

Der Einfluss klimabedingt veränderter Bestandesstruktur auf die Temperatur- und Verdunstungsverhältnisse in der Dübener Heide/Sachsen

The effect of climatic changed stand structure on temperature and evaporation conditions in the Duebener Heide/Saxony

Björn Fischer, Valeri Goldberg, Christian Bernhofer

Abstract

From the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) an expected air temperature increase between 2.5°C and 3.5°C is given for the 21st Century in Central Europe. At the local level (Saxony) also a change in precipitation regimes is expected. Slightly increasing winter and clearly decreasing summer precipitation lead to a reduction of the available ground water in the growing season. These changes lead to a change in the canopy climate, which affects the canopy itself. To investigate this feedback between the forest microclimate and canopy structure development is the major objective of this study.

For that, simulations with the vegetation-atmosphere boundary layer model HIRVAC are used to quantify the variability of the forest climate. As input for the model investigations changing canopies for the actual state and for the IPCC scenarios B1 and A2 and for different age categories from the forest growth simulator BALANCE were used. The results show very well the interaction between changing external climate conditions, a variable stand structure, and the variability of the forest microclimate. With the assumption the mean summer temperature will increase, and the summer precipitation will be reduced in the future, an intensification of the temperature extremes in the canopy can be expected. But otherwise a maximum damping effect of crown temperature of a possible forest between 5.4°C and 6.2°C could be simulated with HIRVAC depending on the considered climate scenario. Therefore, the forest planning is a possible instrument to control the climate conditions of the forests in the future.

Keywords: canopy climate, climate scenario, boundary layer model

Zusammenfassung

In den Untersuchungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wird für das 21. Jahrhundert in Mitteleuropa von einem Temperaturanstieg zwischen 2,5°C und 3,5°C ausgegangen. Auf der lokalen Ebene (Sachsen) wird ebenfalls eine Veränderung des Niederschlagsregimes erwartet. Leicht zunehmende Winter- und abnehmende Sommerniederschläge führen zu einer Reduzierung des verfü-

baren Bodenwassers in der Vegetationsperiode. Diese Veränderungen führen zu einer Veränderung des Bestandes-Innenklimas, das wiederum von den Beständen selbst beeinflusst wird. Diese Abschätzung der Bedeutung der Rückkopplung zwischen dem Mikroklima und der Bestandeseentwicklung ist dabei eine wesentliche Herausforderung.

In dieser Studie wird mit Hilfe modellgestützter Untersuchungen (Vegetations-Atmosphären Grenzschichtmodell HIRVAC) die Variabilität des Bestandes-Innenklimas quantifiziert. Hierbei wurden Modellbestände für den Ist-Zustand und für die IPCC Szenarien B1 und A2 sowie für unterschiedliche Altersklassen als Output des Waldwachstumsmodells BALANCE herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, wie sich unter diesen Voraussetzungen das Bestandes-Innenklima und dessen Variabilität verändert. So kann unter der Annahme der Erhöhung der mittleren Sommertemperaturen und einer Reduzierung des Niederschlags von einer Verschärfung der Extreme von Luft- und Vegetationsoberflächentemperaturen in den Beständen ausgegangen werden. Durch Optimierung der Bestandesstruktur konnten jedoch maximale Dämpfungsraten der Temperaturen im Kronenbereich zwischen 5,4°C und 6,2°C in Abhängigkeit der betrachteten Klimaszenarien mit HIRVAC berechnet werden. Damit stellt der Waldbau möglicherweise ein wichtiges Instrument zur Klimaregulierung innerhalb der Bestände der Zukunft dar.

Schlüsselwörter: Bestandes-Innenklima, Klimaszenarien, Atmosphärisches Grenzschichtmodell

1. Einleitung

Hintergrund

Die Änderung der klimatischen Randbedingungen ist eine wesentliche Antriebsgröße für die Szenarien der zukünftigen Waldentwicklung. In den aktuellen Ergebnissen des Berichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) wird für das 21. Jahrhundert in Mitteleuropa, basierend auf der Annahme realistischer Szenarien (konstantes Wirtschaftswachstum, global oder regional koordinierte moderate Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion), von einem wahrscheinlichen Temperaturanstieg zwischen 2,5°C und

3,5°C ausgegangen. Neben dem Anstieg der mittleren Temperatur zeigen die Klimaprojektionen für Mitteleuropa und speziell für Sachsen auch eine deutliche Veränderung des Niederschlagsregimes. So werden abnehmende Sommerniederschläge in Kombination mit höheren mittleren Temperaturen und höherer Sonneneinstrahlung zu einer deutlichen Abnahme des verfügbaren Bodenwassers und damit zu einer Verschlechterung der forstlichen Klimarandbedingungen führen (GOLDBERG et al. 2007, HÄNTZSCHEL et al. 2006).

Die Veränderung des Regionalklimas (Makroklima im forstlichen Sinn) im Zuge des globalen Wandels führt zu einer Veränderung des Bestandes-Innenklimas (Mikroklima), das wiederum von den Beständen selbst mitgeprägt wird. Diese Interaktion kann die Wachstumsbedingungen von Wäldern wesentlich beeinflussen: Wachstumsfaktoren wie Wasser, Einstrahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte, aber auch das Auftreten von Frost und Dürre, werden im Wald vom Bestandes-Innenklima bestimmt. Für seine Quantifizierung unter geänderten Randbedingungen (Regionalklima, Bestandesstruktur, Bodenwasserhaushalt, Säure- und N-Belastung, etc.) werden rückkoppelnde Modelle eingesetzt, die die Wechselwirkung des Bestandes-Innenklimas mit der Bestandesstruktur physikalisch sinnvoll beschreiben.

Stand der Forschung

Das Mikroklima (Bestandes-Innenklima) wird sowohl durch das Gelände, den Bestand, seinem Strahlungs-, Wasser- und Nährstoffhaushalt als auch durch das Regionalklima (Makroklima) bestimmt. So unterliegen z. B. die Einstrahlung und die Wasserversorgung einer starken Beeinflussung durch die Verteilung der Biomasse im Bestand, das heißt, sie sind abhängig von der Bestandesstruktur, ausgedrückt etwa durch den Blattflächenindex (LAI: Blattfläche pro Bodenfläche) und den Überschirmungsgrad. Die Abbildung dieser Wechselwirkungen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre wird häufig durch sogenannte SVAT-Modelle (Soil-Vegetation-Atmosphäre-Transfer) vorgenommen (z. B. SELLERS et al. 1996). Diese Modelle enthalten zumeist einen ein- oder zweischichtigen so genannten Bigleaf-Ansatz (z. B. MURPHY UND LORENZ 1985), welcher keine differenzierte Betrachtung der existierenden vertikalen Bestandesstruktur erlaubt. Eine räumlich differenziertere Betrachtung wird durch Waldwachstumsmodelle ermöglicht, die eine bessere vertikale Struktur (RYEL 1993) und eine Beschreibung der Strahlungsinterzeption unter Berücksichtigung differenzierter physiologischer Eigenschaften von Einzelpflanzen (FALGE et al. 1997) aufweisen. Zur Untersuchung der Interaktion hoher Bestände mit der Atmosphäre wurden vertikal hoch aufgelöste atmosphärische Grenzschichtmodelle mit Vegetationsmodulen erweitert (GOLDBERG UND BERNHOFER 2008; ZENG et al. 2003). Modelle dieser Art lösen die prognostischen Gleichungen für Impuls, Wärme und Feuchte in der Atmosphäre und für mehrere Schichten des Bestandes. Für die Übertragung von Parametrisierungen auf andere Bestände und für Szenarienrechnungen ist dabei eine möglichst prozessnahe Modellierung vom Energie- und Stofftransfer im System Boden-Vegetation-Atmosphäre grundlegend (MENZEL 1997; RAUPACH

1998; GOLDBERG UND BERNHOFER 2001; WULLSCHLEGER 2002). Konsequenzen, die sich aus der Wechselwirkung von Bestandesstruktur, mikroklimatischen Prozessen im Bestand und geänderten klimatischen Rahmenbedingungen u. a. für den Waldbau ergeben, lassen sich daher nur unter Verwendung von rückkoppelnden Modellen abschätzen (BERNHOFER et al. 2001).

