischen Rahmenbedingungen für die Forstbetriebe gestalten. Dieser zweite Teil der Zielgruppe umfasst politische Akteure aus dem Forstsektor sowie dem Umwelt- und Naturschutzbereich. Diese beeinflussen maßgeblich den gesetzlichen Rahmen der Waldbewirtschaftung bzw. den finanziellen Rahmen der Förderpolitik. Sie sind zusätzlich für das umfangreiche forstliche Beratungswesen zuständig. Für alle diese Akteure stellen die Informationen über die Risiken bzw. Handlungsmöglichkeiten der Forstbetriebe wichtige Grundlagen dar, um politische Instrumente so umzugestalten, dass sie den neuen Anforderungen unter geänderten Klimabedingungen gerecht werden.

Die Zielsetzung des Wissenstransfers lautet daher, die Chancen für den Einsatz des DSS in der Praxis zu optimieren. Auf der Basis politikwissenschaftlicher Erkenntnisse über den Transfer von Wissen (vgl. z. B. Krott u. Suda 2007) werden potenzielle Nutzer des DSS ermittelt und wird die Akzeptanz bei ausgewählten Zielgruppen empirisch erhoben. Darauf aufbauend, werden Strategien entwickelt und getestet, um die Relevanz, Glaubwürdigkeit und Legitimität des DSS zu erhöhen. Die Optimierung bezieht von Anfang an durch Informationsforen "Stakeholder" aus dem Politikfeld Wald/Klima mit ein. Die Integration des Wissenstransfers in das Projekt soll sicherstellen, dass das DSS-WuK eine breite Anwendung findet.

Danksagung

Die Arbeiten werden vom BMBF im Rahmen von "Klimazwei" gefördert.

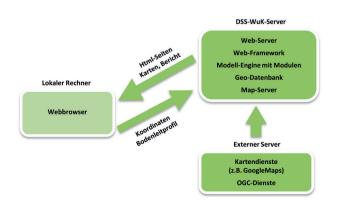


Abb. 9. Server-Architektur und Softwarekomponenten im DSS-Wuk. Server design and software components in the DSS-Wuk.

