

Ein neuer Modellansatz zur Analyse veränderter Konkurrenzbeziehungen in Klimaszenarien

Werner Poschenrieder¹, Rüdiger Grote², Hans Pretzsch¹

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

² Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Kreuzeckbahnstr. 19
82467 Garmisch-Partenkirchen

Zusammenfassung

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Weiterentwicklung forstlicher Simulationsmodelle ist es, zu verstehen und zu beschreiben, wie die Konkurrenzbedingungen zwischen den Bestandesbäumen in Bezug auf Szenarien zukünftigen Klimas reagieren, da das Konkurrenzmuster die Wirkung von Durchforstungen und Mitigationsmaßnahmen erheblich mibestimmt. Physiologische Modelle, die die dem Wachstum zugrunde liegenden Prozesse mechanistisch beschreiben, sind besonders geeignet, unser Systemverständnis zu erweitern. Das physiologische Kohortenmodell MoBiLE-PSIM (kurz MoBiLE) stellt die Bestandesstruktur als ein Ensemble artdifferenzierter, miteinander konkurrierender Kohorten dar, wobei angenommen wird, dass jede Kohorte aus identischen Bäumen besteht, die auf einem regulären Raster angeordnet stehen. Es beschreibt die Konkurrenz um ober- und der unterirdische Ressourcen und bestimmt daraus die Dynamik der Durchmesser-Zuwachsverteilung innerhalb einer idealisierten Bestandesstruktur, die es erlaubt, jede Kohorte durch einen einzelnen Baum durchschnittlicher Abmessungen und mit typischen Konkurrenzbedingungen darzustellen. Der Gewinn an Rechenzeit im Vergleich zum physiologischen Einzelbaummodell beträgt bis zu einer Größenordnung. Im Rahmen dieser Studie wurde MoBiLE mit einem Einzelbaummodul erweitert, das auf Konkurrenz-Beschreibungen des beobachtungsbasierten Simulationsmodelles SILVA beruht. MoBiLE und das neue Modul wurden in beiden Richtungen auf der Zeitskala von einem Jahr gekoppelt. Ein Interpolationsverfahren bildet den Volumenzuwachs der Kohorte auf das Volumen- und Dimensionswachstum der Einzelbäume ab und gibt die resultierenden Kohortendimensionen zurück an das physiologische Hauptmodell. Das Verfahren erlaubt es, den Bestand in seiner komplexen Struktur darzustellen und erhält dabei die schlanke Parametrierung und Geschwindigkeit des Kohortenmodells. Eine erste Auswertung unter trockenen Bedingungen innerhalb eines einschichtigen Bestandes von Rotbuche (*Fagus sylvatica* (L.)) zeigt eine realitätsnahe Wiedergabe der Durchmesserentwicklung.

Summary

One of the most important prerequisites for the development of advanced simulation models in forestry is to understand and to describe how individual tree competition is affected by scenarios of future climate, because the pattern of competition is likely to strongly determine the effect of thinning and mitigation measures. Physiological models that use a mechanistic description of the underlying processes are particularly suited to expand our system knowledge. The physiological cohort model MoBiLE-PSIM (short MoBiLE) represents the stand as an ensemble of spatially interacting single species cohorts, where each cohort consists of trees that are identical in dimension and are ordered on a regular grid. It describes the competition for above- and belowground resources and the according dynamics of the growth to diameter distribution within an idealized stand structure that allows to represent each cohort by one single tree of average dimension. The gain in computation speed with respect to the physiological individual tree model amounts to one order of magnitude. In this study MoBiLE has been expanded by an individual tree module that is based on competition principles of the observation-based forest simulator SILVA. A two way coupling approach on a timescale of one year has been used, that maps the cohort volume increase to the individual tree volume and dimensional growth and returns the resulting cohort dimensions back to the physiological main model. It allows to represent the stand in its complex structure and thereby preserve the lean parameterization and speed of the stand-alone cohort model. A first evaluation under dry conditions within a single layered stand of European beech (*Fagus sylvatica* (L.)) indicates a realistic representation of diameter development.

