

Modellierung des Biomassezuwachses an bayerischen Waldklimastationen unter gegebenen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen

Ein Beitrag zum Gedenkkolloquium anlässlich des 10. Todestages von Prof. Dr. FRIEDRICH FRANZ am 27. Juli 2012

(Mit 8 Abbildungen und 3 Tabellen)

T. RÖTZER^{1,*}, Y. LIAO¹, D. KLEIN², L. ZIMMERMANN² und C. SCHULZ²

(Angenommen Februar 2013)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Biomasse; Kohlenstoffspeicherung; Klimaänderung; Waldwachstum; Fichte; Buche; Kiefer; Eiche.

Biomass; carbon sequestration; climate change; forest growth; spruce; beech; pine; oak.

1. EINLEITUNG

Die seit Jahrzehnten beobachteten Klimaänderungen werden sich nach den Prognosen des IPCC im 21. Jahrhundert fortsetzen bzw. beschleunigen (IPCC, 2007). Es ist zu befürchten, dass zukünftige Klimabedingungen dramatische Auswirkungen auf die Umwelt mit sich bringen (IPCC, 2001, 2007; CRUTZEN, 2002). Deutliche Veränderungen wurden bereits in Form von Arealverschiebungen und veränderten Populationsdichten von Pflanzen- und Tierarten sowie phänologischen Änderungen wie frühere Austriebs-, Blüh- oder Brutzeitpunkte festgestellt (WALTHER et al., 2002; PARMESAN and YOHE, 2003; ROOT et al., 2003).

In den letzten 100 Jahren stieg die mittlere Jahrestemperatur in Europa um 0,95°C. Zukünftig wird je nach Klimaszenario eine globale Temperaturerhöhung von 1,4°C bis 5,8°C für die nächsten 100 Jahre (bis 2100) erwartet. Für Europa geht man von einer Erhöhung zwischen 2,0°C und 6,3°C aus (IPCC, 2007). Langfristige Wetteraufzeichnungen zeigen, dass auch Deutschland bereits heute vom Klimawandel beeinflusst ist und zukünftig höhere Temperaturen, sowie Niederschlagsumverteilungen, wahrscheinlich auch teilweise vermehrte Starkregenereignisse oder Winterstürme zu erwarten sind (ZEBISCH et al., 2005; DWD, 2012). Aus forstlicher Sicht stellt sich die Frage, wie sich diese Veränderungen, insbesondere höhere Temperaturen und geringere bzw. saisonal anders verteilte Niederschläge auf das Wachstum der Bäume auswirken. Dabei rückt die Frage der Produktivität der einzelnen Baumarten, speziell die der Hauptbaumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche immer mehr in den Fokus. Da forstliche Produktionszeiträume im Vergleich zu anderen Landnutzungsformen oft über ein Jahrhundert andauern, sind die richtige Baumartenwahl und Bestandeszusammensetzung wichtige Kriterien für nachhaltige und produk-

tive Wälder in der Zukunft. So wird beispielsweise die Fichte in vielen Regionen im weitaus geringeren Ausmaß geeignet sein wie es heute noch der Fall ist (KÖLLING et al., 2009; KÖLLING et al., 2010). Andere Baumarten wie die Eiche könnten hingegen ihr Verbreitungsareal erweitern (ROLOFF und GRUNDMANN, 2008). Veränderte Klimabedingungen können je nach Standort zu veränderten Zuwachsleistungen einzelner Baumarten führen. Jüngere Studien zeigen beispielsweise eine erhöhte Biomasseproduktion über verschiedene Waldtypen hinweg, die mit veränderten Klimabedingungen zu begründen ist (MCMAHON et al., 2010). Das Ausmaß der Veränderungen im Wachstum hängt jedoch von der spezifischen Reaktion der jeweiligen Baumart ab (PRETZSCH und ĎURSKÝ, 2002). Auch Zuwachseinbußen sind denkbar, insbesondere auf Standorten, die bereits heute zumindest temporär wasser- oder nährstofflimitiert sind. Die Erfassung zukünftiger Wuchsleistungen einzelner Baumarten ist nicht nur aus ökonomischer Sicht von Bedeutung, sondern dient auch als wichtige Grundlage ökologischer Fragestellungen (u.a. Potential von Wäldern als Kohlenstoffsinken). Dazu bedarf es jedoch spezifischer Wachstumsmodelle, die Veränderungen klimatischer Parameter wie Niederschlag und Lufttemperatur (und daran gekoppelte Parameter wie Wasserhaushalt oder Bodentemperatur) berücksichtigen, um so letztlich Aussagen über die zukünftige Entwicklung einzelner Bestände bzw. größerer Waldflächen unter verschiedenen Klimaszenarien zu ermöglichen (ABER et al., 1995). Ein Modell, das diese Ansprüche erfüllt, ist das physiologische einzelbaumorientierte Waldwachstumsmodell BALANCE. Es kann Bestandesentwicklungen in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen simulieren. Für diese Simulationsstudie wurden verschiedene Bestände an Waldklimastationen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft verwendet. Dabei sollten folgende spezifische Fragestellungen beantwortet werden:

(1) Kann die Biomasseentwicklung eines Bestandes mit einem ökophysiologischen Wachstumsmodell anhand von Klima- und Bodendaten sowie initialen Baumgrößen realitätsnah nachgebildet werden?

(2) Wie hat sich die Biomasse der Baumbestände an den einzelnen Waldklimastationen in den letzten 10 Jahren entwickelt?

(3) Wie verändert sich die Kohlenstoffdynamik bzw. Biomasseproduktivität unter möglichen künftigen Klimaverhältnissen?

(4) Was sind die Ursachen möglicher veränderter Biomasse-Zuwachsleistungen?

¹) Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

²) Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising.

*) Korrespondierender Autor: Dr. THOMAS RÖTZER. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising. E-Mail: thomas.roetzer@lrz.tum.de

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Modell BALANCE

Das physiologische Wachstumsmodell BALANCE beschreibt die dreidimensionale ober- und unterirdische Entwicklung einzelner Bäume in Abhängigkeit von den äußeren Umweltfaktoren Witterung, CO₂-Konzentration, Bodenbedingungen sowie Schadstoffen und der individuellen Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe. Bei der Berechnung der physiologischen und physikalisch-chemischen Prozesse wurde weitgehend auf publizierte Hypothesen und Modelle zurückgegriffen (z. B. HAXELTINE und PRENTICE, 1996; PENNING DE VRIES et al., 1989; THORNLEY und CANNELL, 2000; ALLEN et al., 1998).

Als Initialgrößen benötigt BALANCE die Baumhöhe, den Stammdurchmesser und die Stammfußkoordinaten sowie optional Kronenansatzhöhe und Kronenradien. Die Kronenformen und Wurzelraumdimensionen werden aus diesen Größen abgeleitet (GROTE, 2003) und dienen als Grundlage für die Initialisierung der Laub-, Stamm-, Ast-, Grob- und Feinwurzelbiomassen sowie der Blatt- und Wurzeloberflächen. Die räumlichen Ebenen der Berechnung reichen vom Bestand über Einzelbäume und Baumkompartimente (Krone, Stamm, Wurzel) bis hin zu Kronen- und Wurzelschichten, die wiederum in Segmente eingeteilt werden. Die einzelnen Segmente stellen die Berechnungsgrundlage aller Kreisläufe und Prozesse dar (Abb. 1).

Die das Wachstum eines Baumes bestimmenden Prozesse werden in zeitlich unterschiedlicher Auflösung berechnet. Die Ressourcenverfügbarkeit wird in Tagesritten für jeden einzelnen Baum bzw. jedes einzelne Segment bestimmt (Witterung, Wasserhaushalt und Phänologie). Hierfür werden Tagessummen bzw. Tagesmittelwerte der Witterung (Lufttemperatur, Strahlung, Niederschlag, Wind und relative Feuchte) und der Luftchemie (CO₂-Konzentration, Luftschadstoffe, N-Deposition) sowie Bodenkennwerte (Schichtung, Nährstofffreisetzung, maximale Wasserverfügbarkeit) benötigt.

Am Ende jeder Dekade (= 10 Tage) werden die Werte der Ressourcenverfügbarkeit aufsummiert. Sie bilden

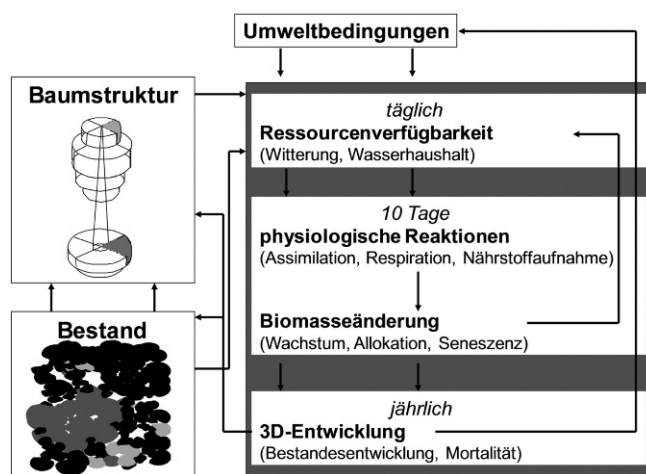


Abb. 1

Schema des Wachstumsmodells BALANCE.
Schematic diagram of growth model BALANCE.

die Eingangsgrößen für die physiologischen Prozesse Photosynthese und Respiration sowie für den Nährstoffkreislauf. Die Verteilung der Biomasse (Allokation) erfolgt in den gleichen Zeitschritten. Dabei wird der neu gewonnene Kohlenstoff auf Laub, Äste, Grob- und Feinwurzeln sowie Stammholz verteilt.

Am Ende eines jeden Jahres wird die dreidimensionale Struktur eines jeden Baumes sowie des gesamten Bestandes neu berechnet. Entsprechend den Biomasseveränderungen werden das Höhen- und Durchmesserwachstum sowie die Kronenausdehnung eines jeden Baumes bestimmt. Die Dimensionsveränderung erfolgt aus der über das Jahr realisierten Zunahme von Stammholz (Höhe, Durchmesser), Grobwurzeln (Wurzelraumdimensionen) und Astholz (Kronenraumdimensionen). Dabei richtet sich der Anteil, der jedem Segment zugeordnet wird, nach seiner Effektivität, d. h. nach dem Verhältnis zwischen Kohlenstoffaufnahme und -abgabe. Für die Aufteilung des Stammholzzuwachses ist das Verhältnis der Effizienzen von Sonn- und Schattenkrone entscheidend. Damit regelt der Mechanismus die Dimensionsveränderungen entsprechend den individuellen Umweltverhältnissen (THORNLEY, 1999). So führt beispielsweise starker Seitendruck, d. h. geringer Lichtgenuss in der Schattenkrone bzw. reduzierter Lichtgenuss in der Sonnenkrone, zu einer Einschränkung des Lateralwachstums und eventuell zu verstärktem Höhenwachstum. Freistand oder vollständige Überschirmung, d. h. geringe Unterschiede zwischen Sonn- und Schattenkrone, bewirken dagegen eine eher horizontale Ausbreitung.