Literatur

- Ahrends B., Döring C., Jansen M., Meesenburg H., Beese F. 2007. Kopplung dynamischer Modelle für die flächenhafte Abschätzung der Stoffdeposition im Wald. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.110, 421-422
- Albert M., Schmidt M. 2008. Erste Ergebnisse zur Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges unter Klimawandel. In: DVFFA, Sektion Ertragskunde (Hrsg.) Beiträge Jahrestagung DVFFA, Sektion Ertragskunde. Trippstadt
- Allen C.D., Breshears D.D. 1998. Drought-induced shift of a forest-wood-land ecotone: Rapid landscape response to climate variation. Proc. Natl. Acad. Sci. 95, 14839-14842
- Alveteg M., Walse C., Warfvinge P. 1998. Reconstructing historic atmospheric deposition and nutrient uptake from present day values using MAKEDEP. Water Air Soil Pollut. 104, 269-283
- Badeck F.-W., Lasch P., Hauf Y., Rock J., Suckow F., Thonicke K., 2004. Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. AFZ/DerWald 59, 90-93
- Bale J.S., Masters G.J., Hodkinson I.D., Awmack C., Bezemer M., Brown V.K., Butterfiled J., Buse A., Coulson J., Farrar J., Good J.E.G., Harrington R., Hartley S., Jones T.H., Lindroth R.L., Press M.C., Symrnioudis I., Watt A.D., Whittaker J.B. 2002 . Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. Glob. Chang. Biol. 8, 1-16
- Beinhofer B., Knoke T. 2007. Umtriebszeit und Risiko der Fichte. AFZ/Wald 62, 110-113
- Berg B., Laskowski R. 2006. Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover. In: Elsevier (Hrsg.) Adv. Ecol. Res. 38. Amsterdam, 428 S
- Berthold D., Beese F. 2002. Kohlenstoffspeicherung in Böden nach Aufforstung in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsform. Forst u. Holz 57, 417-420
- Bhargava H.K., Power D.J., Sun D. 2007. Progress in web-based decision support technologies. Decis. Support Syst. 43, 1083-1095
- Böhner J. 2005. Advancements and new approaches in Climate Spatial Prediction and Environmental Modelling. Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der HU zu Berlin 109, 49-90
- Boisvenue C., Running S.W. 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity evidence since the middle of the 20th century. Glob. Change Biol. 12, 862-882
- Bolte A., Ibisch P.L. 2007. Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. AFZ/DerWald 62, 572-576
- Bolte A., Hertel D., Ammer C., Schmid I., Nörr R., Kuhr M., Redde N. 2003. Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln. Forstarchiv 74, 240-262
- Bolte A., Rahmann T., Kuhr M., Pogoda P., Murach D., Gadow K.v. 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech *Fagus sylvatica* L. and Norway spruce *Picea abies* [L.] Karst. Plant Soil 264, 1-11
- Bolte A., Czajkowski T., Kompa T. 2007. The northeastern distribution range of European beech a review. Forestry 80, 413-429
- Bradshaw R.H.W., Wolf R.A., Friis Moller P. 2005. Long-term succession in a Danish temperate deciduous forest. Ecography 28, 157-164
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. 1995. Soil water dynamics in an oak stand. Plant Soil 172, 17-27
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Ann. For. Sci. 63, 625-644
- Bytnerowicz A., Omas K., Paoletti E. 2007. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. Environm. Poll. 147, 438-445.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogee J., Allard A., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grunwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature 437, 529-533
- Cochard H., Bréda N., Granier A.1996. Whole-tree hydraulic conductance and water loss regulation of *Quercus petraea* during drought: evidence for stomatal control of embolism? Ann. Sci. For. 53, 197-206
- Cosby B.J., Hornberger G.M., Galloway J.N., Wright R.F. 1985. Modelling the effects of acid deposition: assessment of a lumped-parameter model