Ziele der Studie

Die in der vorliegenden Studie präsentierten Ergebnisse basieren auf modellgestützten Untersuchungen zur Wechselwirkung einer dynamischen, von der regionalen Klimaänderung beeinflussten Bestandesentwicklung mit dem Bestandes-Innenklima. Diese Untersuchungen wurden mit dem Atmosphärenmodell HIRVAC (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler), (FISCHER et al. 2008, GOLDBERG UND BERNHOFER 2008) innerhalb eines Teilprojektes der Professur für Meteorologie der TU Dresden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes ENFORCHANGE (www.enforchange.de) durchgeführt. Das wesentliche Ziel dieses Forschungsteilprojektes bestand darin, die lokale Klimawirkung auf die Standortsdrift vor dem Hintergrund eines geänderten großräumigen Klimas zu bewerten. Die erzielten Modellergebnisse dienen als Basis, klimatisch angepasste Bestandstypen abzuleiten, die den transienten Charakter der Klimaentwicklung des 21. Jahrhunderts berücksichtigen.

Es galt die entscheidende Frage zu beantworten: Welche Relevanz haben rezente und künftige regionalspezifische Klimaänderungen für die Forstwirtschaft unter Berücksichtigung der klimatischen Variabilität, und ist es möglich, durch gezielte Eingriffe in die Bestandesstruktur eine projizierte ungünstige Veränderung der Klimarandbedingungen teilweise oder ganz zu kompensieren? Als Beispiel für die regionalspezifischen Klimaänderungen seien die Veränderungen der Jahressummen der Niederschläge und der Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen von 1951–2006 für Wittenberg dargestellt (Abbildung 1). Es ist deutlich die Zunahme der Temperatur zu beobachten, die mit einer Reduzierung des Niederschlags einhergeht.

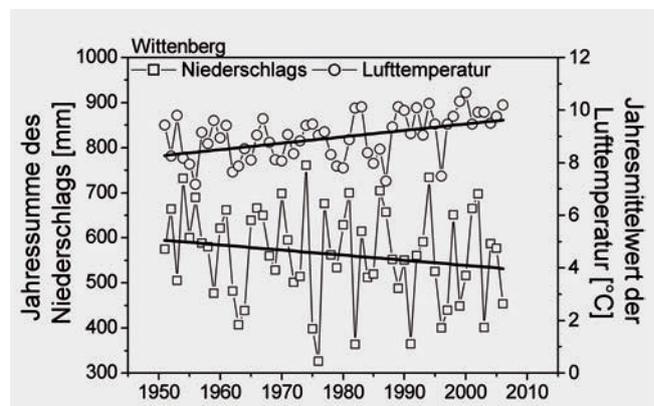


Abb. 1: Darstellung der Jahressummen der Niederschläge und der Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen mit den dazugehörigen Trends von 1951–2006 für Wittenberg.

Fig. 1: Description of the annual sum of precipitation and annual averages of air temperature with the corresponding trends from 1951–2006 for Wittenberg.

2. Material und Methoden

Bestandes-Innenklimamodell HIRVAC

Bei dem für die Modellierung des Bestandes-Innenklimas genutzten Modell HIRVAC handelt es sich um ein 1,5-dimensionales Atmosphärisches Grenzschichtmodell (das Modell verfügt nur über eine Vertikalkoordinate, aber horizontale Flüsse können vorgegeben werden) mit angekoppelten Modulen für den Bodenwasserhaushalt und die Vegetation (Abb. 2, FISCHER et al. 2008, GOLDBERG UND BERNHOFER 2008). Das Modell hat in der Standardversion eine Auflösung von 120 Schichten und löst die prognostischen Gleichungen für Impuls, Temperatur und Feuchte in 15-Minuten-Zeitschritten. Das Modell HIRVAC kann mit selbst generierten Daten, aber auch mit Messwerten betrieben werden. Als meteorologische Eingangsdaten werden Globalstrahlung, Atmosphärische Gegenstrahlung, Bodentemperatur in 90 cm Tiefe, Niederschlag und die CO₂-Konzentration genutzt. Das Bodenmodul wurde vom Wasserhaushaltsmodell BROOK90 abgeleitet und wird in maximal fünfzehn Schichten unterteilt (BAUMS et al. 2005).

Die Vegetation wird durch zusätzliche Quell- und Senkterme in den Grundgleichungen des Modells berücksichtigt. Diese Terme werden mit Vegetationsparametern (Kronenschlussgrad, Blattflächendichte, Formwiderstand) parametri-

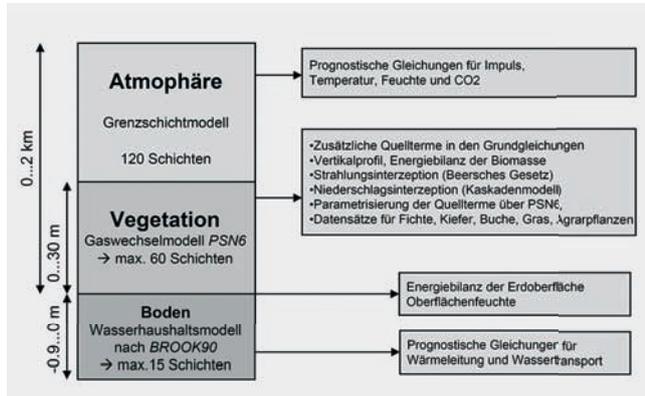


Abb. 2: Schematische Darstellung der Hauptmodule im Modell HIRVAC.

Fig. 2: Schematic description of the main modules in the model HIRVAC.

Bestandesdaten

Im Rahmen der Kooperation innerhalb des Verbundprojektes Enforchange wurden auf Basis des Waldwachstumsmodells BALANCE (TU München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, GROTE UND PRETZSCH 2002; RÖTZER et al. 2009; vgl. Artikel MOSHAMMER et al.) vier Modellbestände der Dübener Heide, anhand von Standortkartierungen, abgeleitet und für die Bestandes-Innenklimasimulationen im Modell HIRVAC zur Verfügung gestellt. Diese Modellbestände besitzen die statistischen Eigenschaften der Originalbestände aus dem Untersuchungsgebiet. Hierbei handelte es sich um Buchenbestände der Altersklassen 30–50, 65–85, 95–115 und 115–

siert und hängen von den Impuls-, Temperatur- und Feuchtegradienten zwischen Vegetationsoberfläche und der Atmosphäre sowie den stomatären und Grenzschichtleitwerten auf der Vegetationsoberfläche ab. Diese Leitwerte werden durch das mechanistische Photosynthesemodell PSN6 (Universität Bayreuth, FALGE et al. 1996) für unterschiedliche Vegetationstypen berechnet. Das Modell PSN6 ist mit dem Grenzschichtmodell gekoppelt, und zu jedem Zeitschritt und für jede Modellschicht im Vegetationsraum erfolgt ein kontinuierlicher Austausch von stomatärem und Grenzschichtwiderstand (Vegetation-Atmosphäre) bzw. Lufttemperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) und CO₂-Konzentration (Vegetation-Atmosphäre, Abb. 3). Eine weitere Kopplung erfolgt zwischen Boden und Vegetation über die Bodensaugspannung. Die Bodenwasserverfügbarkeit steuert gemeinsam mit Luftfeuchte und Lufttemperatur die physiologische Regulierung der Pflanzentranspiration im Modell PSN6 bei Trockenheit (Abb. 3, unten). Wichtige Outputgrößen von HIRVAC sind Vertikalprofile der Boden-, Luft- und Vegetationsoberflächentemperatur sowie der Boden- und Luftfeuchte, der kurz- und langwelligen Strahlungskomponenten, der Windgeschwindigkeit und der CO₂-Konzentration der Luft. Derzeit kann mit HIRVAC das Bestandes-Innenklima für Fichten-, Kiefern-, Buchen- und Grasbestände sowie verschiedene Agrarkulturen simuliert werden.