Bei der Modellierung mit BALANCE werden zum einen die wesentlichen Flussgrößen des Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts, zum anderen das Wachstum der Bäume, das von diesen Größen abhängt, und die Konsequenzen, die sich daraus für die Bestandesstruktur ergeben, betrachtet. Das Höhen- und Dickenwachstum des Stammes und die Ausdehnung der Krone bzw. des Wurzelraumes werden allein auf Grundlage der jährlichen Netto-Kohlenstoffgewinne und der Effizienz der einzelnen Kronen- und Wurzelraumteile simuliert. Beides ergibt sich aus den in Dekadenschritten simulierten physiologischen Prozessen Photosynthese (HAXELTINE und PRENTICE, 1996), Atmung (PENNING DE VRIES, 1989), Verteilung des Kohlenstoffs und Stickstoffs im Baum (GROTE, 1998) und Gewebeeralterung.

Die Photosynthese ist eine Funktion von Blattfläche, Licht, Temperatur und CO₂-Konzentration (HAXELTINE und PRENTICE, 1996) und kann durch Wasser- und Nährstoffmangel sowie Schadstoffe reduziert werden. Die Atmung setzt sich aus Erhaltungs- und Wachstumsatmung zusammen (PENNING DE VRIES, 1989). Während die Wachstumsatmung ein fester Anteil der Bruttoassimilation ist, wird die Erhaltungsatmung als Funktion der Temperatur und der Biomasse beschrieben.

Die Berechnung des relativen Lichtgenusses wurde aus dem Konkurrenz-Algorithmus des Einzelbaumsimulators SILVA abgeleitet (PRETZSCH, 1992). Anders als dort wird in BALANCE der Suchkegel zur Abschätzung

der Konkurrenz nicht einmal pro Baum, sondern über jeden einzelnen Kronensektor in variabler Anzahl separat aufgespannt. Sowohl die Anzahl als auch die Blattfläche aller von diesem Kegel berührten Sektoren werden in die Strahlungsberechnung eines Sektors einbezogen. Damit wurde eine Möglichkeit geschaffen, den Lichtgenuss jedes Kronenbereiches mit einem Minimum an Rechenaufwand zu beschreiben.

Die Simulation des Wasserhaushalts berücksichtigt die Bodenbedingungen in verschiedenen Schichten sowie den Einfluss der Interzeption und Perkolation durch die Schirmflächen- und Wurzelverteilung. Die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit für einen Baum ist von dem von ihm durchwurzelten Volumen und den dortigen Bodeneigenschaften abhängig. Da das Durchwurzelungsvolumen von der Baumgröße und der Stellung zu den Konkurrenten abhängt, spiegelt sich auch hier der Einfluss der Bestandesstruktur und der Mischungsverhältnisse wider. Die tatsächliche Evapotranspiration wird nach dem Ansatz von Penman-Monteith abgeschätzt (ALLEN et al., 1998), wobei sowohl die täglichen Witterungsbedingungen als auch Blattfläche, aktuelle Kroneninterzeption und transpirierbarer Wasservorrat im Boden berücksichtigt werden.

Die Nährstoffaufnahme ergibt sich als Minimum von Bedarf, Angebot und Aufnahmevermögen (GROTE, 1998). Gegenwärtig wird dabei nur der Stickstoffkreislauf als wichtigstes Närelement betrachtet. Der Bedarf wird aus der Differenz zwischen aktueller Stickstoffkonzentration und vorgegebener optimaler Konzentration ermittelt. Das Angebot ergibt sich aus den Bodeneigenschaften des durchwurzelten Bodenraumes, das Aufnahmevermögen ist durch die Wurzeloberfläche und ihre spezifische Aufnahmeleistung vorgegeben.

Die Verteilung der Nettoassimilation und der Stickstoffaufnahme richtet sich nach dem Bedarf der einzelnen Kompartimente (GROTE, 1998). Dieser Bedarf wird durch die Beziehungen zwischen den Kompartimenten über die „functional balance“-Theorie (MÄKELÄ, 1990) bzw. die „pipe-model“-Theorie (SHINOZAKI et al., 1964) sowie durch die Differenz der Stickstoffgehalte in den Kompartimenten (Laub, Feinwurzeln, Äste, Stammholz, Grobwurzeln) und den optimalen Gehalten bestimmt.

Um die Zusammenhänge von Umwelteinflüssen und Wachstum darstellen zu können, muss zudem die jahreszeitliche Entwicklung der Blätter bekannt sein. Mit dem Beginn des Laubaustriebs ändert sich die Laubfläche, die Biomasse wie auch die Strahlungsverteilung und -absorption. Dementsprechend bestimmt der Laubaustrieb eines Baumes sein Assimilations- und Respiationsvermögen, verändert aber auch die Umweltbedingungen der Nachbarbäume. In BALANCE wird der Beginn des Laubaustriebs anhand eines baumartenspezifischen Temperatursummenmodells bestimmt (RÖTZER et al., 2004), die Laubseneszenz wird in Abhängigkeit der Respirationssumme geschätzt (RÖTZER et al., 2010).

Eine ausführliche Beschreibung des Modells BALANCE ist zusammen mit zahlreichen Modellvalidierungen in GROTE und PRETZSCH (2002) und RÖTZER et al. (2004, 2005, 2009, 2010, 2012) enthalten.

2.2 Untersuchungsbestände

Die Wachstumssimulationen erfolgten für Bestände an den fünf Waldklimastationen (WKS) Freising (FRE), Flossenbürg (FLO), Riedenburg (RIE), Altdorf (ALT) und Würzburg (WUE).

2.2.1 Charakterisierung der WKS

Die WKS Freising liegt auf ca. 500 m ü. NN an der südlichen Grenze des Wuchsbezirkes 12.8, Oberbayerisches Tertiärhügelland, mit subatlantischem bis subkontinentalem Klima ($T_{\text{Juli}}-T_{\text{Januar}}$: 18,3°C) bei einem Jahresniederschlag von 779 mm und einer langjährigen mittleren Jahrestemperatur von 7,7°C (1971–2000). Der gut mit Nährstoffen versorgte Buchen-Eichen Bestand mit Buchen im Nebenbestand stockt auf heterogenem Substrat mit hohem Anteil an Schluff im Löß-geprägten Oberboden (schluffiger Lehm) und relativ gleichmäßig verteilten Anteilen an Sand, Schluff und Ton im Unterboden (mittel sandiger Lehm) und geringen Grobbodenanteilen. Der Boden mit pH-Werten zwischen 4,5 im Oberboden und 5,3 im Unterboden (gemessen in H₂O) wird als Braunerde-Parabraunerde charakterisiert (PREUHSLER und KENNEL, 1996). Bodenphysikalisch handelt es sich um einen Standort mit einer hohen Speicherleistung bei geringem Skelettgehalt und tiefer Durchwurzelung bis 1,5 m Tiefe (nFK Hauptwurzelraum: 146 mm). Eine Durchforstung wurde im Jahr 1999 durchgeführt.

Die WKS Flossenbürg liegt auf ca. 840 m ü. NN im Wuchsbezirk 10.4 (Oberpfälzer Wald) mit hohen Niederschlägen von 977 mm und kontinental geprägten Temperaturen ($T_{\text{Juli}}-T_{\text{Januar}}$: 17,3°C) um 5,5°C im langjährigen Mittel (1971–2000) und Vegetationszeiten von 175 bis 190 Tagen. Der mittel entwickelte Boden mit Gneis als Ausgangsgestein und einem engen Bodenartenspektrum zwischen sandigem Lehm und lehmigen Sand wird als Braunerde-Podsol eingestuft. Zudem ist er insbesondere in tieferen Lagen geprägt von einem relativ hohen Skelettanteil von bis zu 40% im Unterboden. Bodenphysikalisch handelt es sich um einen Standort mit einer geringen Speicherleistung bei sehr flacher Durchwurzelung (nFK Hauptwurzelraum: 71 mm). Der Oberboden ist stark sauer mit pH-Werten um 3,7 (in H₂O) gefolgt von einem mäßig sauren Unterboden um 4,7 (PREUHSLER et al., 2000). Im stark von Fichten dominierten Bestand erfolgten zwei Durchforstungen, jeweils eine zwischen 1999–2004 und 2004–2009.

Die WKS Riedenburg liegt 475 m ü. NN im Wuchsbezirk Südliche Frankenalb und Südlicher Oberpfälzer Jura (6.2), geprägt durch ein mehr subatlantisches als subkontinentales Klima ($T_{\text{Juli}}-T_{\text{Januar}}$: 18,8°C) mit 7,9°C Temperatur im langjährigen Mittel und mittleren Jahresniederschlägen von 663 mm (1971–2000), wobei das sommerliche Niederschlagsmaximum deutlich ausgeprägt ist. Die Vegetationsperiode auf den gut nährstoffversorgten Böden umfasst 150–160 Tage. Als Bodentyp wird eine Parabraunerde über Terra Fusca charakterisiert, mit Lößlehm in den oberen 30 cm, wobei der Tonanteil und die Skelettfraction von den oberen Bodenhorizonten (schluffiger Lehm, 5% Skelett) nach unten hin zunehmen (stark grusiger Ton, bis zu 65%

Skelett) (PREUHSLER, 1993). Durch diese Tiefenbegrenzung liegt die nFK des Hauptwurzelraums vergleichsweise niedrig bei 88 mm. In dem Eichen-Buchen Mischbestand wurde bis 1999 eine Durchforstung durchgeführt.

Die WKS Altdorf liegt im Wuchsbezirk Südliche Keuperabdachung (5.6/1) auf 406 m ü. NN mit subatlantischem Klima ($T_{\text{Juli}} - T_{\text{Januar}}$: 18,4°C) und einer mittleren Jahrestemperatur von 8,2°C und mittleren Jahresniederschlägen von 828 mm (1971–2000). Der gut durchwurzelbare, sehr sandige Boden (schwach schluffiger Mittelsand) wird als Eisen-Humus-Podsol eingestuft und weist eine gute Durchwurzelbarkeit bei gleichzeitig geringfügiger Wasserspeicherkapazität (nFK Hauptwurzelraum 89 mm) auf, was jedoch durch den hohen Niederschlag in der Hauptvegetationszeit abgemildert wird. Der Oberboden ist mit pH-Werten um 3,5–4,5 sauer mit einem darauffolgenden mäßig sauren Unterbodenhorizont um 5,0 (in H₂O gemessen) (PREUHSLER, 1993). Bedingt durch u.a. jahrhundertelange Streunutzung stockt der reine Kiefernbestand auf einem schlecht Nährstoffversorgten Standort, der zwischen 1999 und 2004 einmal durchforstet wurde.