- of soil water and streamwater chemistry. Water Resour. Res. 21, 51-63
- Czajkowski T., Kühling M., Bolte A. 2005. Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche Fagus sylvatica L. im nordöstlichen Mitteleuropa. Allg. Forst u. Jagdztg. 176, 133-143
- Dittmar C., Zech W., Elling, W. 2003. Growth variations of common beech Fagus sylvatica L. under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. For. Ecol. Manage. 173, 63-78
- Dobbertin M., Wermelinger B., Bigler C., Bürgi M., Carron M., Forster B., Gimmi U., Rigling, A. 2007. Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. Sci. World J. 7, 231-239
- Ellenberg H. 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 5. Aufl. Stuttgart
- Elving B., Nyström K.1996. Stability of site index in Scots pine *Pinus sylvestris* L. Plantations over year of planting in the period 1900-1977 in Sweden. In: Spieker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J.P. (Eds.) Growth Trends in European Forests. Berlin, Heidelberg and New York, 71-78
- Fabrika M. 2002. Multifunctional optimisation of stand tending by SDSS and growth modelling. Proceedings of International Symposium Management and modelling multifunctional forest enterprises and properties, Sopron, Hungary, 41-53
- Falk W. 2007. Bewertung von Bodenfunktionen in Bayern Stand und Weiterentwicklung der Bewertungsmethoden. In: Joneck M. (Hrsg.) Bodenschutz die europäische Dimension. Marktredwitzer, 94-99
- Fontaine S., Barrot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. Nature 450, 277-280
- Fowler D., Smith R., Muller J., Cape J.N., Sutton M., Erisman J.W., Fagerli H. 2007. Long term trends in sulphur and nitrogen deposition in Europe and the cause of non-linearities. Water Air Soil Pollut. Focus 7, 41-47
- Gauger Th., Haenel H.-D., Rösemann C., Nagel H.-D., Becker R., Kraft P., Schlutow A., Schütze G., Weigelt-Kirchner R., Anshelm F. 2008. Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen). Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 204 63 252. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, gefördert vom Bundesministerium f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dessau-Rosslau
- Gerstengarbe F.-W., Badeck F., Hattermann F., Krysanova V., Lahmer W., Lasch P., Stock M., Suckow F., Wechsung F., Werner P.C. 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report No. 83. Potsdam, 78 S.
- Graf Pannatier E., Dobbertin M., Schmitt M., Thimonier A., Waldner P. 2006. Effects of drought 2003 on Forests in Swiss Level II plots. http:// www.icp-forests.org/DocsCrown/Go2.3_Pannatier.pdf
- Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I.A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Keronen P., Knohl A., Köstner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors E., Papale D., Peiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufert G., Tenhunen J., Vesala T., Wang Q. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. Agric. For. Meteorol. 143, 123-145
- Groisman P.Y., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Førland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.H. 2007. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20th century. Glob. Planet. Chang. 56, 371-386
- Harris J.A., Hobbs R.J., Higgs E., Aronson J. 2006. Ecological restoration and global climate change. Restor. Ecol. 14, 170-176
- Heinsdorf D. 2002. Einfluss der Bewirtschaftung auf den Kohlenstoffhaushalt von Forstökosystemen im nordostdeutschen Tiefland. Beitr. Forstwirtsch. Landsch.ökol. 36, 168-173
- Heinsdorf D., Krauß H.-H., Tölle H. 1986. Entwicklung der C- und N-Vorräte nach Kahlschlag auf ärmeren anhydromorphen Sandböden unter Kiefer. Beitr. Forstwirtsch. 20, 8-13
- Hytönen L.A., Leskinen P., Store R. 2002. A spatial approach to participatory planning in forestry decision making. Scand. J. Forest Res. 17, 62-71
- IPCC 2000. Emissions Scenarios, A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, UK. 570 pp
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution

- of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jacob 2006. Remo A1B Scenario Run, UBA PROJECT, DATASTREAM3. CERA-DB "REMO_UBA_A1B_D3" http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_A1B_D3
- Jacobsen C., Rademacher P., Meesenburg H., Meiwes K.-J. 2003. Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung. Ber. Forsch.zent. Waldökosyst. Univ. Göttingen, Reihe B, Band 69, 81 S.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkkinen K., Byrne K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma 137, 253-268.
- Jansen M., Schroetter M., Eberl C., Meiwes K. J., Ulrich B., Sloboda B. 1994. Prototyp eines wissensbasierten Systems zur Planung von Kalkungsmaßnahmen im Westharz. 7. Tagung der Sektion Forstl. Biometrie und Informatik, Dt. Verband Forstl. Forschungsanstalten, Lubljana, 122-136
- Jansen M., Chodak M., Saborowski J., Beese F. 2005. Erfassung von Humusmengen und -qualitäten in organischen Auflagen in Rein- und Mischbeständen von Buchen und Fichten unterschiedlichen Alters. Allg. Forst u. Jagdztg. 176, 176-186
- Jansen M., Döring C., Ahrends B., Meesenburg H., Meiwes K.-J., Beese F. 2007. Kopplung dynamischer Modelle für die Bodenschutzkalkung im Wald. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 110, 483-484.
- Kahn M. 1994. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstl. Forsch.ber. München 141, 201 S.
- Kändler G., Riemer, U. 2005. Der Zusammenhang zwischen Wuchsleistung und Standort bei Fichte, Tanne und Buche auf den wichtigsten Standortseinheiten des Südschwarzwaldes. In: Teuffel K. v., Baumgarten M., Hanewinkel M., Konold W., Sauter U.H., Spiecker H., Wilpert K. v. (Hrsg.) Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Berlin-Heidelberg, 57-84
- Keuler 2006. Climate simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. CERA-DB "CLM_C20_1_D2" http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact. jsp?acronym=CLM_C20_1_D2
- Knoke T., Beinhofer B., Stang S. 2008. Moderne Hilfsmittel für die Waldbewertung. Vortrag auf der 24. SVK-Tagung für Sachverst. in der Sparte Forstwirtschaft am 7.-8. März 2008 in Künzell bei Fulda
- Koenker R. 2007. quantreg. Quantile Regression. R package version 4.06. http://www.r-project.org
- Kölling C. 2007. Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. AFZ/DerWald 62, 1242-1245
- König A.1996. Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Diss. Forstwiss. Fak. Univ. München, Frankfurt a. M., 194 S.
- Kouba J. 2002. Das Leben des Waldes und seine Lebensunsicherheit. Forstwiss. Cbl. 121, 211-228
- Krott M., Suda M. 2007. Macht Wissenschaft Politik? Erfahrungen aus der wissenschaftlichen Politikberatung im Politikfeld Wald und Umwelt. Wiesbaden, 251 S.
- Le Goff N., Ottorini J.-M. 2001. Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in North-East France. Ann. For. Sci. 58, 1-13
- Leckebusch G.C., Ulbrich U., Fröhlich L., P.J.G. 2007. Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. Geophys. Res. Lett. 34, L05703.
- Li S.-M., Saborowski J., Nieschulze J., Li Z.-Y., Lu Y.-C., Chen E.-X. 2007. Web service based spatial forest information system using an open source software approach. J. Forest Res. 18, 85-90
- Lindner M. 1999. Klimaeinflüsse auf Wachstum und Verbreitung von Waldbäumen. AFZ/DerWald 54, 561-564
- Lüpke, B. v. 2004. Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. Forstarchiv 75, 43-50
- Lüpke, B. v., Kuhr M. 2001. Grobwurzelausbildung der Fichte (*Picea abies* L. Karst.) in Abhängigkeit von Alter, Bodenart, sozialer Stellung und Bestandesstruktur. Forstarchiv 72, 55-62
- Maherali H., Pockman W.T., Jackson R.B. 2004. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. Ecology 85, 2184-