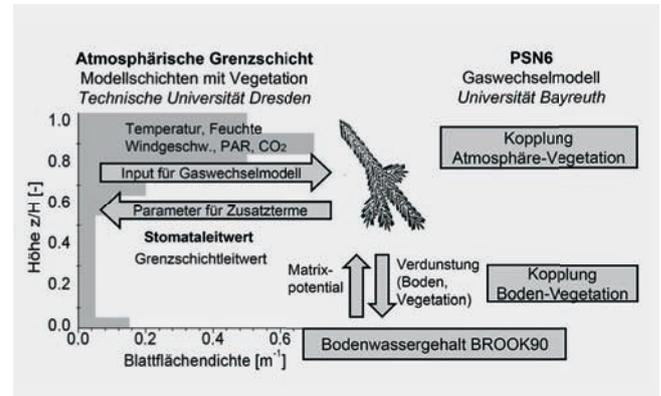


Abb. 3: Schema der Kopplung von Vegetation, Atmosphäre und Boden in HIRVAC.

Fig. 3: Scheme of the coupling of vegetation, atmosphere and soil in HIRVAC.

135 Jahre, die anhand von Bestandeskartierungen des Untersuchungsgebietes erstellt wurden. Die Ausdehnung der Modellbestände beträgt, je nach Baumanzahl, ca. 23×23 m² bis ca. 80×80 m² (modellbedingt). Für die Modellierung der Variabilität des Bestandes-Innenklimas wurden die Bestände in gleichgroße Teilflächen mit Kantenlängen zwischen 12 m und 16 m untergliedert. Für diese Areale erfolgte die jeweilige Parametrisierung der Vegetation in HIRVAC in Abhängigkeit der Vegetationsangaben der vom Modell BALANCE gelieferten Einzelbäume.

Die Abbildungen 4a bis 4d zeigen die horizontale Variabilität

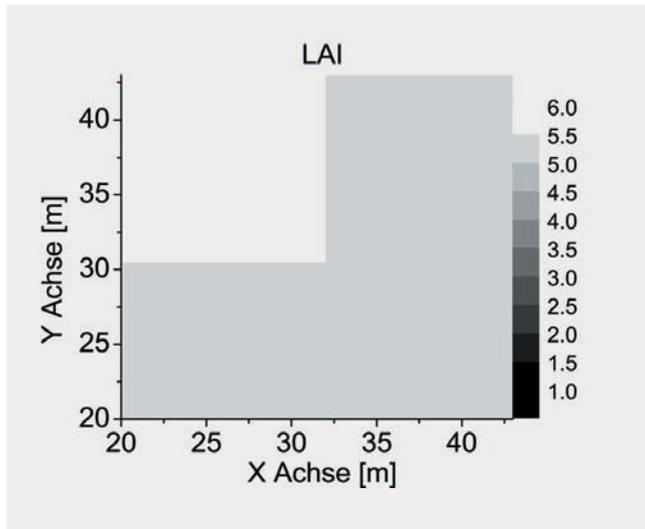


Abb. 4a: Horizontale Variabilität des LAI eines Modellbuchenbestandes (39 Jahre) für den Klima-Ist-Zustand auf Basis der Ergebnisse des Waldwachstumsmodells BALANCE.

Fig. 4a: Horizontal variability of the LAI of a model beech canopy (39 years) for the climatic-actual-state on the base of the results of the forest growth model BALANCE.

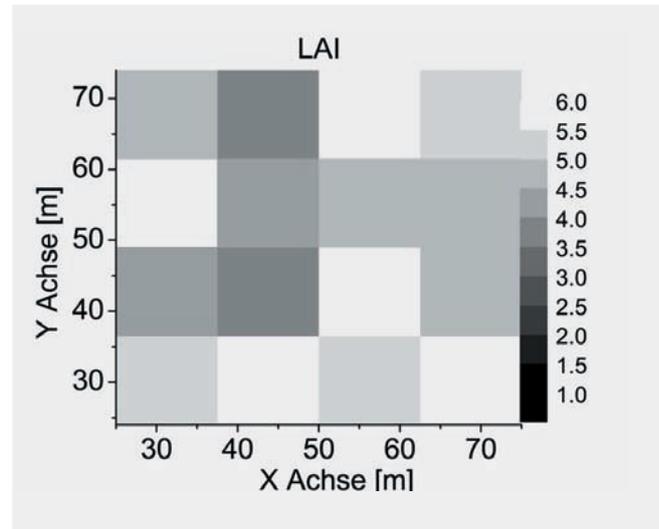


Abb. 4b: Horizontale Variabilität des LAI eines Modellbuchenbestandes (74 Jahre) für den Klima-Ist-Zustand auf Basis der Ergebnisse des Waldwachstumsmodells BALANCE.

Fig. 4b: Horizontal variability of the LAI of a model beech canopy (74 years) for the climatic-actual-state on the base of the results of the forest growth model BALANCE.

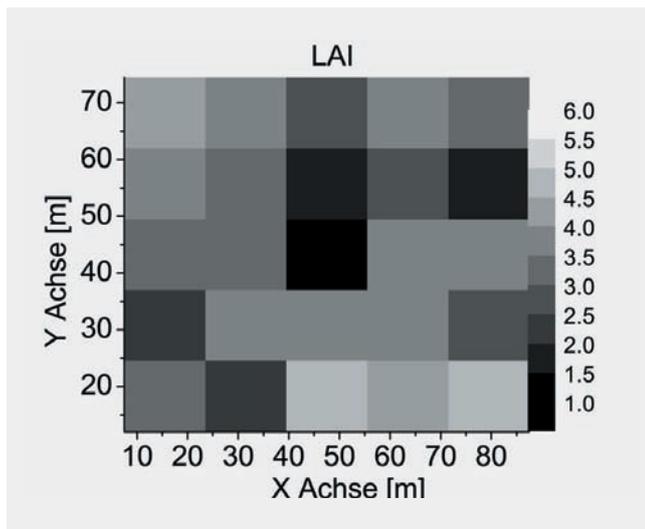


Abb. 4c: Horizontale Variabilität des LAI eines Modellbuchenbestandes (104 Jahre) für den Klima-Ist-Zustand auf Basis der Ergebnisse des Waldwachstumsmodells BALANCE.

Fig. 4c: Horizontal variability of the LAI of a model beech canopy (104 years) for the climatic-actual-state on the base of the results of the forest growth model BALANCE.

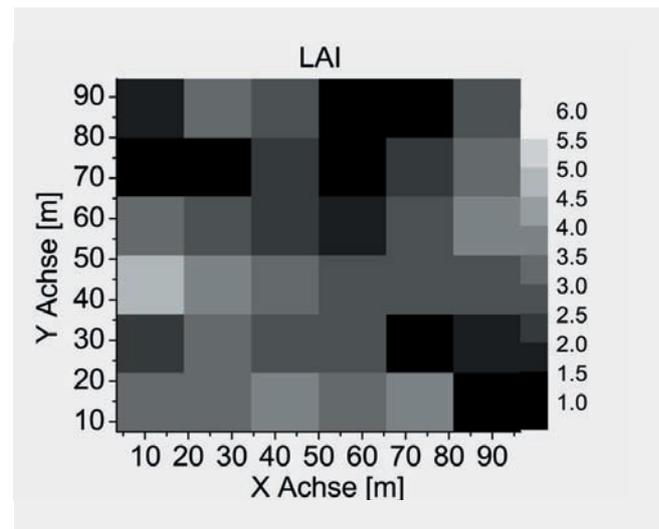


Abb. 4d: Horizontale Variabilität des LAI eines Modellbuchenbestandes (124 Jahre) für den Klima-Ist-Zustand auf Basis der Ergebnisse des Waldwachstumsmodells BALANCE.