Die WKS Würzburg liegt im Wuchsbezirk Südliche Fränkische Platte (4.2) auf ca. 330 ü. NN, trotz west-

licher Lage und milden Wintern geprägt von einem warmen, trockenen subkontinental getönten Klima ($T_{\text{Juli}} - T_{\text{Januar}}$: 17,9°C) mit einer der höchsten mittleren Jahrestemperaturen in ganz Bayern (8,8°C) und niedrigeren, mittleren Jahresniederschlägen von 548 mm (1971–2000). Durch die hohen Sommertemperaturen und dem damit einhergehenden hohen Verdunstungsanspruch können bereits geringe Niederschlagsdefizite zu einer unzureichenden Wasserversorgung führen. Der als Braunerde-Pseudogley charakterisierte Boden enthält hohe Schluffanteile im Oberboden (schluffiger Lehm) und zunehmend Tonanteile in tieferen Schichten mit typischen Stauwassermerkmalen wie Rostflecken oder Bleichung (lehmiger Ton) sowie eine unterste Schicht aus carbonathaltigem Mergel mit etwas höheren Sandanteilen (Lehm). Skelettfraktionen kommen kaum vor. In Würzburg handelt es sich um einen Standort mit geringer bis mittlerer nFK im Hauptwurzelraum (116 mm). Auf ein mäßig saures Milieu mit pH-Werten um 4,3 bis 5,2 (in H₂O) im Oberboden folgt ein basisches Milieu mit pH-Werten zwischen 7,4 und 8,2 im Unterboden (SCHMIDT et al., 2001). In dem von Eichen dominierten und mit Hainbuchen und Buchen angereicherten Bestand wurden zwei Durchforstungen, jeweils zwischen 1999–2004 und 2004–2009 durchgeführt.

Tab. 1

Bestandeskennwerte der untersuchten bayerischen Waldklimastationen in 1999/2000 mit Fläche real als Aufnahme­fläche, Alter als mittleres Alter der herrschenden Baumart, N als Stammzahl, BHD als mittleren BHD (\pm Standardabweichung), H als mittlere Höhe (\pm Standardabweichung), G als Grundfläche und V als Vorrat.

Stand description of the studied Bavarian forest monitoring plots with Fläche real as study area, Alter as mean age of the dominating tree species, N as number of stems, BHD as mean dbh (\pm standard deviation), H as mean tree height (\pm standard deviation), G as basal area and V as growing stock.

	Fläche real [ha]	Alter	N*ha ⁻¹	BHD [cm]	H [m]	G [m ² *ha ⁻¹]	V [Vfm*ha ⁻¹]
Freising							
Buche		104	320	25,2 (\pm 17,0)	21,5 (\pm 8,1)	23	371
Eiche		159	65	47,0 (\pm 7,8)	31,9 (\pm 1,8)	12	201
gesamt	0,30		385			35	572
Flossenbürg							
Buche			8	39,2 (\pm 1,9)	23,2 (\pm 3,5)	1	11
Fichte		92	506	30,5 (\pm 7,1)	23,9 (\pm 2,3)	39	464
Tanne			8	24,9 (\pm 1,6)	22,4 (\pm 0,6)	1	4
gesamt	0,26		522			41	479
Riedenburg							
Buche			331	13,9 (\pm 6,3)	16,8 (\pm 5,9)	6	64
Eiche		122	222	41,1 (\pm 5,0)	33,2 (\pm 1,1)	30	531
Ahorn			60	13,7 (\pm 4,7)	17,5 (\pm 5,8)	1	9
gesamt	0,27		613			37	604
Altdorf							
Kiefer	0,28	80	974	21,1 (\pm 5,0)	19,5 (\pm 1,8)	36	327
Würzburg							
Buche			197	14,6 (\pm 6,6)	17,2 (\pm 4,7)	4	39
Hainbuche			466	13,4 (\pm 5,3)	16,5 (\pm 4,3)	8	70
Eiche		106	270	32,5 (\pm 4,2)	28,1 (\pm 1,7)	23	335
gesamt	0,26		933			35	444

2.2.2 Messprogramm und Datenerhebungen an den WKS

Seit nunmehr über 20 Jahren werden von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) an den WKS in regelmäßigen Abständen zahlreiche Daten erhoben. Das Messprogramm umfasst neben Erhebungen zur Meteorologie (Niederschlag, Lufttemperatur, siehe auch Kap. 2.3), zum Kronenzustand, zur Phänologie von Bäumen, zum Streufall, zum Wasserhaushalt u.a. auch waldwachstumskundliche Wiederholungsaufnahmen, die als Eingangsdaten für die vorliegende Studie herangezogen wurden: Der laufende jährliche Zuwachs wird einzelbaumweise auf einer definierten Untersuchungsfläche mittels Umfangmaßbänder in Abständen von 5 Jahren (im Herbst eines Aufnahmejahres), an manchen WKS seit 1992, bei den meisten WKS jedoch seit 1997 erhoben. Im gleichen Turnus werden zudem Baumhöhe und Kronenansatzhöhe ermittelt. Des Weiteren erfolgt eine Vergabe von Koordinaten für jeden aufgenommenen Baum sowie die genaue Einmessung der Probestfläche, um so auch kartografische Darstellungen zu ermöglichen. Aktuell wird zudem eine umfangreiche Stammscheibenanalyse durchgeführt, die in der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der Alter der herrschenden Baumarten für jede WKS herangezogen wurde. Auf Basis dieser Messungen können so die Entwicklung der BHDs und der Baumhöhen dargestellt werden, die zum einen als Kalibrierungsdaten für das Modell BALANCE und zum anderen als Grundlage für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte dienen. Weitere Informationen zu den Messprogrammen können u.a. aus den Jahrbüchern der Bayerischen Waldklimastationen entnommen werden (z.B. PREUHSNER et al., 2000; DIETRICH et al., 2006). Die ertragskundliche Beschreibung der einzelnen Bestände ist in Tab. 1 ersichtlich.

2.3 Berechnung der Kohlenstoffvorräte

Anhand der gemessenen Werte von BHD und Baumhöhe können mittels Biomassefunktionen die Kohlenstoffspeicher für jede Periode einzelbaumweise und anschließend bestandesweise berechnet werden. Hierfür werden, untergliedert nach Baumarten, die Funktionen nach ZELL (2008) für die oberirdische Biomasse (siehe Gleichungen 1–4) sowie das root/shoot-Verhältnis nach OFFENTHALER und HOCHBICHLER (2006) für die Wurzelbiomasse herangezogen: 0,22 für Fichte, 0,20 für Kiefer, 0,18 für Buche und 0,22 für Eiche.

Oberirdische

$$\text{Biomasse}_{\text{Fichte}} = 0,067 \times \text{BHD}^{1,938} \times \text{H}^{0,638} \quad (1)$$

Oberirdische

$$\text{Biomasse}_{\text{Kiefer}} = 0,058 \times \text{BHD}^{2,034} \times \text{H}^{0,637} \quad (2)$$

Oberirdische

$$\text{Biomasse}_{\text{Buche}} = 0,037 \times \text{BHD}^{2,108} \times \text{H}^{0,770} \quad (3)$$

Oberirdische

$$\text{Biomasse}_{\text{Eiche}} = 0,044 \times \text{BHD}^{2,096} \times \text{H}^{0,712} \quad (4)$$

Für die Tanne wurde die Funktion bzw. das root/shoot-Verhältnis der Fichte und für Hainbuche und Ahorn das der Buche verwendet, da für diese Baumarten bei ZELL (2008) keine gesonderten Gleichungen erstellt wurden. Die verwendeten Gleichungen zur Berechnung der oberirdischen Biomasse sind dafür geeignet, da sie auf einer umfassenden Datenbasis beruhen (Massentafeln von GRUNDNER und SCHWAPPACH). Zudem zeigt ein Vergleich mit anderen Funktionen für Fichte und Buche aus der Literatur (z. B. WUTZLER et al., 2008) sowie ein Vergleich mit gemessenen Werten zur Biomasse an Bayerischen Waldstandorten auf Basis der Arbeit von GÖTTLEIN und WEIS (2011) eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse (vgl. KLEIN und SCHULZ, 2012). Die Umrechnung von Biomasse auf Kohlenstoff erfolgt anhand des gängigen Umrechnungsfaktors von 0,5 unter der Annahme, dass jegliche Biomasse mit Schwankungen durchschnittlich zu 50% aus Kohlenstoff besteht (BURSCHEL et al., 1993).

2.4 Klima und Klimaszenarien

Im langjährigen Mittel (2000–2009) ergeben sich für die Waldklimastationen die in Tab. 2 aufgeführten klimatischen Mittelwerte für den Jahresniederschlag und die Temperatur. Neben diesen gemessenen Daten wurden meteorologische Zeitreihen von Klimastationen des regionalen Klimamodells WETTREG (SPEKAT et al., 2007) in täglicher Auflösung für das Ist-Klima (Kontrolllauf, 1961–1990) zum Vergleich mit den gemessenen Werten sowie ein mögliches Zukunftsszenario (2071–2100) verwendet. Die statistischen Eigenschaften der 30-jährigen Klimaperioden werden durch meteorologische Zeitreihen über einen Zeitraum von jeweils 60 Jahren wiedergegeben. Der statistische Ansatz dieses Klimamodells ermöglicht es, die Unsicherheit einer möglichen Änderung im Niederschlag durch die Verwendung

Tab. 2

Mittlerer Jahresniederschlag und Lufttemperatur der Referenzperiode (2000–2009) an den bayerischen Waldklimastationen und Zuordnung der WETTREG-Klimastationen zu den Waldklimastationen.

Mean annual precipitation and air temperature of the reference period (2000–2009) at the Bavarian forest monitoring plots (WKS) and assigned WETTREG-climate stations.

Waldklimastation	Niederschlag [mm]	Lufttemperatur [°C]	WETTREG-Klimastation	Höhe [m]	Entfernung [km]
Altdorf	847	8,1	Roth ROT	340	25,8
Würzburg	968	6,3	Würzburg WUE	268	5,8
Flossenbürg	837	8,2	Fichtelberg FIC	659	45,5
Riedenburg	729	8,1	Weihenstephan FRE	470	59,3
Freising	645	9,1	Weihenstephan FRE	470	2,2

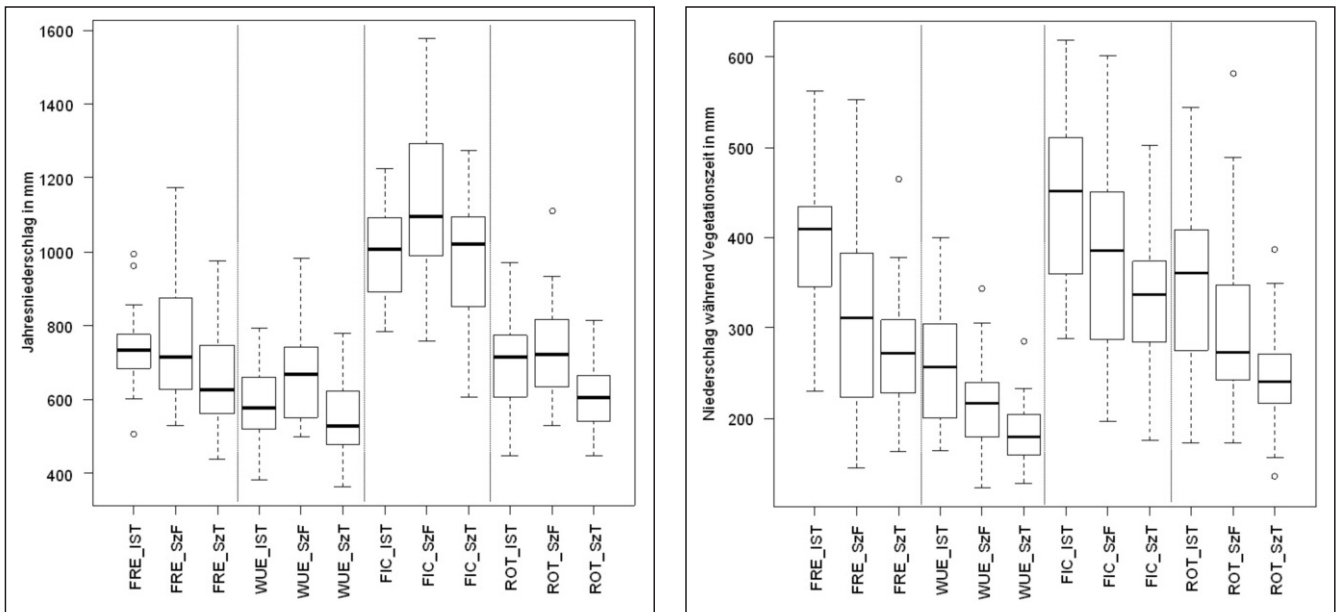


Abb. 2

Niederschlagssummen des gesamten Jahres (links) sowie während der Vegetationsperiode Mai–September (rechts) (Ist-Klima: IST; Zukunftsszenario trockene Realisation: SzT, Zukunftsszenario feuchte Realisation: SzF).