- 2199
- Mäkinen H., Nöjd P., Mielikäinen K. 2000. Climatic signal in annual growth variation of Norway spruce (*Picea abies*) along a transect from central Finland to the Arctic timberline. Can. J. For. Res. 30, 769-777
- Mäkinen H., Nöjd P., Mielikäinen K. 2001. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in southern Finland. Trees 15, 177-185
- Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., Mielikäinen K., Röhle H., Spiecker H. 2003. Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* L. Karst. in central and northern Europe. Trees - Structure and Function 17, 173-184
- Malessa V., Ahrends B. 2001. Algorithmus der Silikatverwitterungsrate durch Implementierung des Modells "Profile" von Sverdrup u. Warfinge in das Verfahren AcidProgress. Arbeitshefte Boden 2, 144-155
- Martel Y.A., Paul E.A. 1974. The use of radiocarbon dating of organic matter in the study of soil genesis. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38, 501-506
- Martinson L., Alveteg M., Kronnäs V., Sverdrup H., Westling O., Warfvinge P. 2005. A regional perspective on present and future soil chemistry at 16 swedish forest sites. Water Air Soil Pollut. 162, 89-105
- Mayer F.-J. 2004. Deutliche Blattverluste bei Eiche und Buche. LWF-aktuell $43,\,9\text{-}10$
- Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.-C. 2007. Global Climate Projections. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Eds.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Mehtätalo L., 2004. A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. Can. J. For. Res. 34, 131-140
- Millar C.I., Stephenson N.L., Stephens S.L. 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. Ecol. Appl. 17, 2145-2151
- Möhring B. 1986. Dynamische Betriebsklassensimulation Ein Hilfsmittel für die Waldschadensbewertung und Entscheidungsfindung im Forstbetrieb. Ber. Forsch.zent. Waldökosyst. Univ. Göttingen 20, 268 S.
- Mosandel R., Felbermeier B. 1999. Aus dem Weg zum naturnahen Wald. AFZ/Wald 54, 910-914
- Mosandl R., Felbermeier B. 2003. Ein Zukunftsorientiertes forstliches EntscheidungsUnterstützungsSystem (ZEUS). LWF aktuell 41, 13-14
- Mues V., Jansen M., Sloboda B., Radler K., Saborowski J. 2002. Regionalization of climatic elements in Lower Saxony. In: Jansen et al. (Hrsg.) Spatial modelling in forest ecology and management. Berlin Heidelberg New York, 41-67
- Müller J. 2006. The effect of dryness on the water balance of selected forest sites and the ascertainment of a potential risk of dryness. Schr. Forstl. Fak. Gött. Niedersächs. forstl. Vers.anst. 142, 142-148
- Müller J., Bolte A., Beck W., Anders S. 1998. Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). Verhandl. d. Ges. f. Ökologie 28, 407-414
- Nagel H.-D., Gregor H.-D. 1999. Ökologische Belastungsgrenzen Critical Loads u. Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Berlin, 259 S.
- Nagel J. 1999. Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Schr. Forstl. Fak. Gött. Niedersächs. Forstl. Vers.anst. 128. Frankfurt a. M., 122 S.
- Nagel J., Albert M.U., Schmidt M. 2002. Das waldbauliche Prognose und Entscheidungsmodell BWIN-Pro 6.1. Forst u. Holz 57, 486-493
- Nakićenović N., Swart R. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Nakićenović N., Swart R. (Eds.) A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, 599 pp
- Ostwald M. 2002. GIS-based support tool system for decision-making regarding local forest protection: illustrations from Orissa, India. Environm. Manage. 30, 35-45
- Panferov O., Sogachev A., Radler K., Olchev A., Gravenhorst G. 2007.
 Modelling of windthrow effects and feedbacks. In: ECEM (Hrsg.)
 Proceedings of the 6th European Conference on Ecological Modelling.
 Trieste, 393-394
- Paoletti E., Bytnerowicz A., Andersen C., Augustaitis A., Ferretti M., Grulke