Einleitung

Simulationsmodelle spielen eine zunehmend wichtige Rolle als Werkzeuge, die den forstlichen Entscheidungsträger in seiner Aufgabe unterstützen, multifunktionale Nachhaltigkeit zu gewährleisten. (MUYS et al. 2010). Der am weitesten verbreitete Modelltyp in der Praxis ist das beobachtungsbasierte Einzelbaummodell (PRETZSCH et al. 2008). Es beruht auf der langzeitlichen Beobachtung von Versuchsflächen und liefert verlässliche Prognosen des Vorrates, Wachstums, der Entnahme oder sogar von Struktur und Diversität unter den beobachtbaren Umweltbedingungen.

Reale Forstsysteme sind heute dem Klimawandel ausgesetzt (SAXE et al., 2002, BOISVENUE und RUNNING, 2006), in Kombination mit einer stetigen Zunahme des Bodenstickstoffgehaltes und der atmosphärischen CO₂-Konzentration, die von der fortdauernden Einwirkung atmosphärischer Schadstoffe begleitet werden (OLLINGER et al. 2002). Insbesondere ist zu erwarten, dass sich die interannuelle und die intraannuelle Variabilität

der Witterung in Zukunft ändern. Alle diese Umwelteinflüsse wirken auf verschiedene physiologische Prozesse die wiederum miteinander interagieren (LÖW et al. 2003; MATYSSEK et al. 2006) so dass der Gesamteffekt stark abhängig von der interannuellen Variabilität der Witterung ist (KUBISKE et al. 2006). Daher ist es naheliegend, dass sich die beobachtete Beziehung zwischen integrierten beobachteten Klimavariablen und dem Wachstum ändert (PORTE und BARTELINK 2002).

Daraus entsteht ein zusätzlicher Bedarf an Modellen, die den Einfluss verschiedener Triebkräfte und chemischer Randbedingungen in bisher nicht beobachtbarer Kombination wiedergeben können. Einzelbaumbasierte physiologische Modelle (GROTE und PRETZSCH 2002, RÖTZER et al. 2005) beschreiben die zugrundeliegenden Prozesse des Wachstums auf tiefer Prozessebene. Als Einzelbaummodelle sind sie jedoch vergleichsweise langsam und sehr sensitiv auf Unsicherheiten in der Initialisierung (FONTES et al. 2010). Um die Komplexität des physiologischen Einzelbaummodelles zu reduzieren und dabei den hohen Grad an mechanistischer Beschreibung zu erhalten, haben z.B. GROTE et al. (2011) mit dem Modellsystem MoBiLE-PSIM die Bestandesstruktur als ein Ensemble artdifferenzierter, miteinander konkurrierender Kohorten beschrieben, wobei angenommen wird, dass jede Kohorte aus identischen Bäumen besteht, die auf einem regulären Raster angeordnet stehen. Wird von dieser Betrachtung ausgegangen, kann die Konkurrenzsituation im Bestand mit einem einzigen Baum pro Art und Schicht beschrieben werden, was die Geschwindigkeit um eine Größenordnung erhöht.