Precipitation sums on annual base (left) and for the growing season from May to September (right) (present-day climate: IST; future scenario dry realisation: SzT, future scenario wet realisation: SzF).

einer trockenen sowie einer feuchten Realisation (aus 10 Realisationen) des SRES-Emissionsszenario A1b zu berücksichtigen. Den WKS wurden teilweise sehr nahegelegene Klimastationszeitreihen zugeordnet (Freising, Würzburg) oder durch die Höhenlage vergleichbare in der weiteren Umgebung ausgewählt (Tab. 2).

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Niederschlagssummen und die Durchschnittstemperaturen für das

gesamte Jahr sowie für die Vegetationsperiode Mai–September für das Ist-Klima und für die trockene bzw. feuchte Realisation des Szenarios A1b.

Bei den Niederschlägen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Jahressummen und den Niederschlägen während der Vegetationsperiode. So liegt beispielsweise das feuchte Szenario häufig in der Nähe des Ist-Klimas (Freising, Roth), während das trockene

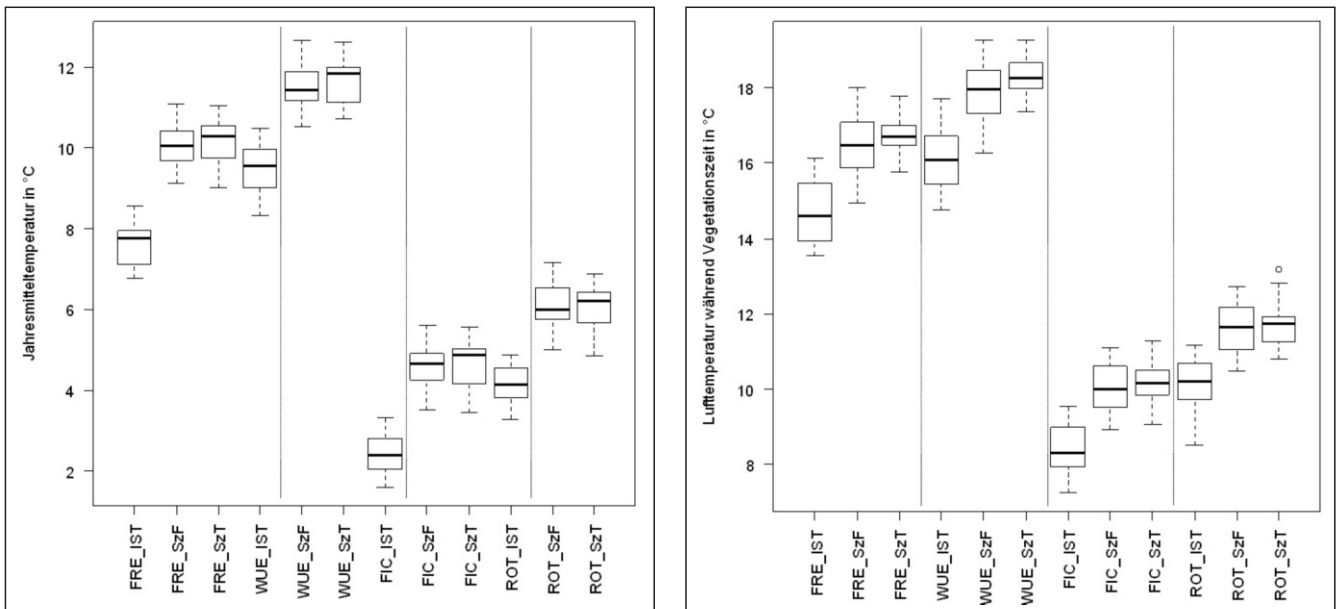


Abb. 3

Mitteltemperatur über das gesamte Jahr (links) sowie für die Vegetationsperiode Mai–September (rechts) (Ist-Klima: IST; Zukunftsszenario trockene Realisation: SzT, Zukunftsszenario feuchte Realisation: SzF).

Average air temperature on annual base (left) and for the growing season from May to September (right) (present-day climate: IST; future scenario dry realisation: SzT, future scenario wet realisation: SzF).

Szenario niedriger ausfällt. Würzburg bildet eine Ausnahme, da hier das feuchte Szenario beim Jahresniederschlag über dem Ist-Klima liegt. Zudem verdeutlichen die Werte, dass insbesondere am Standort Würzburg eine überproportionale Verlagerung der Niederschläge ins Winterhalbjahr stattfindet. Die Werte

für die Stationen Fichtelberg und Roth weisen geringe Unterschiede in den Mittelwerten, jedoch eine zunehmende Variabilität in den Szenarien auf. Deutliche Rückgänge der Niederschläge während der Vegetationsperioden sind bei allen Varianten des Zukunftsszenarios erkennbar.

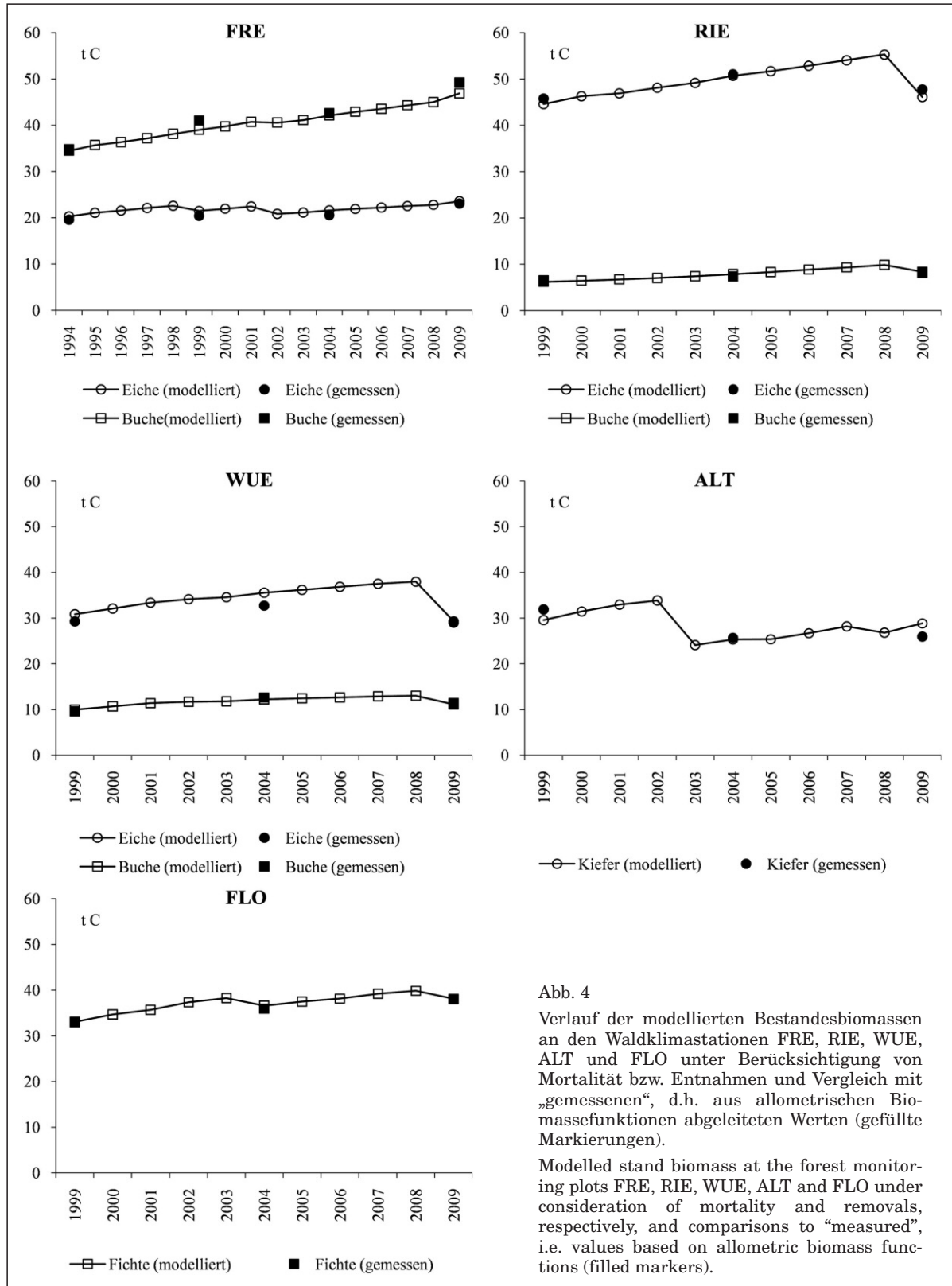


Abb. 4

Verlauf der modellierten Bestandesbiomassen an den Waldklimastationen FRE, RIE, WUE, ALT und FLO unter Berücksichtigung von Mortalität bzw. Entnahmen und Vergleich mit „gemessenen“, d.h. aus allometrischen Biomassefunktionen abgeleiteten Werten (gefüllte Markierungen).

Modelled stand biomass at the forest monitoring plots FRE, RIE, WUE, ALT and FLO under consideration of mortality and removals, respectively, and comparisons to “measured”, i.e. values based on allometric biomass functions (filled markers).

Bei einem Vergleich der zwei Zukunftsszenarien mit dem Ist-Klima nehmen die Durchschnittstemperaturen sowohl im Jahresmittel wie auch im Vegetationsperiodenmittel an allen Stationen signifikant und deutlich zu. Somit zeigt der Parameter Lufttemperatur, der über das Sättigungsdefizit die Verdunstung mit steuert, ein eindeutig gerichtetes Verhalten, während sich bei den Niederschlägen ein differenziertes Bild ergibt.

Die Waldwachstumsmodellierung wurde für 10-jährige Zeiträume durchgeführt. Damit konnten sowohl für das IST-Klima wie auch für die beiden Realisationen des Zukunftsszenarios A1b feucht und A1b trocken je 6 Läufe simuliert werden, deren Mittel- und Extremwerte sich dann vergleichen ließen.

3. ERGEBNISSE

3.1 Entwicklung der stehenden Biomasse

Das Wachstum der Buchen-, Eichen-, Fichten- und Kiefernbestände wurde auf Basis gemessener Witterungsdaten des Zeitraums 1995–2009 für Freising bzw. 2000–2009 für die Standorte Riedenburg, Würzburg, Altdorf und Flossenbürg nachvollzogen. Die standortspezifischen Bodencharakteristika und Bestandeskennwerte des ersten Jahres (1994 für Freising, 1999 für alle anderen WKS) bildeten die Startwerte der Simulationen. Aufsummiert über das Jahr ergaben sich die in *Abbildung 4* dargestellten Verläufe der Bestandesbiomassen bezogen auf die reale Aufnahmefläche.