- N., Günthardt-Goerg M.S., Innes J., Johnson D., Karnosky D., Luangjame J., Matyssek R., McNulty S., Müller-Starck G., Musselman R., Percy, K. 2007. Impacts of air pollution and climate change on forest ecosystems – emerging research needs. The Scientific World Journal 7(S1), 1-8
- Parker W.C., Colombo S.J., Cherry M.L., Flannigan M D., Greifenhagen S., McAlpine R.S., Papadopol C., Scarr T. 2000. Third millennium forestry: what climate change might mean to forests and forest management in Ontario. For. Chron. 76, 445-463
- Pennanen J., Kuuluvainen T. 2002. A spatial simulation approach to natural forest landscape dynamics in boreal Fennoscandia. For. Ecol. Manage. 164, 157-175
- Posch M., Hettelingh J.-P., Slootweg J. 2003. Manual for dynamic modelling of soil response to atmospheric deposition. RIVM Report 259101012. Bilthoven, The Netherlands, 69 S.
- Pregitzer K., Loya W., Kubiske M., Zak D. 2006. Soil respiration in northern forests exposed to elevated atmospheric carbon dioxide and ozone. Oecologia 148, 503-516
- Pretzsch H., Dursky J. 2002. Growth reaction of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and European beech (*Fagus silvatica* L.) to possible climatic changes in Germany. A sensitivity study. Forstwiss. Cbl. 121, 145-154
- Pretzsch H., Lindner M., Suda M. 2002. German forest sector under global change. Forstwiss. Cbl. 121, 208 S.
- Prietzel J., Stetter U., Klemmt H.-J., Rehfuess K.E. 2006. Recent carbon and nitrogen accumulation and acidification in soils of two Scots pine ecosystems in Southern Germany. Plant Soil 289, 153-170
- Puhe J., Ulrich B. 2001. Global climate change and human impacts on forest ecosystems. Ecol. Stud. 143. Berlin, 592 S.
- R Development Core Team 2006. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org
- Raspe S., Grimmeisen W., Schultze B. 2004a. Der Sommer 2003 grub dem Wald das Wasser ab. LWF aktuell 43, 4-6
- Raspe S., Schulz C., Kroll F. 2004b. Wenn im Sommer schon tonnenweise Blätter fallen. LWF aktuell 43, 11-13
- Rauscher H.M. 1999. Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: A review. For. Ecol. Manage. 114, 173-197
- Ray D., Broome A., 2003. Ecological site classification supporting decisions from the stand to the landscape scale. Forest Research, Annual Report and Accounts 2001-2002, 40-49
- Redde N. 2002. Risiko von Sturm und Folgeschäden in Abhängigkeit vom Standort und von waldbaulichen Eingriffen bei der Umwandlung von Fichtenreinbeständen. Ber. Forsch.zent. Waldökosyst. Univ. Göttingen, Reihe A, Band 179, 196 S.
- Rehfuess K.E. 1999. Waldökosysteme. In: Bayrischer Klimaforschungsverbund (Hrsg.) Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen, 50,71
- Reynolds K.M. 2005. Integrated decision support for sustainable forest management in the United States: Fact or fiction? Comput. Electron. Agr. 49, 6-23
- Rigling A., Dobbertin M., Bürgi M., Feldmeier-Christe E., Gimmi U., Ginzler C., Graf U., Mayer P., Zweifel R., Wohlgemuth T. 2006. Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. Forum für Wissen, 23-33.
- Rinner C. 2003. Web-based spatial decision support: status and research directions. J. Geogr. Inform. Decis. Anal. 7, 14-31
- Roeckner E., Brasseur G.P., Giorette M., Jacob D., Jungclaus J., Reick C., Sillmann J. 2006a. In: Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hrsg.) Klimaprojektionen für das 21 Jahrhundert. Hamburg, 29 S.
- Roeckner E., Stier P., Feichter J., Kloster S., Esch M., Fischer-Bruns I. 2006b. Impact of carbonaceous aerosol emissions on regional climate change. Clim. Dyn. 27, 553-571
- Röhle H. 1995. Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Mitt. Staatsforstverwalt. Bayerns 48, 272 S.
- Rumpel C., Kögel-Knaber I., Bruhn F. 2002. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. Org. Geochem. 33, 1131-1142
- Sanderson M.G., Collins W.J., Johnson C.E., Derwent R.G. 2006. Present and future acid deposition to ecosystems: The effect of climate change. Atmos. Environ. 40, 1275-1283
- Sanderson M.G., Collins W.J., Hemming D.L., Betts R.A. 2007. Stomatal conductance changes due to increasing carbon dioxide levels: Projected impact on surface ozone levels. Tellus 59B, 404-411
- Schadauer K. 1999. Oberhöhenbonität und Standort der Fichte nach Daten