Fig. 4d: Horizontal variability of the LAI of a model beech canopy (124 years) for the climatic-actual-state on the base of the results of the forest growth model BALANCE.

des Blattflächenindex (LAI) in unterschiedlich alten Modellbuchenbeständen für die aktuellen Klimabedingungen, abgeleitet aus den Ergebnissen des Waldwachstumsmodells BALANCE. Die z. T. hohe Variabilität innerhalb des Bestandes begründet sich aus den in BALANCE inkludierten Konkurrenzbeziehungen (Einstrahlung, Wasser) zwischen den Einzelindividuen, die zur Dominanz, Unterdrückung und auch zum „Absterben“ von Modellbäumen führt. So befinden sich auf einigen Teilflächen dominierende Bäume (hoher LAI), während auf anderen Teilflächen bereits kleine Freiflächen durch die fehlende Vegetation entstanden sind.

Bewertungsmethode

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte mit statistischen Box-Plots, die Mittelwert, Median, die Perzentile P25, P75 und P95, sowie die minimalen und die maximalen Werte der jeweiligen Perioden darstellen (Abb. 5). Die Prozentangaben bezeichnen den Schwellwert für bestimmte kumulativ erreichte Teilmenge aller Daten. Bei 50% ist der Median der Datengesamtheit erreicht.

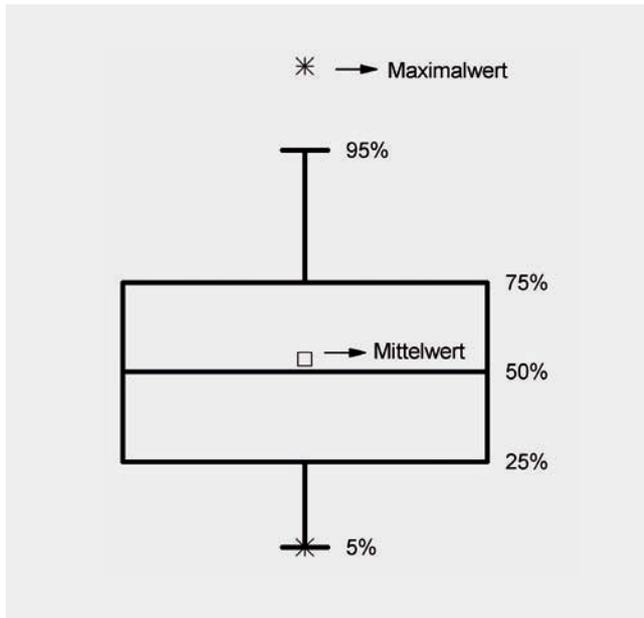
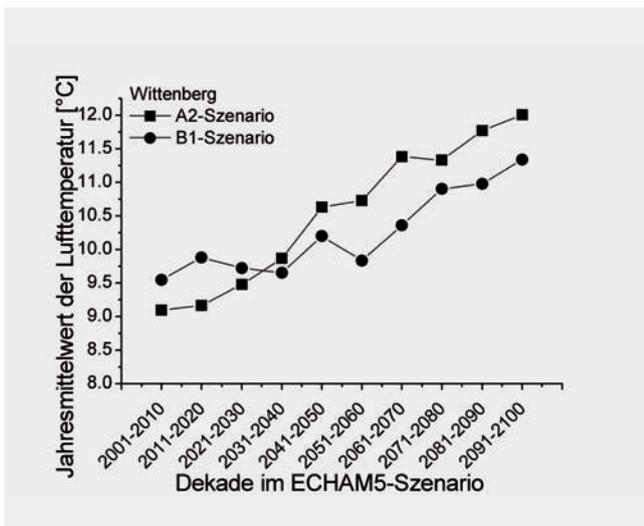


Abb. 5: Aufbau des in den Abb. 8–10 verwendeten Box-Plot-Typs.

Fig. 5: Structure of the used Box-plot-type in the figures 8–10.



3. Ergebnisse

Bestandesentwicklung in verschiedenen Klimaszenarien

Die Ableitung der Bestandesstrukturparameter im Modell HIRVAC, die für die Modellierung eines variablen Bestandes-Innenklimas notwendig waren, erfolgte auf Grundlage einer simulierten Bestandesentwicklung aus dem Modell BALANCE für den Klima-Ist-Zustand und die IPCC-Szenarien B1 (moderate Wirtschaftsentwicklung und Treibhausgasemission) und A2 (stärkere Wirtschaftsentwicklung und Treibhausgasemission – „business as usual“).

Die Abbildungen 6a und 6b zeigen beispielhaft die Entwicklung der Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen und der Jahressummen der Niederschläge in diesen beiden Klimaszenarien für die Station Wittenberg (ca. 20 km nordöstlich der Testflächen in der Dübener Heide) auf Basis von Modellrechnungen mit dem deutschen Klimamodell ECHAM5 (ROECKNER et al. 2003). In beiden Szenarien kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Temperatur bei gleichzeitigem Niederschlagsrückgang.

Dies führt zu unterschiedlichen Bestandesentwicklungen im Modell BALANCE. Die Abbildungen 7a und 7b zeigen beispielhaft die Entwicklung des mittleren Blattflächenindex (LAI) für einen jungen Buchenbestand (30–50 Jahre) und einen alten Buchenbestand (115–130 Jahre) in der Vegetationsperiode einer 20 Jahres-Simulation für die unterschiedlichen Szenarien (Ist-Zustand: 1981–2000, B1 und A2 Szenario: 2081–2100). Zum einen ist in den Ergebnissen eine Abnahme des LAI mit zunehmendem Bestandesalter zu erkennen. Einzelne Bäume im Bestand werden dominanter und erhöhen ihre Blattmasse, andere dagegen sterben im Laufe der Zeit ab. Mit Zunahme der Temperatur und Abnahme des Niederschlags bei den Klimaszenarien B1 und A2 reduziert sich der LAI. Dies ist auf eine Zunahme von Stressperioden während der Entwicklung zurückzuführen. Die statistische Signifikanz der Reduzierung des LAI in Abhängigkeit der Klimaszenarien gegenüber dem Ist-Zustand beträgt für diese Bestände über 90 %.

Abb. 6a: Entwicklung der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur für Wittenberg im 21. Jahrhundert in den Szenarien B1 und A2.

Fig. 6a: Trend of annual mean air temperature for Wittenberg in the 21st Century in the scenarios B1 and A2.

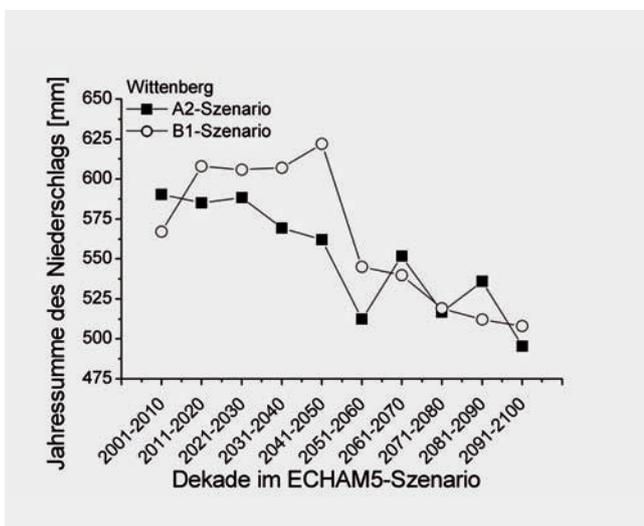


Abb. 6b: Entwicklung der Jahressummen des Niederschlags für Wittenberg im 21. Jahrhundert in den Szenarien B1 und A2.