Wie der Vergleich mit den berechneten Bestandesbiomassen zeigt, stimmen – unter Berücksichtigung von Mortalität bzw. Entnahmen – Modell und Messung gut

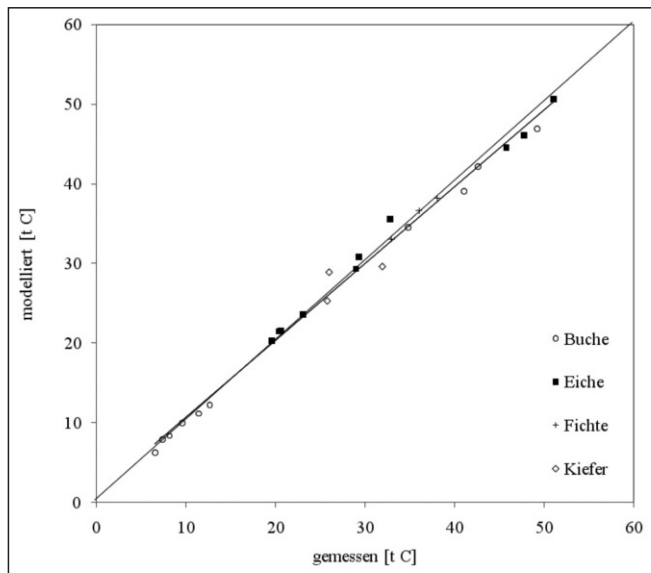


Abb. 5

Vergleich der empirisch bestimmten (= gemessen) Bestandesbiomassen mit modellierten Werten an den Waldklimastationen FRE, RIE, WUE, ALT und FLO für die Jahre 1994 (nur FRE), 1999, 2004 und 2009 nach Anpassung des Modells an den Standort.

Comparison of empirically estimated (= gemessen) stand biomass with simulated values for the plots FRE, RIE, WUE, ALT and FLO of the years 1994 (only FRE), 1999, 2004 and 2009 after site-specific adaptation of the model.

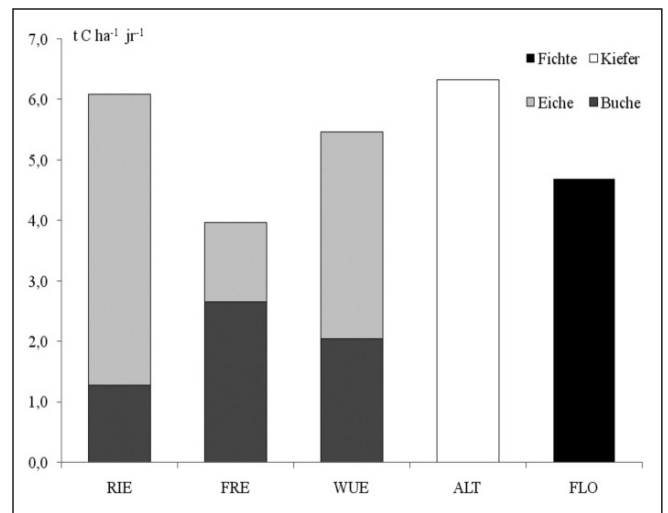


Abb. 6

Jährlicher Biomassenzuwachs im Mittel des Zeitraums 2000–2009 (jährlicher Laub/Nadelfall, jährliche Feinwurzel-seneszenz sowie abgestorbene bzw. entnommene Bäume sind enthalten; WUE: Hainbuchen mit Buchenparametern simuliert, FLO: Tannen als Fichten simuliert, RIE: 16 Ahornbäume sind in der Auswertung nicht berücksichtigt).

Mean annual biomass increment for the period 2000–2009 (annual leaf/needle fall, annual fine root turnover and dead resp. thinned trees are included; WUE: hornbeam trees are simulated with beech parameters, FLO: fir trees are simulated with spruce parameters, RIE: 16 maples are not considered in this study).

überein. Insbesondere für den Fichtenbestand in Flossenbürg, den Eichenbestand in Riedenburg und den Buchenbestand in Freising wurden mit Abweichungen von 0,7%, 2,2% und 2,9% auf Basis der gemessenen Bestandesbiomassen gute Ergebnisse erzielt. Die größten Abweichungen sind beim Kiefernbestand in Altdorf mit 6,7% im Mittel der drei Vergleiche zu finden. Wie gut gemessene und simulierte Bestandesbiomassen der einzelnen Baumarten an den einzelnen Standorten und zu den einzelnen Zeitpunkten übereinstimmen, ist in *Abbildung 5* dargestellt.

Die nahe Lage der Punkte an der Diagonalen zeigt, dass das physiologische Waldwachstumsmodell BALANCE die Bestandesbiomassen an den Waldklimastationen anhand von Witterungsdaten und unter Einbeziehung von Bodenkennwerten und initialen Baumgrößen realitätsnah abbilden kann. Somit lassen sich Szenariosimulationen für die einzelnen Bestände durchführen.

3.2 Mittlere Biomassenzuwächse

Für den mittleren modellierten Jahreszuwachs an Bestandesbiomasse unter Einbeziehung des Laub- bzw. Nadelfalls und des Feinwurzelturnovers sowie unter Berücksichtigung der abgestorbenen bzw. entnommenen Bäume ergeben sich in Abhängigkeit von Standort und Baumart sehr unterschiedliche Werte für den Zeitraum 2000–2009 (*Abb. 6*). Anzumerken ist, dass beim Standort Würzburg Hainbuchen als „Buchen“, beim Standort Flossenbürg Tannen als „Fichten“ simuliert und beim Standort Riedenburg 16 Ahornbäume in der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

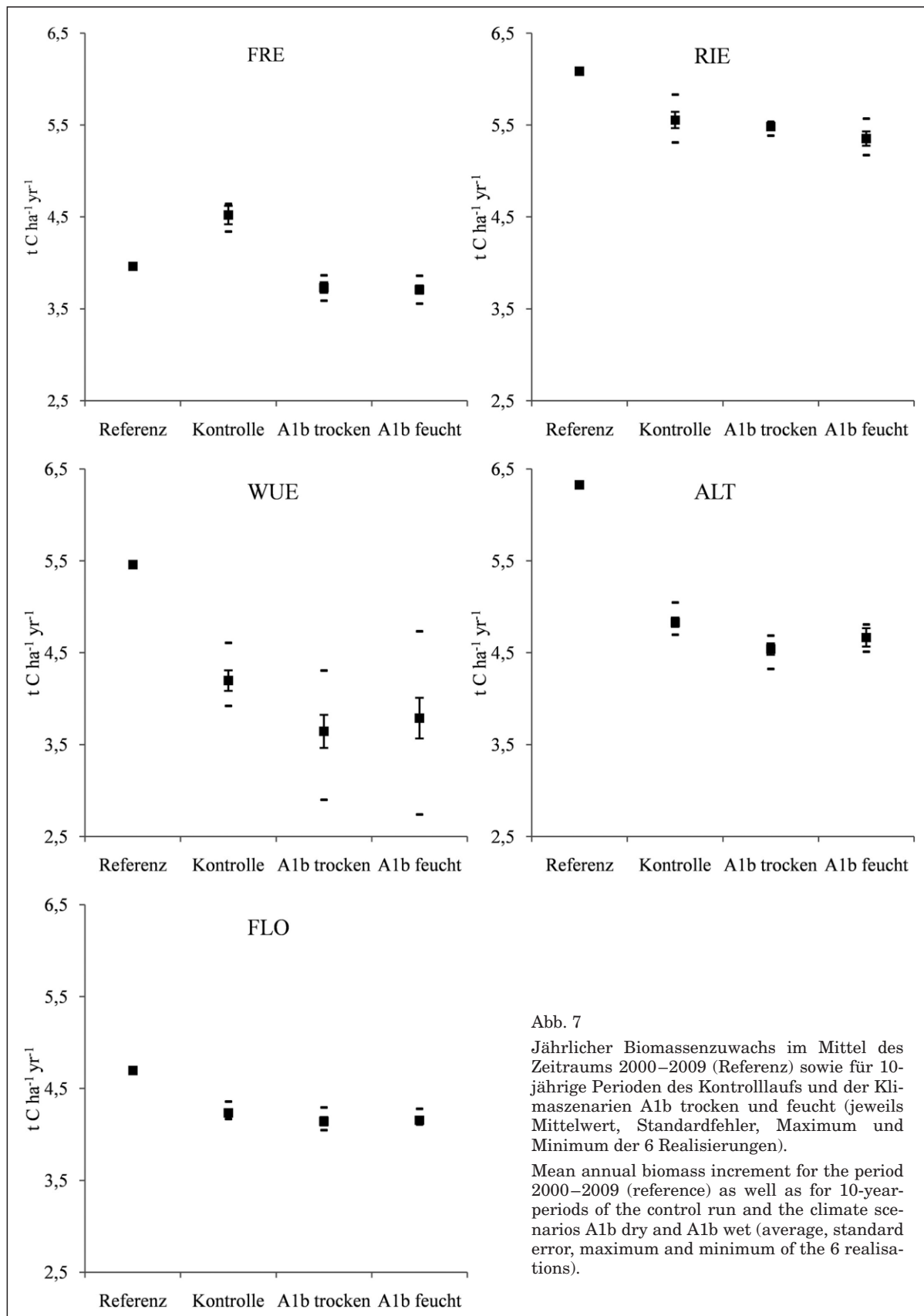


Abb. 7
 Jährlicher Biomassenzuwachs im Mittel des Zeitraums 2000–2009 (Referenz) sowie für 10-jährige Perioden des Kontrolllaufs und der Klimaszenarien A1b trocken und feucht (jeweils Mittelwert, Standardfehler, Maximum und Minimum der 6 Realisierungen).
 Mean annual biomass increment for the period 2000–2009 (reference) as well as for 10-year-periods of the control run and the climate scenarios A1b dry and A1b wet (average, standard error, maximum and minimum of the 6 realisations).

Die Eichen/Buchenbestände weisen für die 10-jährige Periode Zuwachsraten zwischen $4,0 t C ha^{-1} jr^{-1}$ (Freising) und $6,1 t C ha^{-1} jr^{-1}$ (Riedenburg) auf. Für den

Kiefernstandort Altdorf berechnet BALANCE einen jährlichen Zuwachs von $6,3 t C ha^{-1} jr^{-1}$, für den Fichtenstandort Flossenbürg einen Wert von $4,7 t C ha^{-1} jr^{-1}$.