- der Österreichischen Forstinventur. Mitt. Forstl. Bundes-Vers.anst. Wien 171, 135 S.
- Schadauer K. 2006. Wie wirkt das Klima auf das Wachstum von Fichtenbeständen. BFW-Praxisinformation 10, 18-20
- Schär C., Vidale P.L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427, 6972, 332-336
- Schelhaas M.J., Nabuurs G.J., Schuck A. 2003. Natural disturbance in the European forests in the 19th and 20th centuries. Glob. Chang. Biol. 9, 1620-1633
- Schmidt M. 2008. Ein longitudinales Durchmesser-Höhenmodell für Fichte in Nordwestdeutschland. In: DVFFA, Sektion Ertragskunde (Hrsg.) Jahrestagung des DVFFA, Sektion Ertragskunde, Trippstadt
- Schöning, I., Kögel-Knaber I. 2006. I. Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. Soil Biol. Biochem. 38, 2411-2424
- Schönwiese C.D., Staeger T., Steiner H., Brinckmann S. 2005. Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. In: Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt a.M. (Hrsg.) INKLIM (Hrsg.) Abschlussbericht INKLIM 20012. Frankfurt a.M., 63 S.
- Schöpp W., Posch M., Mylona S., Johansson M. 2003. Long-term development of acid deposition 1880-2030 in sensitive freshwater regions in Europe. Hydrol. Earth Syst. Sci. 7, 436-446
- Schowalter T.D. 1996. Insect Ecology. An Ecosystem Approach. San Diego, 482 S.
- Schwerdtfeger F. 1968. Ökologie der Tiere. Bd. 2: Demökologie. Hamburg, 448 S
- Schwerdtfeger F. 1981. Die Waldkrankheiten. Hamburg, 486 S.
- Seidling W. 2007. Signals of summer drought in crown condition data from the German Level I network. Eur. J. For. Res. 1264, 529-544
- Shim J. P., Warkentin M., Courtney J. F., Power D. J., Sharda R., Carlsson C. 2002. Past, present, and future of decision support technology. Decis. Support Syst. 33, 111-126
- Sogachev A., Panferov O. 2006. Modification of two-equation models to account for plant drag. Boundary-Layer Meteorology 121, 229–266
- Solomon S., Qin D., Manning M., Alley R.B, Berntsen T., Bindoff N.L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J.M., Hegerl G.C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B.J., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville R., Stocker T.F., Whetton P., Wood R.A., Wratt D. 2007. Technical Summary. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, 21 pp