Fig. 6b: Trend of annual sum of precipitation for Wittenberg in the 21st Century in the scenarios B1 and A2.

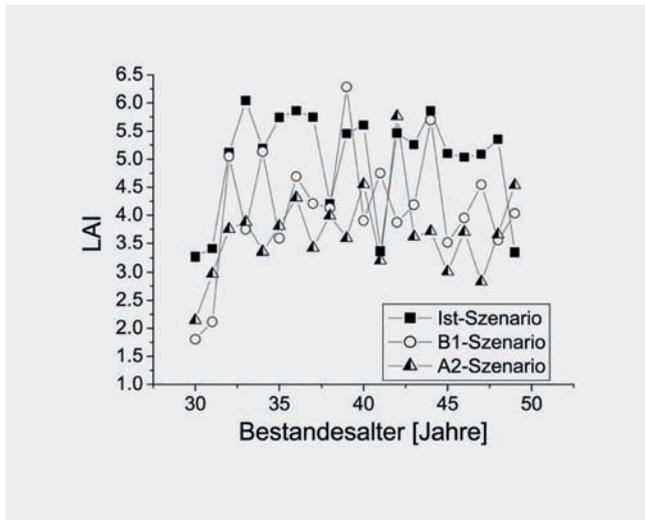


Abb. 7a: Entwicklung des mittleren LAI eines jungen Buchenbestandes (30–50 Jahre) für 3 Szenarien.

Fig. 7a: Development of the middle LAI of a young beech canopy (30–50 years) for 3 scenarios.

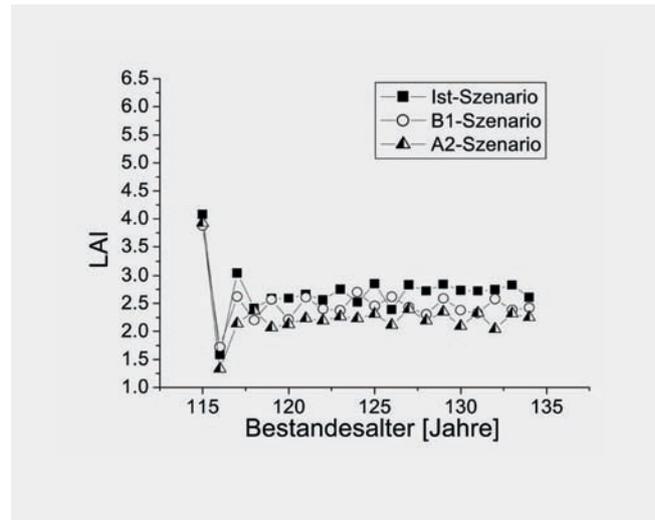


Abb. 7b: Entwicklung des mittleren LAI eines alten Buchenbestandes (115–130 Jahre) für 3 Szenarien.

Fig. 7b: Development of the middle LAI of a young beech canopy (115–130 years) for 3 scenarios.

Variabilität des Bestandes-Innenklimas für das Ist-Szenario in Abhängigkeit von der Bodensaugspannung

Die Bodensaugspannung ist eine zentrale Steuergröße für das Bestandes-Innenklima, da sie nachhaltig die Verdunstung und damit die Bestandestemperatur beeinflusst (FISCHER et al. 2008). Gleichzeitig weist die Bodensaugspannung natürlicherweise eine hohe Variabilität auf (feuchte und trockene Perioden) und ist deshalb gut geeignet, eine möglichst realistische Variabilität des Bestandes-Innenklimas zu simulieren. Für die HIRVAC-Modellrechnungen wurde die Bodensaugspannung in einem Intervall von 10 kPa (extrem feucht) bis 800 kPa (extrem trocken) variiert. Die benötigten Vegetationsparameter basierten auf einer mit dem Modell BALANCE simulierten 20-jährigen Bestandesentwicklung für das Ist-Szenario (Zeitraum 1981–2000). Alle Simulationen mit HIRVAC wurden für einen wolkenlosen Julitag durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die Tagessumme der Verdunstung und das tägliche Maximum der Vegetationsoberflächentemperatur bei variabler Bodensaugspannung (Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers) für das Ist-Szenario und die vier Modellbuchenbestände. Die Resultate verdeutlichen die Abhängigkeit der Verdunstung und der Vegetationsoberflächentemperatur von der Bodensaugspannung. Bis zu einer Saugspannung von 100 kPa (feuchter Boden) sind nur geringe Unterschiede bei den Modellergebnissen zu erkennen. Bei weiterer Absenkung der Bodensaugspannung kommt es zu einer kontinuierlichen Abnahme der Verdunstung. Bei einem Wert von 800 kPa (einem sehr trockenen Boden) liegt die Verdunstung bei weniger als 1 mm pro Tag. Die höchsten Verdunstungswerte werden beim Jungbestand modelliert, da dieser den höchsten Blattflächenindex aufweist (Abb. 4a–4d). Hier werden durchschnittlich 3,5 mm bis 4 mm pro Tag erzielt, während beim Altbestand die Tageswerte der Verdunstung auf ca. 2,5 mm bis 3 mm absinken. Die Temperatur weist ein entgegengesetztes Verhalten im Bezug auf die Verdunstung auf. Hier kommt es bei steigender Bodensaugspannung (sin-

kende Bodenwasserverfügbarkeit) zu einem Anstieg des täglichen Maximums der Vegetationsoberflächentemperatur. Durch das fehlende Wasser wird deutlich weniger Energie in Form von latenter Wärme abgeführt, was zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur und damit auch zu einer Erhöhung der Gesamttemperatur im Bestand führt. Die höchsten Mittelwerte der Vegetationsoberflächentemperaturen werden für einen Altbestand modelliert und erreichen bei feuchtem Boden ca. 28°C. Bei zunehmender Trockenheit steigen diese Temperaturen auf über 30°C an. Dies wird zum einen durch die lichte Struktur des Bestandes hervorgerufen, wodurch ein höherer Anteil der Strahlung in den Bestand eindringen kann und zu einer stärkeren Erwärmung führt (vergleiche FLEMMING 1982). Zum anderen wird aufgrund der geringeren Verdunstung weniger latente Wärme aus dem Bestand abgeführt. Die Variabilität der Verdunstung und der Temperatur während der Modellierungsperiode wird durch die Spannweite in den Box-Plots abgebildet. Die größten Unterschiede in der Verdunstung sind bei den jüngeren Beständen zu erkennen. Unter optimaler Wasserversorgung variieren die Werte bis zu 2,5 mm. Bei den Altbeständen liegen die Unterschiede dagegen nur bei ca. 0,5 mm. Diese abweichende Variabilität begründet sich in der unterschiedlich hohen Variabilität der Blattflächenindizes der Bestände. Der Jungbestand (Abb. 8, oben) weist in der 20-jährigen Simulationsperiode die höchsten Schwankungen im LAI auf. Mit zunehmendem Alter werden dagegen nur in extremen Jahren deutliche Abweichungen vom mittleren Blattflächenindex modelliert (vgl. Abb. 7a). Aus diesem Grund nimmt auch die Variation der Vegetationstemperatur mit zunehmendem Bestandesalter ab. Die Ausreißer bei den zwei älteren Beständen (Maximalwerte der Temperaturen, Abb. 8, unten) sind darauf zurückzuführen, dass in diesen Beständen im zweiten Jahr des Modellierungszeitraums ein deutlich geringerer LAI-Wert auftrat (vgl. Abb. 7b). Dies führt zu einer deutlich erhöhten Einstrahlung und damit einer stärkeren Erwärmung des Bestandes.