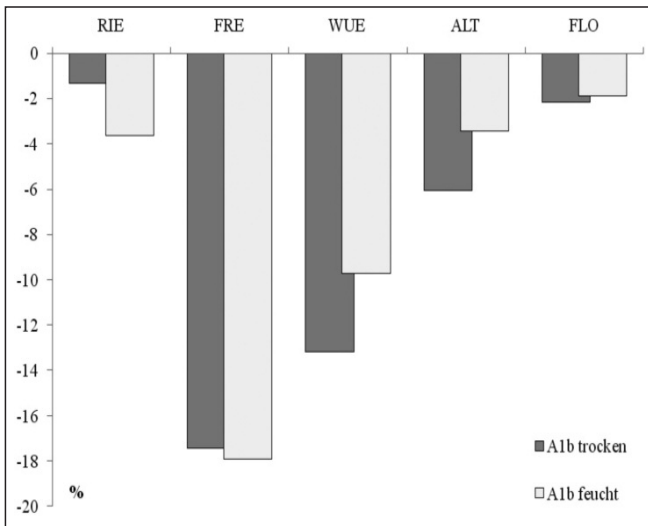


Abb. 8

Prozentualer Rückgang des jährlichen Biomassenzuwachses unter den Bedingungen der Klimaszenarien A1b trocken und A1b feucht (Mittel aus 6 Realisierungen) gegenüber dem Kontrolllauf.
Relative reduction of the mean annual biomass increment for the climate scenarios A1b dry and A1b wet (average of 6 realizations) compared to the control run.

3.3 Kohlenstoffdynamik unter veränderten Klimabedingungen

Die simulierten, mittleren jährlichen Biomassenzuwächse für den Zeitraum 2000–2009 (=Referenz) sowie für die 10-jährigen Perioden des Kontrolllaufs und der

Klimaszenarien A1b trocken und feucht sind in *Abbildung 7* dargestellt.

Es ist erkennbar, dass bei allen Standorten die Ergebnisse des Kontrolllaufs deutlich von den Ergebnissen der Referenzperiode abweichen. Sehr deutlich fallen die Unterschiede für die Standorte Würzburg und Altdorf aus. Lediglich am Standort Freising liegt die Produktivität des Buchen/Eichenbestandes des Kontrolllaufs $0,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ über dem Referenzwert. Niedriger als die Werte des Kontrolllaufs liegen nahezu alle Ergebnisse der einzelnen Realisationen der Klimaszenarien A1b trocken und feucht. Die Produktivitäten unter den künftigen Klimabedingungen des Szenarios A1b (trocken bzw. feucht) verhalten sich konsistent und zeigen durchweg geringere Zunahmen. Dies bedeutet für den Eichen/Buchen-Bestand in Freising, dass unter den angenommenen künftigen Klimabedingungen – bezogen auf das Kontrollscenario – ein Rückgang von 17–18% zu erwarten ist (*Abb. 8*).

Solch hohe Reduktionen sind auf Basis der verwendeten Klimaszenarien an den anderen Standorten nicht vorzufinden. Die Rückgänge liegen zwischen 1,3% für den Eichen/Buchen-Bestand in Riedenburg und 13,2% für den Eichen/Buchen-Bestand in Würzburg, beide unter dem Szenario A1b trocken (*Abb. 8*).

3.4 Ursachen der veränderten Biomassezuwächse

Als mögliche Ursachen der Zuwachsveränderungen wurden der Wasserhaushalt, die Vegetationsdauer, die Blattentwicklung und der Trockenstress näher beleuchtet. *Tabelle 3* zeigt die mittleren Veränderungen über den 10-jährigen Zeitraum für die Klimaszenarien A1b

Tab. 3

Mittlere Veränderungen der Vegetationsdauer bzw. prozentuale Veränderungen der Blattflächenindices LAI, der aktuellen Verdunstungssummen ETa, der Trockenheitsindices ETa/ETp und der Wassernutzungseffizienzen WNE für die Klimaszenarien A1b trocken und A1b feucht (Mittel aus 6 Realisierungen) für Buche, Eiche, Kiefer und Fichte an den Waldklimastationen (Definitionen der einzelnen Parameter: siehe Text).

Mean changes of the length of the growing season resp. relative changes of leaf area index, actual evaporation ETa, drought index ETa/ETp and water use efficiency WNE for the climate scenarios A1b dry and A1b wet (average of 6 realisations) for the beech, oak, pine and spruce forest monitoring plots (Definitions of the parameters: see text).

	Vegetationsdauer [Tage]		LAI [%]		ETa [%]		ETa / ETp [%]		WNE [%]	
	A1b feucht	A1b trocken	A1b feucht	A1b trocken	A1b feucht	A1b trocken	A1b feucht	A1b trocken	A1b feucht	A1b trocken
Buche										
RIE	-1,4	0,7	-2	-1	17	23	-3	-4	-12	-14
FRE	7,5	12,7	-11	-13	11	17	1	1	-12	-16
WUE	-0,6	0	-28	-45	-6	-12	2	3	-12	-16
Eiche										
RIE	6,1	15,1	1	-1	18	23	0	0	-6	-9
FRE	4,3	14,5	-6	-7	16	23	3	4	-10	-13
WUE	2,8	9	-25	-36	-9	-14	1	0	-20	-29
Kiefer										
ALT	-0,4	2,6	7	7	-3	-10	-16	-23	7	14
Fichte										
FLO	3,1	4,6	0	0	18	18	5	0	0	3

trocken und A1b feucht gegenüber den Kontrollläufen für Buche, Eiche, Kiefer und Fichte an den Waldklimastationen.

Gegenüber dem Referenzlauf ist bei den Eichen eine deutliche Verlängerung der Vegetationszeit um bis zu 15,1 Tage (Riedenburg/A1b trocken) zu beobachten. Auch für die Fichte (Flossenbürg) ist die Vegetationszeit zwischen 3,1 (A1b feucht) und 4,6 Tagen (A1b trocken) länger. Bei den Buchenbeständen reicht die Veränderung der Vegetationszeit von einer Verkürzung um 1,4 Tage (Riedenburg A1b feucht) bis hin zu einer deutlichen Verlängerung um 12,7 Tage (Freising, A1b trocken). Ähnliche Verschiebungen wurden für den Kiefernbestand in Altdorf erzielt.

Demgegenüber ist bei der Blattfläche – dargestellt als Blattflächenindex LAI – für alle Buchenbestände ein Rückgang zu erkennen, wenn auch in unterschiedlichem Maße: von –1% in Riedenburg (A1b trocken) bis hin zu –45% in Würzburg (A1b trocken). Das gleiche Bild ergibt sich für die Eiche, während für die Fichte in Flossenbürg keine Änderung der Blattfläche aus der Simulation ersichtlich wurde. Die Blattfläche der Kiefer in Altdorf nahm im Simulationslauf hingegen um 7% zu.

Die Wasserhaushaltssimulationen zeigen an den Standorten Riedenburg, Freising und Flossenbürg höhere tatsächliche Verdunstungsraten. Die Zunahmen liegen zwischen 11% (Freising, Buche, A1b feucht) und 23% (Freising, Eiche und Riedenburg, Buche und Eiche, alle A1b trocken). Am Standort Würzburg und Altdorf sind dagegen Rückgänge von bis zu 14% bzw. 10% zu verzeichnen.

Als Indikator für Trockenheiten wurde das Verhältnis von tatsächlicher zu potenzieller Verdunstung ET_a/ET_p verwendet. Aus *Tab. 3* wird ersichtlich, dass sich im Mittel keine großen Änderungen des Verhältnisses ergeben. Lediglich für den Kiefernbestand in Altdorf ist eine klare Verringerung des Wertes um bis zu 23% vorhanden, d. h. der Trockenstress für die Kiefer erhöht sich. Demgegenüber ist am Standort Flossenbürg für die Fichte unter den Bedingungen des A1b feucht-Szenarios eine Erhöhung des Verhältnisses um 5% berechnet worden, was geringeren Trockenstress bedeutet.

Eindeutig sind die Ergebnisse für die Effizienz der Wassernutzung WNE, die als das Verhältnis von Nettoprimärproduktion zu tatsächlicher Verdunstung definiert wurde: Sie sinkt für alle Buchen- und Eichenbestände um bis zu 29%. Hingegen sind für die Fichte (Flossenbürg) sowie für die Kiefer (Altdorf) Steigerungen der Wassernutzungseffizienz um bis zu 3% bzw. 14% (A1b trocken) sichtbar.

4. DISKUSSION

Mit Hilfe des physiologischen Wachstumsmodells BALANCE wurden die Biomassen und die Zuwächse von drei Buchen/Eichen-Beständen sowie je einem Fichten- und einem Kiefernbestand modelliert, die alle Teil des bayerischen Waldklimamessnetzes sind. Neben Simulationen für das gegenwärtige Klima (2000–2009) wurden auch Veränderungen des Wachstums unter den WETTREG-Klimaszenarien A1b feucht und A1b trocken untersucht.

4.1 Entwicklung der stehenden Biomasse und mittlere Biomassenzuwächse

Wie bereits frühere Untersuchungen gezeigt haben (z. B. RÖTZER et al., 2010; RÖTZER et al., 2012; RÖTZER und PRETZSCH, 2012), lassen sich mit klimasensitiven physiologischen Simulationsmodellen wie BALANCE Wachstumsreaktionen auf veränderte Klima- und Umweltbedingungen abbilden. Wichtig ist jedoch, dass das Modell zunächst an den Standort bzw. die Region angepasst und auf Plausibilität getestet wird (FONTES et al., 2010). Die für die Waldklimastationen erzielten Simulationsergebnisse geben die Zuwächse und Bestandesbiomassen an den jeweiligen Waldklimastationen im Vergleich mit Werten, die auf Basis von Messwerten (Durchmesser und Höhe) mit Hilfe von allometrischen Biomassegleichungen berechnet wurden, plausibel wieder (*Abb. 3* und *4*).

Die für die einzelnen WKS modellierten jährlichen Zuwächse liegen in Bereichen, die andere Autoren für die einzelnen Baumarten unter ähnlichen Umweltbedingungen angeben (PRETZSCH, 1999; PRETZSCH et al., 2012). Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Basierend auf einen "Turnover"-Faktor von 1,6, den PRETZSCH (2009) für Buche (Mittelwert verschiedener Autoren) angibt, lässt sich die Nettoprimärproduktion in Biomassezuwachs umrechnen. Nach MUND et al. (2010) liegt der auf diese Weise berechnete Biomassezuwachs eines alten Buchenmischbestands in Mitteldeutschland bei $4,6 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (2000–2005), während nach BERGH et al. (2003) der jährliche Biomassezuwachs eines dänischen Buchenbestandes (initiale Höhe 13,4 m, 800 Bäume pro ha) $4,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ beträgt. PRETZSCH et al. (2012) berechneten für zwei Buchenreinbestände im Kranzberger Forst bei Freising mittlere Jahresbiomassenzuwächse zwischen $3,7$ und $5,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Die für die Waldklimastationen auf einen Hektar hochgerechneten jährlichen Biomassezuwächse betragen $4,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ am Standort Riedenburg, $3,7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ am Standort Freising und $3,6 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ am Standort Würzburg.