- Spellmann H., Sutmöller J., Meesenburg H. 2007. Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. AFZ/DerWald 62, 1246-1249
- Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J.P. 1996. Growth Trends in European Forests. European Forest Institute Research Report No. 5, Berlin Heidelberg, 368 S.
- Spittlehouse, D.L., Stewart, R.B. 2003. Adaptation to climate change in forest management. BC J. Ecosys. Managem. 41, 1-11
- Spranger T., Lorenz K., Gregor H.-D. 2004. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, Risks and trends. Texte Umweltbundesamt, Federal Environmental Agency Umweltbundesamt. Berlin, 266 S.
- Sterba H. 1995. Forest decline and increasing increments: a simulation study. Forestry 68, 153-163
- Sterba H., Moser M., Monserud R. 1995. Prognaus Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände. Österr. Forstztg. 182, 19-20
- Sverdrup H., Warfvinge H.-D. 1995. Estimating field weathering rates using laboratory kinetics. In: White A.F., Brantly S.L. (Eds.) Chemical Weathering of Silicate Minerals 31. Mineralogical Society of America. Washingston, DC, 485-541
- Teepe R., Dilling H., Beese F. 2003. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, 111-119
- Thomasius H. 1991. Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa. Forstwiss. Cbl. 110, 305-330
- UN/ECE 2004. Handbook for the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols. UN, New York, Geneva, 341
- Vacik H., Lexer M. J. 2001. Application of a spatial decision support system in managing the protection forests of Vienna for sustained yield of water resources. For. Ecol. Manage. 143, 65-76
- Varma V.K., Ferguson I., Wild I. 2000. Decision support system for the sustainable forest management. For. Ecol. Manage. 128, 49-55
- Wagner S. 2004. Klimawandel einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. Forst u. Holz 59, 394-398
- Wagner, S. 2008. Klimawandel Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. Tagungsband "Waldmanagement im Klimastress Anpassungsstrategien im nordostdeutschen Tiefland". Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, im Druck
- Wallman P., Svensson M.G.E., Sverdrup H., Belyazid S. 2005. ForSAFE an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments. For. Ecol. Manage. 207, 19-36
- Wolff B., Riek W. 1999. Deutscher Waldbodenbericht 1996. 2. Aufl., Bundesm. Ernähr., Landw. Forsten, Bonn, 142 S.
- Wykoff W.R., Crookston N.L., Stage A.R. 1982. User's guide to the stand prognosis model. U.S. For. Serv., Gen. Techn. Rep. INT-133, 112 pp