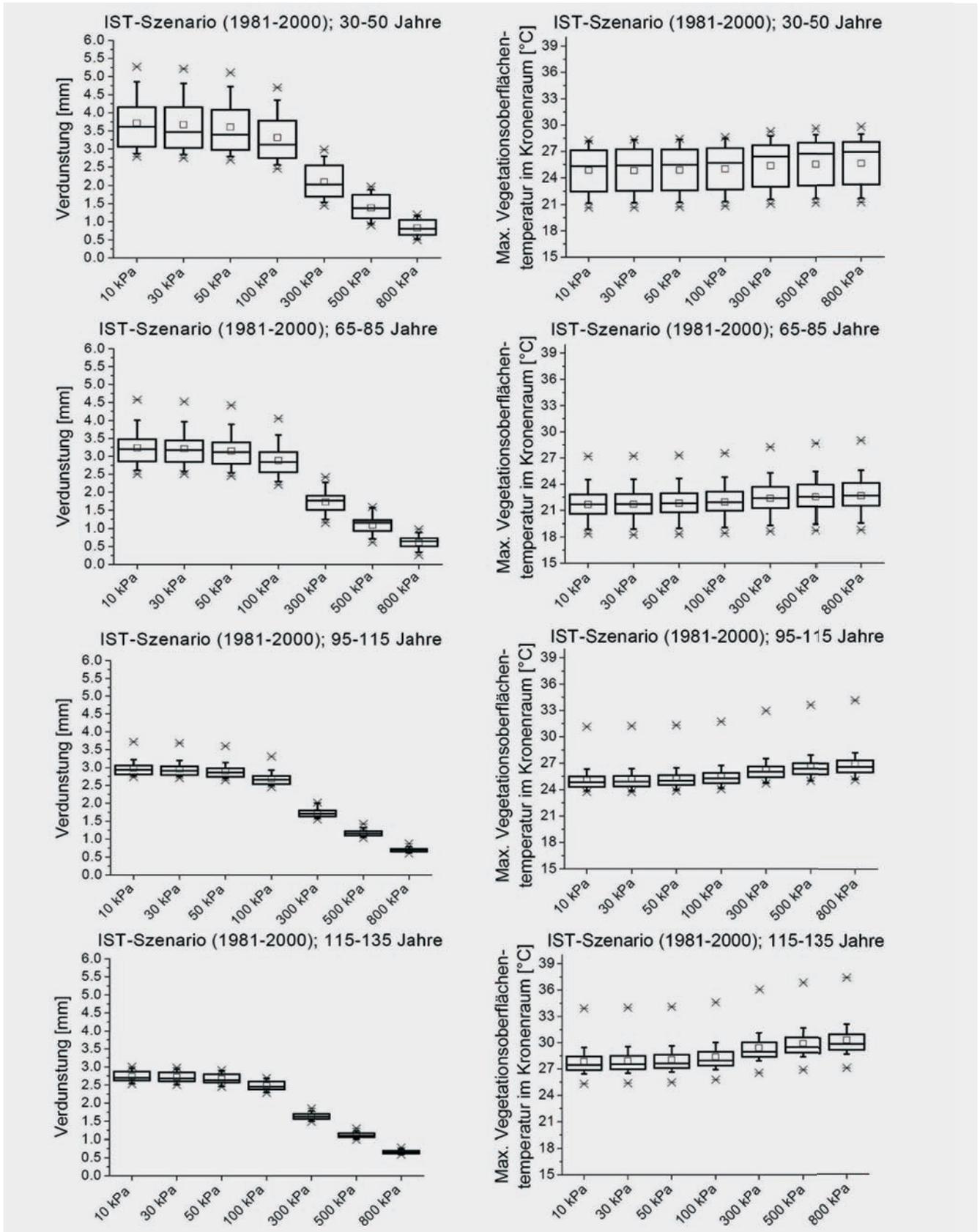


Abb. 8: HIRVAC-Simulation der Tagessumme der Verdunstung und das tägliche Maximum der Vegetationsoberflächentemperatur im Kronenraum für vier Buchenbestände mit der zu Grunde liegenden Anzahl der Werte (30–50 Jahre (N=80), 65–85 Jahre (N=320), 95–115 Jahre (N=500), 115–135 Jahre (N=720)) bei Variation der Bodensaugspannung. Darstellung des Mittelwertes, des Medians, der Perzentile P5, P25, P75, P95 sowie des minimalen und maximalen Wertes aus einer 20-jährigen Periode im Ist-Szenario (1981–2000).

Fig. 8: HIRVAC simulation of the daily sum of evaporation and the daily maximum vegetation surface temperature of in the crown of four beech canopies with the underlying number of values (30–50 years (N = 80), 65–85 years (N = 320), 95–115 years (N = 500), 115–135 years (N = 720)) for varying the soil suction power. Representation of the mean, the median, the percentiles P5, P25, P75, P95 and the minimum and maximum value from a 20-year period in the actual scenario (1981–2000).

Variation des Bestandes-Innenklimas in verschiedenen Klimaszenarien

Variation der Verdunstung eines Modellbestandes für verschiedene Klimaszenarien und variable Bodensaugspannung

Abbildung 9 zeigt die statistische Auswertung der simulierten Tagessumme der Verdunstung eines Jungbuchenbestandes für die 20-jährige Simulation der Bestandesentwicklung im Ist-Szenario (Periode 1981–2000) und in den Klimaszenarien B1 und A2 (Periode 2081–2100). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimaszenarien fallen im Vergleich zur Variation der Bodensaugspannung weniger deutlich aus. Bei feuchtem Boden (Saugspannung 10 kPa bis 100 kPa) kommt es aufgrund der höheren Temperaturen in den Szenarien zu einem leichten Anstieg der Tagessumme der Verdunstung des Buchenjungbestandes im Vergleich zum Ist-Szenario. Bei trockenem Boden (Saugspannung 300 kPa bis 800 kPa) sind die Unterschiede im Mittelwert zwischen den Szenarien gering. Generell nimmt die Variabilität der Verdunstung in den Klimaszenarien B1 und A2 ab (um bis zu 0,5 mm pro Tag), verursacht durch eine Abnahme der Variabilität des LAI (vgl. Abb. 7a und 7b) in der Simulation mit dem Waldwachstumsmodell BALANCE.

Variation der Vegetationsoberflächentemperatur unterschiedlicher Modellbestände für ein Klimaszenario

Die Abbildung 10 zeigt den erheblichen Einfluss unterschiedlicher Bestandesstrukturen auf die Verteilung der Tagessumme der Verdunstung und des täglichen Maximums der Vegetationsoberflächentemperatur des simulierten wolkenlosen Julitages für den Ist-Zustand und die Klimaszenarien B1 und A2. Hier zeigt sich deutlich, dass eine Baumverteilung im mittleren Bestandesalter besonders günstig ist, um Temperaturextreme zu dämpfen. Obwohl der Jungbuchenbestand (linke Box) aufgrund seiner hohen LAI-Werte eine höhere Verdunstung aufweist als die übrigen Bestände (vgl. Abb. 4a) sind die maximalen Vegetationsoberflächentemperaturen vergleichsweise hoch. Das lässt sich u. a. mit einer mangelnden Durchlüftung des dichteren Bestandes erklären, wodurch es bei relativ geringem Strom fühlbarer Wärme zu einem „Aufheizen“ des Bestandes kommt. Die hohen Temperaturwerte im Altbestand werden durch die stark aufgelockerte Struktur, verbunden mit niedrigen LAI-Werten (Abb. 4d und 7b) verursacht, die zu einer verstärkten Einstrahlung am Waldboden und damit einer deutlichen „Aufheizung von unten her“ führen. Die Bestandesstrukturen im mittleren Bestandesalter kombinieren offenbar eine ausreichende Durchlüftung mit ausreichender Abschattung des Bestandesinneren, was zu einer Dämpfung der Temperaturextreme führt. Dabei beträgt die Dämpfungswirkung – ausgedrückt als Differenz der mittleren Maxima zwischen den Buchenbeständen der Altersklassen 65–85 Jahre und 115–135 Jahre – für den Ist-Zustand im Mittelwert 6,2°C, das Minimum 6,8°C und für das Maximum 7,1°C. Analog für das B1-Szenario betragen die Temperaturdämpfungen im Mittelwert 5,5°C, im Minimum 5,3°C im Maximum 4,1°C und für