4.2 Kohlenstoffdynamik unter veränderten Klimabedingungen

Vergleicht man die langjährigen Klimawerte der Referenzperiode mit denen des Kontrolllaufs (Ist-Klima), erscheint die Übertragung der Werte der nahegelegenen WETTREG-Stationen (Freising, Würzburg) auf die jeweiligen Waldklimastationen als gut, während sich bei den anderen eine lediglich geringe Abweichungen (Riedenburg) bzw. deutliche Unterschiede (Altdorf, Flossenbürg) ergeben. Trotz aller Übertragungsprobleme kann jedoch immer ein Vergleich zwischen Kontrolllauf und trockenem bzw. feuchtem Zukunftsszenario gezogen werden. Zwar wird hier mit der Spannweite zwischen trockener und feuchter Niederschlagsrealisation der Unsicherheit bei der Zukunftsprojektion Rechnung getragen, es muss aber berücksichtigt werden, dass es sich um ein regionales Klimamodell handelt, das auf einem Emissionsszenario sowie einem zugehörigen Lauf eines Globalmodells beruht und deshalb lediglich einen Ausschnitt künftig möglicher Klimazustände darstellt (JACOB et al., 2012). Bezogen auf die Kontrollläufe erge-

ben sich an einzelnen Waldklimastationen unterschiedliche Veränderungen der jährlichen Biomassezuwächse. Die Simulationsergebnisse für wärmere und trockenere Wuchsbedingungen zeigten Rückgänge von über 10% für die Eichen/Buchen-Bestände der Waldklimastationen Freising und Würzburg. Geringere Reduktionen wurden dagegen für die Bestände an den Stationen Riedenburg (Eiche/Buche), Altdorf (Kiefer) und Flossenbürg (Fichte) sichtbar.

4.3 Ursachen der veränderten Biomassezuwächse

Die Ursachen der unterschiedlich stark ausgeprägten Veränderungen können vielfältig sein. So sind zum Beispiel aufgrund der Höhenlage des Standorts Flossenbürg unter den unterstellten künftigen Klimabedingungen die Änderungen beim jährlichen Biomassezuwachs des Fichtenbestandes gering, was angesichts einer Zunahme der Vegetationsdauer, eines verbesserten Wasserhaushalts und wenig Änderungen bei den Trockenperioden an diesem Standort (*Abb. 1, Tab. 3*) plausibel erscheint.

Andererseits lassen sich die Zuwachsrückgänge des Buchen/Eichen-Bestandes in Freising in Höhe von ca. 18% durch eine verringerte Blattmasse sowie eine niedrigere Wassernutzungseffizienz erklären. Noch stärkere Rückgänge werden durch eine verlängerte Vegetationszeit sowie eine bessere Wasserverfügbarkeit (höhere tatsächliche Verdunstungssummen) kompensiert. Gleiches gilt für den Eichen/Buchen-Bestand in Würzburg, wobei an diesem Standort die tatsächliche Verdunstungssumme aufgrund der starken Abnahme der transpirierenden Blattmasse zurückgeht. Die Kiefer in Altdorf zeigt mit dem moderaten Rückgang des Biomassezuwachses, dass sie die Fähigkeit hat, sich an die weitere Verschlechterung der bereits ungünstigen Standortbedingungen anzupassen.

Insgesamt erkennt man deutliche Veränderungen der Biomassezuwächse von Waldbeständen unter veränderten möglichen Klimabedingungen. In welchem Ausmaße diese Verschiebungen stattfinden, ist stark von der Baumart, den Standortbedingungen (geografische Lage, Boden, etc.), der Bestandesstruktur und dem Ausmaß der klimatischen Änderungen abhängig. Mit physiologischen Modellen wie BALANCE können unterschiedliche Szenarien berechnet werden, wobei sich auch Ursachen und Kausalitäten der Veränderungen analysieren lassen.

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Waldwachstum abschätzen zu können, muss in Zukunft auch der Einfluss der steigenden CO₂-Konzentration der Atmosphäre mit in die Betrachtung aufgenommen werden. Über dessen Einfluss und Größenordnung herrscht jedoch noch weitgehend Unklarheit (z. B. BUGMANN und BIGLER, 2011; KÖRNER, 2006). Ferner sind auch Nährstoffkreisläufe wie die von Stickstoff oder Phosphor zu beachten, da Feedback- und Feedforwardreaktionen die Wachstumsraten stark beeinflussen können (MAGNANI et al., 2007; DE VRIES et al., 2006).

Die Waldwachstumssimulationen zeigen, dass sich der Klimawandel unter den WETTREG-Szenario A1b Bedingungen bei gleichbleibender CO₂-Konzentration negativ auf die Biomasseproduktion auswirken wird. Die zu-

künftigen Zuwächse bleiben dabei jedoch in einer Größenordnung, welche die Forstwirtschaft mit der vorgefundenen Bestockung nicht grundsätzlich einschränkt. Waldleistungen wie Holzversorgung und Kohlenstoffspeicherung würden sich allerdings verringern. Einen starken Rückgang in unseren Szenariosimulationen zeigte der Standort Freising, der aufgrund seines tiefgründigen Lössbodens eigentlich ein sehr günstiger Standort ist, während der wegen seiner geringen Wasserspeicherfähigkeit ungünstigste Sandstandort in Altdorf nur geringe Einbußen im Biomassezuwachs zeigt. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass an Wassermangel angepasste Baumarten bzw. Bestände sich besser auf weitere Einschränkungen einstellen können.

5. DANKSAGUNG

Die vorliegende Untersuchung ist Teil des KLIP22-Projekts „Die Kohlenstoffspeicherung der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft“ und wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanziert. Unser Dank gilt zudem der Abteilung 3 Waldbau und Bergwald der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft für die Bereitstellung forstlicher Daten zu den Waldklimastationen. Für die Bereitstellung der WETTREG2006-Klimaszenarien danken wir der Firma Meteo-Research/CEC Potsdam sowie dem Umweltbundesamt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Forstwirtschaft ist bereits heute durch veränderte klimatische Rahmenbedingungen, insbesondere durch Änderungen der Niederschlagsverteilung und Temperaturzunahmen, beeinflusst. Um künftig stabile Wälder zu erhalten, müssen die Auswirkungen des Klimawandels für die Zukunft abgeschätzt werden. Neben generellen Informationen wie Verbreitungsmodelle für einzelne Baumarten werden auch Modelle benötigt, die das zukünftige Wachstumspotential verschiedener Baumarten abschätzen. Das einzelbaumorientierte Wachstumsmodell BALANCE ermöglicht, die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf die Biomasseproduktion abzubilden. Für die fünf Waldklimastationen (WKS) Freising, Flossenbürg, Altdorf, Würzburg und Riedenburg konnte damit das Wachstum der Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche simuliert werden, wobei die Entwicklung der Biomasse für den Zeitraum 1999–2009 sowie für verschiedene Klimaszenarien modelliert wurde. Ein Vergleich mit Biomassen, die auf Basis von Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe berechnet wurden, mit den Ergebnissen der Modellrechnungen zeigt, dass BALANCE geeignet ist, die Biomasseentwicklung der Untersuchungsbestände zu abbilden (*Abb. 4 und 5*). Die maximale Abweichung zwischen modellierten und gemessenen Werten lag bei 6,7% (Altdorf, Kiefer).

Die Ergebnisse für das Klimaszenario A1b (trocken bzw. feucht) zeigen an allen 5 WKS eine Abnahme der Biomasseproduktivität, wobei die Produktivitätsminderung je nach WKS sehr unterschiedlich ausfiel. An der WKS Freising waren die Produktivitätseinbußen mit ca. –18% am höchsten und an der WKS Riedenburg mit –1,3% am geringsten (*Abb. 8*). Die Gründe für die

unterschiedlichen Veränderungen sind vielfältig und hängen in hohem Maße von den Standortbedingungen ab (Tab. 3). So verbessern sich beispielsweise in den Klimaszenarien die klimatischen Bedingungen der hoch gelegenen WKS Flossenbürg durch höhere Temperaturen, eine längere Vegetationsperiode und eine verbesserte Wasserversorgung. Im Gegenzug dazu verursachen Klimaänderungen in Freising eine Verringerung der Blattbiomasse und der Wassernutzungseffizienz, was durch eine längere Vegetationsperiode nicht in vollem Umfang kompensiert werden kann und zu deutlich geringeren Biomassezuwächsen führt. Zukünftige Arbeiten sollten neben Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das Biomassewachstum von Bäumen auch die damit einhergehende Erhöhung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre berücksichtigen.

7. SUMMARY

Title of the paper: *Modelling biomass increment of Bavarian forest monitoring plots under present and possible future climate conditions.*

Forestry is already influenced by changed climatic conditions, especially through changed precipitation patterns and increased temperature. The effects of climate change on forest growth must be estimated in order to obtain stable forests for the future. In addition to general information like tree species distribution models for the site-species matching, models are required which are able to predict future growth potentials for different tree species. The individual tree based growth model BALANCE is able to predict the consequences of changed environmental conditions on biomass production. This model was applied to the five Bavarian forest monitoring plots (WKS) Freising, Flossenbürg, Altdorf, Riedenburg and Würzburg where spruce, pine, beech and oak trees are growing. Biomass development was modelled for the period 1999 to 2009 as well as for future climate conditions. A comparison of the biomass values, which were calculated on base of breast height diameter and tree height, with the results of the model calculations shows that BALANCE is able to realistically simulate the biomass development of the WKS stands (Fig. 4 und 5). The maximum deviation between modeled and empirically derived values was 6.7% (Altdorf, pine).

The results for the climate scenario A1b (dry and moist, respectively) showed a decrease of the biomass production at all five WKS, the level of decrease, however, varied clearly with the WKS. The highest decrease was found at the WKS Freising with -18% and the lowest decrease at the WKS Riedenburg with -1.3% (Fig. 8). A outcome of the analysis of the scenario simulation was that reasons for the different changes are complex and depend strongly on the site characteristics for each single stand (Tab. 3). For example, the climatic conditions for the high-elevation WKS Flossenbürg had improved in the scenarios due to higher temperature, longer growing seasons and a better water supply. In contrast, climatic changes in Freising cause decreased leaf biomass values and a reduced water-use efficiency which cannot be completely compensated by a longer growing season. This finally led to decreased biomass increments. Addi-

tionally to the impact of climatic changes future studies should also include the increasing atmospheric CO₂ concentration when modeling forest growth in the face of climate change.

8. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Modélisation de l'accroissement de biomasse dans des stations climatiques forestières de Bavière, sous des conditions climatiques actuelles et également sous des conditions climatiques envisageables dans l'avenir.*

La gestion forestière est influencée, aujourd'hui déjà, par des conditions climatiques modifiées, en particulier par le changement de la répartition des précipitations et par les augmentations de température. Pour maintenir des forêts stables dans l'avenir, les répercussions du changement climatique doivent être évaluées pour le futur. À côté d'informations générales telles que les modèles de propagation des espèces, des modèles estimant le potentiel futur de la croissance de différentes espèces ligneuses seront également nécessaires. Le modèle de croissance des arbres pris individuellement, BALANCE, permet de reproduire les effets des conditions modifiées du climat sur la production de biomasse. Pour les cinq stations climatiques forestières (WKS) de Freising, Flossenbürg, Altdorf, Wurtzbourg et Riedenburg la croissance des espèces telles que l'épicéa, le pin sylvestre, le hêtre et le chêne, a pu être simulée à l'aide de ce modèle, ce qui a permis de modéliser le développement de la biomasse pour la période 1998–2009 ainsi que pour les différents scénarios climatiques. Une comparaison entre des biomasses qui ont été calculées sur la base de diamètres mesurés à 1 m 30 et de hauteurs d'arbres, et les résultats de calculs de modèles, montre que BALANCE est bien adapté pour reproduire le développement de la biomasse des peuplements des parcelles expérimentales (Figures 4 et 5). L'écart maximum entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées se situait autour de 6,7% (Altdorf, pin sylvestre).