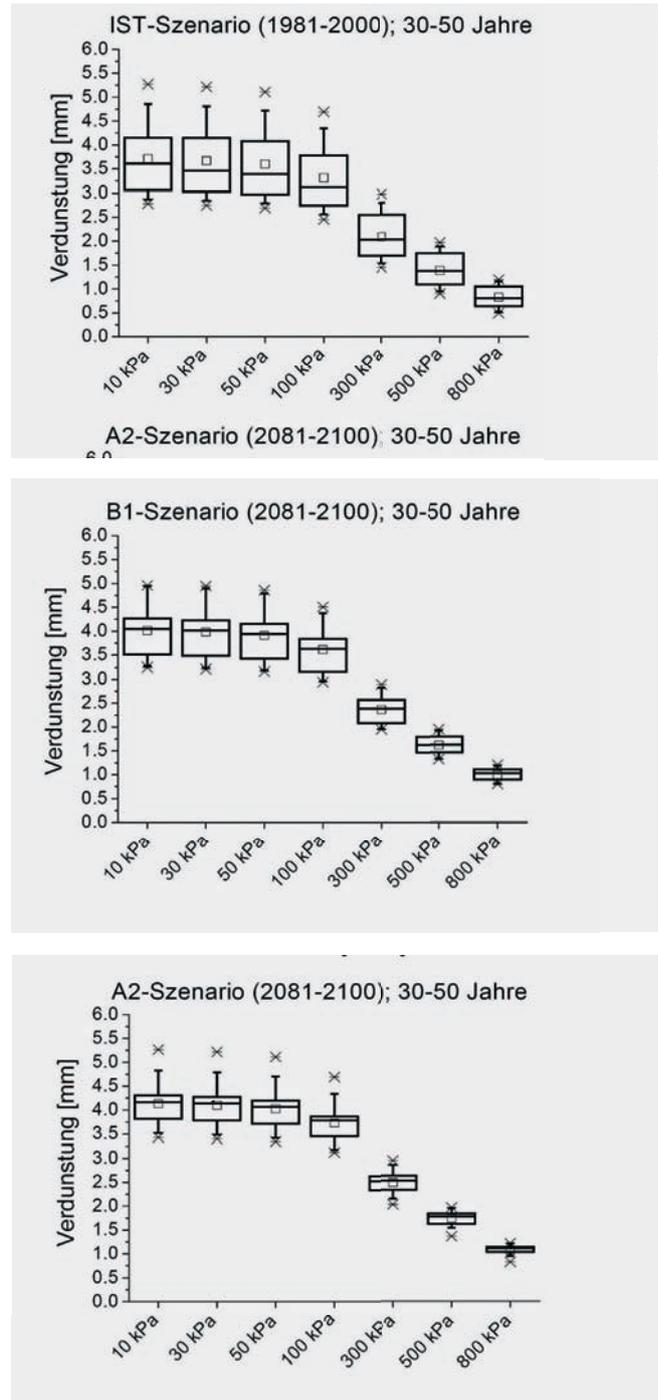


Abb. 9: HIRVAC-Simulation der Tagessumme der Verdunstung für einen Buchenjungbestand mit der zu Grunde liegenden Anzahl der Werte (30–50 Jahre (N=80)) bei Variation der Bodensaugspannung. Darstellung des Mittelwertes, des Medians, der Perzentile P5, P25, P75, P95 sowie des minimalen und maximalen Wertes aus einer 20-jährigen des Ist-Zustandes und den Szenarien B1 und A2.

Fig. 9: HIRVAC simulation of the daily sum of evaporation for a young beech canopy with the underlying number of values (30–50 years (N = 80)) for varying the soil suction power. Representation of the mean, the median, the percentiles P5, P25, P75, P95 and the minimum and maximum value from a 20-year period of the actual state and the scenarios B1 and A2.

das A2-Szenario im Mittelwert 5,4°C, im Minimum 2,8°C und für das Maximum 7,5°C.

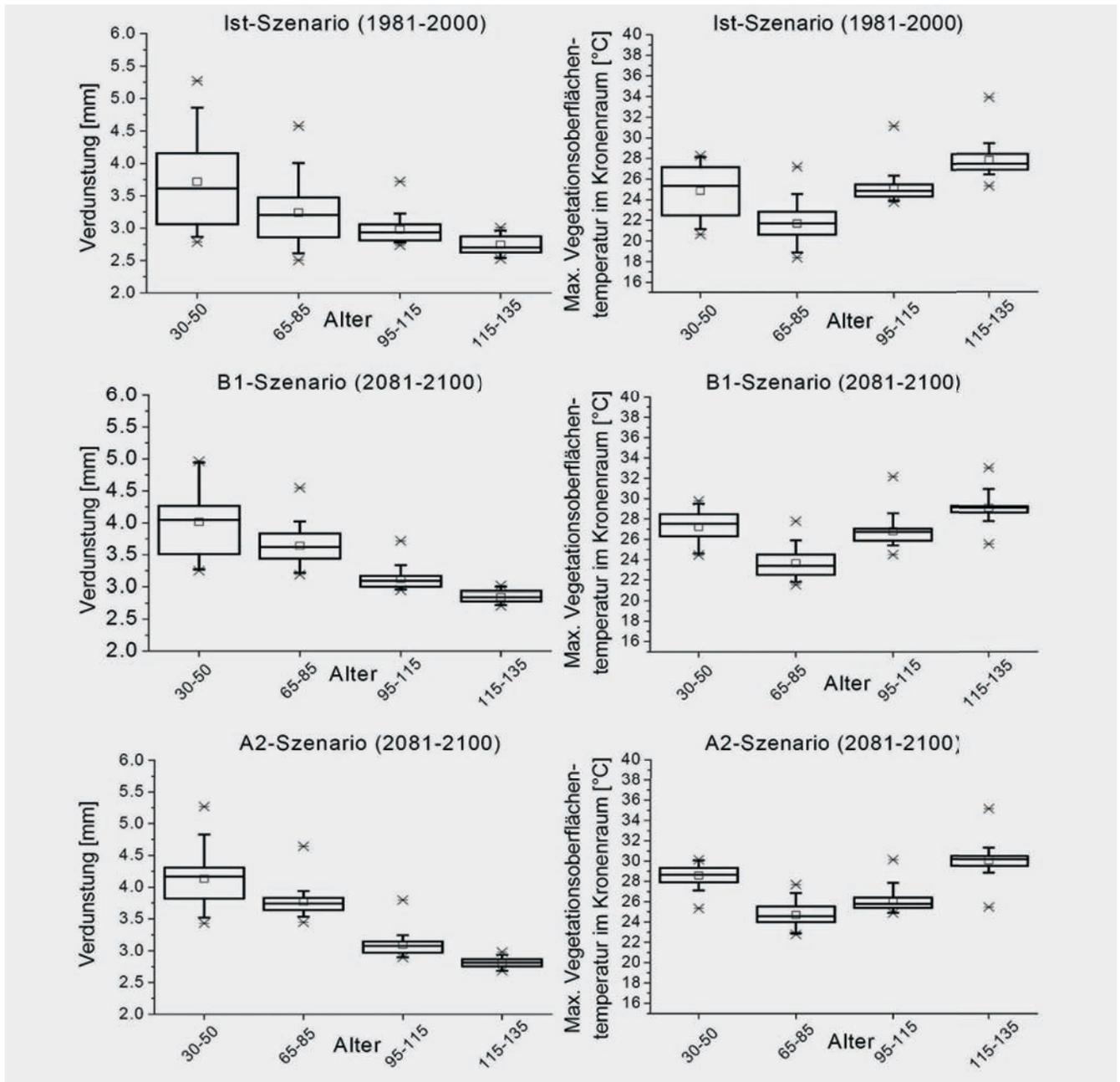


Abb. 10: HIRVAC-Simulation der Verteilung der Tagessumme der Verdunstung und der maximalen Vegetationsoberflächentemperatur im Kronenraum für vier Buchenbestände mit der zu Grunde liegenden Anzahl der Werte (30–50 Jahre (N=80), 65–85 Jahre (N=320), 95–115 Jahre (N=500), 115–135 Jahre (N=720)). Darstellung des Mittelwertes, des Median, der Perzentile P5, P25, P75, P95 sowie des minimalen und maximalen Wertes aus einer 20-jährigen Periode des Ist-Zustandes und den Szenarien B1 und A2.

Fig. 10: HIRVAC simulation of the distribution of the daily sum of evaporation and the maximum vegetation surface temperature in the crown of four beech canopies with the underlying number of values (30–50 years (N = 80), 65–85 years (N = 320), 95–115 years (N = 500), 115–135 years (N = 720)). Representation of the mean, the median, the percentiles P5, P25, P75, P95 and the minimum and maximum value from a 20-year period of the actual state and the scenarios B1 and A2.

4. Fazit

Die Modelluntersuchungen haben deutlich gezeigt, dass eine intensive Wechselwirkung von Bestandesstruktur, äußeren Steuerparametern und Bestandes-Innenklima besteht. So führt beispielsweise die Variation der Bodensaugspannung zu einer Variabilität im Bestandes-Innenklima (z. B. der Verdunstung und der maximalen Vegetationsoberflächentemperatur), die im Bereich der Änderung liegt, die durch Klimaszenarien hervorgerufen werden. Besonders markant wirken sich bestimmte Altersklassen mit variabler Bestan-

desstruktur auf das Bestandes-Innenklima aus. So zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Auswirkungen der großräumigen Klimaänderung auf die Extreme im Bestandes-Innenklima durch bestimmte Altersklassen und Altersstrukturen zeit- und teilweise kompensiert werden könnten. Beträgt zum Beispiel der projizierte Anstieg der mittleren sommerlichen Temperaturmaxima für Nordsachsen im Szenario A2 etwa 4°C, differiert die mittlere maximale Vegetationsoberflächentemperatur im Kronenbereich je nach Wahl der Al-

tersklasse um 5,4°C. Hier liegt der Ansatz für den Waldbau, durch gezielte Eingriffe in den Bestand Strukturen zu fördern, die zukünftigen sommerlichen Extreme reduzieren. Generell ist davon auszugehen, dass es durch horizontale Ausgleichsströmungen, die im Modell HIRVAC nicht direkt berücksichtigt werden können, zu einer gewissen Nivellierung der simulierten Extreme kommt, was die Ergebnisse innerhalb des Bestandes aber nur gering beeinflusst. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen schlussfolgern, dass das Anstreben einer optimalen Bestandesstruktur über die waldbauliche Regulierung der Bestandesdichte ein Mittel darstellt, den projizierten Anstieg der sommerlichen Temperaturextreme für den Wald der Zukunft abzuschwächen. Diese Untersuchung ergab, dass die optimale Bestandesstruktur in einem Alter von 60–100 Jahren besteht. Dagegen wird die Erhöhung der mittleren Sommertemperatur in Kombination mit einer Niederschlagsabnahme (Abb. 6a und 6b) zur Abnahme der Bodensaugspannung und damit nach den Simulationen zu einer Verschärfung der Temperaturextreme führen.

Literatur

- BAUMS, A.-B., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2005): Upgrading the coupled vegetation boundary layer model HIRVAC by new soil water and interception modules. *Met. Z.* 14(2): 211–218.
- BERNHOFER, C., BERGER, F.H., EICHELHANN, U., GOLDBERG, V., GRÜNWALD, T., HÄNTZSCHEL, J., PODLASLY, C. (2001): Die Atmosphäre – nur Randbedingung des globalen Wandels? In: *Integrative Forschung zum globalen Wandel. Herausforderungen und Probleme* (Hrsg. R. Coenen). Campus: 155–169.
- FALGE, E., GRABER, W., SIEGWOLF, R., TENHUNEN, J.D. (1996): A model of the gas exchange response of *Picea abies* to habitat conditions. *Trees* 10: 277–287.
- FALGE, E., RYEL, R.J., ALSHEIMER, M., TENHUNEN, J.D. (1997): Effects of stand structure and physiology on forest gas exchange: a simulation study for Norway spruce. *Trees* 11: 436–448.
- FISCHER, B., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2008): Effect of a coupled soil water–plant gas exchange on forest energy fluxes: Simulations with the coupled vegetation–boundary layer model HIRVAC. *Ecol. Mod.* 2(14): 75–82.
- FLEMMING, G., (1982): *Wald Wetter Klima*, DLV Berlin: 120 S.
- GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2001): Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation–atmosphere model HIRVAC. *Annal. Geophys.* 19: 581–587.
- GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2008): Testing different Ω measures with measurements and models of contrasting canopies under water stress. *Annal. Geophys.* 26: 1977–1992.
- GOLDBERG, V., SURKE, M., BERNHOFER, C. (2007): Regionalisierte Klimadaten für forstliche Anwendungen am Beispiel der Lausitz und der Dübener Heide. *Forst und Holz* 62(7): 24–27.
- GROTE R., PRETZSCH H. (2002): A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biol* 4:167–180.
- HÄNTZSCHEL, J., FRANKE J., GEMBALLA, R., BERNHOFER, C. (2006): Forstliche Klimagliederung Sachsens im Klimawandel. *AFZ-Der Wald* 15: 830–832.
- 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.
- MENZEL, L. (1997): *Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre*. Dissert., Zürcher-Geographische Schriften, Heft 67, 1997, Geographisches Institut ETH Zürich: 128 S.
- MURPHY, C.E. JR., LORENZ, R. (1985): Analysis of forest environmental measurements to estimate parameters of microclimate and air pollution deposition velocity models. In: Hutchison BA, Hicks BB (Eds.) *The Forest-Atmosphere Interaction*. Reidel Publishing, Dordrecht: 383–393.
- RAUPACH M.R. (1998): Influences of local feedbacks on land-air exchanges of energy and carbon. *GCB* 4: 477–494.
- ROECKNER, E., BAÜML, G., BONAVENTURA, L., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KIRCHNER, I., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., RHODIN, A., SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., TOMPKINS, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: model description, Tech. Rep. 349, Max-Planck-Inst. für Meteorol., Hamburg, Germany.
- RYEL, R.J. (1993): Light relations in tussock grasses as assessed with a new three-dimensional canopy photosynthesis model. Structure and function of foliage organization of a growth form prevalent in environments characterized by stress. PhD Thesis, University of Würzburg, Würzburg, Germany: 163 S.
- SELLERS, P.J., RANDALL, D.A., COLLATZ, G.J., BERRY, J.A., FIELD, C.B., DAZLICH, D.A., ZHANG, C., COLLELO, G.D., BOUNOUA, L. (1996): A revised land surface parameterization (SIB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model Formulation. *J. Climate* 9: 676–705.
- WULLSCHLEGER, S. D., GUNDERSON, C. A., HANSON, P. J., WILSON, K. B., NORBY, R. J. (2002): Sensitivity and canopy conductance to elevated CO₂ concentration – interacting variables and perspective of scale. *New Phyt.* 153: 485–496.
- ZENG, X.M., ZHAO, M., YU, R.C., LIN, N.S., ZHENG, Y.Q., ZHANG, L.J., ZHANG, R.J. (2003): Application of a “Big-Tree” model to regional climate modeling: a sensitivity study. *Theor. Appl. Climatol.* 76: 203–218.

Autorenanschriften

Valeri Goldberg, Christian Bernhofer
 Technische Universität Dresden
 Institut für Hydrologie und Meteorologie,
 Piener Straße 23, D-01737 Tharandt
 Email valeri.goldberg@tu-dresden.de