Les résultats pour le scénario climatique A1b (sec ou humide) montrent, dans toutes les 5 stations climatiques, une perte de productivité de biomasse, même si la diminution de productivité apparut très différente suivant les stations climatiques. À la station de Freising les pertes de productivité étaient les plus importantes avec un taux de 18% en moins environ, tandis qu'à la station de Riedenburg elles étaient les plus faibles avec un taux de 1,3% en moins (Figure 8). Les raisons de ces modifications différentes sont multiples et dépendent en grande partie des conditions écologiques stationnelles (Tableau 3). Ainsi, par exemple, dans les scénarios climatiques, les conditions climatiques de la station d'altitude de Flossenbürg s'améliorent par le biais de hautes températures, d'une période de végétation plus longue et d'une meilleure alimentation en eau. À contrario les changements climatiques de Freising ont causé une diminution de la biomasse foliaire et de l'efficacité de l'alimentation en eau, ce qui ne peut pas être compensé dans sa totalité par une plus longue période de végétation et qui, finalement, conduit à des accroissements de biomasse nettement plus faibles. Au surplus, les travaux

futurs doivent aussi prendre en considération, à côté des répercussions des changements climatiques sur la croissance de la biomasse des arbres, l'élévation concomitante de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

9. LITERATUR

- ABER, J. D., S. C. OLLINGER, C. A. FEDERER, P. B. REICH, M. L. GOULDEN, D. W. KICKLIGHTER, J. M. MELILLO und R. G. LATHROP (1995): Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research* **5**: 207–222.
- ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES und M. SMITH (1998): Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.
- BERGH, J., M. FREEMAN, B. D. SIGURDSSON, S. KELLOMÄKI, K. LAITINEN, S. NIINISTÖ, H. PELTOLA und S. LINDER (2003): Modelling the short term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology Management* **183**: 327–340.
- BUGMANN, H. und C. BIGLER (2011): Will the CO₂ fertilization effect in forests be offset by reduced tree longevity? *Oecologia* **165**: 533–544.
- BURSHEL, P., E. KÜRSTEN und B. C. LARSON (1993): Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt. Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe der forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt **126**, 135 S.
- CRUTZEN, P. J. (2002): Geology of mankind: The Anthropocene. *Nature* **415**: 231–243.
- DE VRIES, W., G. J. REINDS, P. GUNDERSEN und H. STERBA (2006): The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Global Change Biology* **12**: 1151–1173.
- DIETRICH, H. P., D. RASPE und C. SCHULZ (2006): Waldklimastationen-Säule forstlicher Umweltbeobachtung-LWF liefert Politik für handfeste Zahlen- AFZ/Der Wald **18**, 61. Jgg., S. 972–974.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2012): Der Klimawandel wird auch auf Deutschland deutliche Auswirkungen haben. Zur Eröffnung des Extremwetterkongresses: Interview des ZDF mit Dr. Paul Becker, Vizepräsident des DWD. Abgefragt im September 2012: <http://www.dwd.de/klimawandel>.
- FONTES, L., J. D. BONTEMPS, H. BUGMANN, M. VAN OIJEN, C. GRACIA, K. KRAMER, M. LINDNER, T. RÖTZER und J. P. SKOVSGAARD (2012): Models for supporting forest management in a changing environment. *Forest Systems* **19**: 8–29.
- GÖTTLEIN, A. und W. WEIS (2011): Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für die bayerische Forstwirtschaft. Abschlussbericht B67. TU München, Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt. 40 S.
- GROTE, R. (1998): Integrating dynamic morphological properties into forest growth modeling. II. Allocation and mortality. *Forest Ecology Management* **111**: 193–210.
- GROTE, R. (2003): Estimation of crown radii and crown projection area from stem size and tree position. *Ann. Forest Science* **60/5**: 393–402.
- GROTE, R. und H. PRETZSCH (2002): A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology* **4**: 167–180.
- HAXELTINE, A. und I. C. PRENTICE (1996): A general model for the light use efficiency of primary production by terrestrial ecosystems. *Functional Ecology* **10**: 551–561.
- IPCC (2001): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Third Assessment Report. *Climate Change 2001: The Scientific Basis; Impacts, Adaptation & Vulnerability; Mitigation*. Cambridge University Press.
- 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JACOB, D., K. BÜLOW, L. KOTOVA, C. MOSELEY, J. PETERSEN und D. RECHID (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. Climate Service Center CSC-Report **6**.
- KLEIN, D. und C. SCHULZ (2012): Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft. Projektabschlussbericht 09/2012. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. 178 S.
- KÖLLING, C., T. KNOKE, P. SCHALL und C. AMMER (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* **80**: 42–54.
- KÖLLING, C., B. BEINHOFER, A. HAHN und T. KNOKE (2010): Wie soll die Forstwirtschaft auf neue Risiken im Klimawandel reagieren? *AFZ/Der Wald* **5**: 18–22.
- KÖRNER, C. (2006): Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytologist* **172**(3): 393–411.
- MCMAHON, S., G. G. PARKERA und D. R. MILLER (2010): Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings National Academy of Science USA* **107**: 3611–3615.
- MAGNANI, F., M. MENCUCINI, M. BORGHETTI, P. BERBIGIER, F. BERNINGER, S. DELZON, A. GRELE, P. HARI, P. G. JARVIS, G. KOLARI, A. S. KOWALSKI, H. LANKREIJER, B. E. LAW, A. LINDROTH, D. LOUSTAU, G. MANCA, J. B. MONCRIEFF, M. RAYMENT, V. TEDESCHI, R. VALENTINI und J. GRACE (2007): The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* **447**: 848–850.
- MÄKELÄ, A. (1990): Modeling structural-functional relationships in whole-tree growth: Resource allocation. In: "Process modeling of forest growth responses to environmental stress." DIXON, R. K., R. S. MELDAHL, G. A. RUARK und W. G. WARREN (eds.), Timber Press, Portland, Oregon, USA, Pp. 81–95.
- MUND, M., W. L. KUTSCH, C. WIRTH, T. KAHL, A. KNOHL, M. V. SKOMARKOVA und E. D. SCHULZE (2012): The influence of climate and fructification on the interannual variability of stem growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest. *Tree Physiology* **30**: 689–704.
- OFFENTHALER, I. und E. HOCHBICHLER (2006): Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science* **1/2**, S. 65–86.
- PARMESAN, C. und G. YOHE (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**: 37–42.
- PENNING DE VRIES, F. W. T., D. M. JANSSEN, H. F. M. TEN BERGE und A. BAKEMA (1989): Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Simulation Monographs* **29**. PUDOC, Wageningen, The Netherlands.

- PRETZSCH, H. (1992): Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. Allg. Forst- und Jagdzeitung **163** (11/12): 203–213.
- PRETZSCH, H. (1999): Waldwachstum im Wandel, Konsequenzen für Forstwissenschaft und Forstwirtschaft, Forstwiss. Cbl., **118**: 228–250.
- PRETZSCH, H. (2009): Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model, Springer, Berlin, Heidelberg, 664 p.
- PRETZSCH, H. und J. ĎURSKÝ (2002): Growth Reaction of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.) to Possible Climatic Changes in Germany. A Sensitivity Study. Forstwiss. Centralblatt. **121**: 145–154.
- PRETZSCH, H., J. DIELER, T. SEIFERT und T. RÖTZER (2012): Climate effects on productivity and resource use efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in stands with different spatial mixing patterns. Trees, DOI 10.1007/s00468-012-0710-y.
- PREUHLER, T. (1993): Bayerische Waldklimastationen Jahrbuch 1993. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 479 S.
- PREUHLER, T. und M. KENNEL (1996): Bayerische Waldklimastationen Jahrbuch 1996. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 113 S.
- PREUHLER, T., H. P. DIETRICH und W. GRIMMEISEN (2000): Bayerische Waldklimastationen Jahrbuch 2000. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 148 S.
- RÖTZER, T., R. GROTE und H. PRETZSCH (2004): The timing of bud burst and its effect on tree growth. International Journal of Biometeorology **48**(3): 109–118.
- RÖTZER, T., R. GROTE und H. PRETZSCH (2005): Effects of environmental changes on the vitality of forest stands. European Journal of Forest Research **124**(4): 349–362.
- RÖTZER, T., T. SEIFERT und H. PRETZSCH (2009): Modelling above and below ground carbon dynamics in a mixed beech and spruce stand influenced by climate. European Journal of Forest Research **128**(2): 171–182.
- RÖTZER, T., M. LEUCHNER und A. J. NUNN (2010): Simulating stand climate, phenology, and photosynthesis of a forest stand with a process based growth model. International Journal of Biometeorology **54**(4): 449–464.
- RÖTZER, T., T. SEIFERT, S. GAYLER, E. PRIESACK und H. PRETZSCH (2012): Effects of stress and defence allocation on tree growth – simulation results at the individual and stand level. In: "Growth and Defence in Plants." MATYSSEK, R., SCHNYDER, H., OSSWALD, W., ERNST, D., MUNCH, C. und H. PRETZSCH (eds.): Ecol. Studies 220, DOI 10.1007/978-3-642-30645-7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- RÖTZER, T. und H. PRETZSCH: Tree growth and resource allocation in forest stands: Empirical evidence reflected by scenario analysis. Forest Science, in review.
- ROLOFF, A. und B. GRUNDMANN (2008): Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel. Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie **42**: 97–109.
- ROOT, T. L., J. T. PRICE, K. R. HALL, S. H. SCHNEIDER, C. ROSENZWEIG und J. A. POUNDS (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature **421**: 57–60.
- SCHMIDT, O., H. P. DIETRICH, W. GRIMMEISEN und S. RASPE (2001): Bayerische Waldklimastationen Jahrbuch 2001. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 131 S.
- SHINOZAKI, K., K. YODA, K. HOZUMI und T. KIRA (1964): A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analyses. Japanese Journal of Ecology **14**: 97–105.
- SPEKAT, A., W. ENKE und F. KREIENKAMP (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1b und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“, Mitteilungen des Umweltbundesamtes, 149 S.
- THORNLEY, J. H. M. (1999): Modelling Stem Height and Diameter Growth in Plants. Ann. Bot. **84**: 195–205.
- THORNLEY, J. H. M. und M. G. R. CANNELL (2000): Modelling the Components of Plant Respiration: Representation and Realism. Ann. Bot. **85**: 55–67.
- WUTZLER, T., C. WIRTH und J. SCHUMACHER (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe – predictions and components of uncertainty. Canadian Journal of Forest Research **38**: 1661–1675.
- WALTHER, G. R., E. POST, P. CONVEY, A. MENZEL, C. PARMESAN, T. J. BEEBEE, J. M. FROMENTIN, O. HOEGH-GULDBERG und F. BAIRLEIN (2002): Ecological responses to recent climate change. Nature **416**: 389–395.
- ZEBISCH, M., T. GROTHMANN, D. SCHRÖTER, C. HASSE, U. FRITSCH und W. CRAMER (2005): Climate Change in Germany, Vulnerability and Adaptation of climate sensitive Sectors. In: 10/5 (ed. Mahrenholz, P.). Umweltbundesamt Dessau, 205 S.
- ZELL, J. (2008): Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg. 152 S.