Ein wichtiges Qualitätskriterium für Einzelbaummodelle ist die korrekte Darstellung der jährlichen Durchmesser-Zuwachsverteilung: Nach einer zunehmend fundierten Theorie (SCHWINNING und WEINER 1998, WICHMANN 2001, 2002, PRETZSCH und BIBER 2010, PRETZSCH und DIELER 2010) steht die Verteilung zwischen den einzelnen Baumklassen dabei mit der ober- und unterirdischen Konkurrenz in Verbindung. Das heißt, dass bei ausreichend Wasser und Nährstoffen die Konkurrenz zwischen den Bäumen durch die Verfügbarkeit von Licht, und damit durch die Höhe der Bäume, bestimmt wird (asymmetrische Konkurrenz). Die Ausgleichsgerade der Durchmesser-Zuwachsverteilung hat dann einen steilen Verlauf und schneidet die BHD-Achse rechts vom Ursprung. Bei abnehmender Versorgung mit unterirdischen Ressourcen (Lichtverfügbarkeit ist weniger entscheidend, die Ressourcen verteilen sich proportional zur Biomasse, die Konkurrenz wird symmetrischer) kippt die Gerade um einen Punkt in der Nähe des Verteilungsschwerpunktes in Richtung der Horizontalen. Diese Reaktion kann prinzipiell mit dem Kohortenmodell für den jeweiligen Mittelbaum beschrieben werden. Wenn die Vereinfachung und Schnelligkeit des Kohortenansatzes erhalten werden sollen, muss die Verteilungsbreite durch Kopplung mit einem beobachtungsbasierten Modul rekonstruiert werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Erweiterung des ökophysiologischen Kohortenmodells MoBiLE-PSIM mit einem beobachtungsbasierten Interpolationsmodul für das Einzelbaumvolumen gezeigt, das auf Wachstums- und Konkurrenzalgorithmen von SILVA (PRETZSCH et al. 2002) basiert und das Dimensionswachstum des Einzelbaumes so einstellt, dass es mit dem Volumenwachstum der Kohorte konsistent ist. Seine Anwendung konzentriert sich zunächst auf Bestände der Rotbuche (*Fagus sylvatica* (L.)), einer Baumart die in der Forstwirtschaft Mitteleuropas unter dem Klimawandel besondere Bedeutung hat: Sie gilt unter einer großen Spannweite von Umweltbedingungen als besonders konkurrenzstark (BOLTE et al. 2007; 2010), wurde aber weiträumig durch die Fichte und andere Nadelbaumarten ersetzt, die als weniger gut angepasst an zu erwartende neue Klimabedingungen gelten (KOCA et al. 2006; BOLTE et al. 2010). Daher wird die Erhöhung ihres Baumartenanteils entschieden befürwortet und gefördert. Vor diesem Hintergrund wurde auch ein Bedarf nach zusätzlicher Absicherung formuliert, da auf physiologischer Ebene relativ wenig über die Rotbuche bekannt ist, insbesondere unter Trockenstress (JUMP et al. 2006; GESSLER et al. 2007; FRIEDRICHS et al. 2009). Zur exemplarischen Untersuchung dienen zwei Versuchsflächen innerhalb eines buchendominierten Gebietes im Krähenbachtal nahe Tuttlingen, die sie sich auf Grund der Bodeneigenschaften in einer Region relativ ausgeprägter Trockenheit befinden, und für die die Datenlage relativ gut ist (e.g. GESSLER et al. 2001, RENNENBERG et al. 2001, HOLST et al. 2010, MAATEN et al. 2011). Eine liegt auf einem nordostexponierten, eine auf einem südwestexponierten Hang (NO-C und SW-C). Die beiden Versuchsflächen des ehemaligen SFB 433 weisen durch die vor Ort gemessenen Witterungsreihen und Inventurdaten besonders günstige Bedingungen für die Evaluierung und künftige Anwendung des Modells auf.

Material und Methoden

Standortbeschreibung

Der Versuchsstandort befindet sich in der Nähe von Tuttlingen (47° 59' N, 8° 45' O) bei ca. 800 m über NHN. Seine Teilflächen sind z.B. bei GESSLER et al. (2001) und MAYER et al. (2002) detailliert beschrieben. Ein Teil der Flächen ist nach Südwesten exponiert (SW-Hang), der andere nach Nordosten (NO-Hang). Die Horizontaldistanz zwischen den beiden Gruppen beträgt ca. 800 m. Beide Hänge weisen 80 bis 90 Jahre alte, einschichtige, buchendominierte (> 90 %) Bestände auf. Nach der Standortbeschreibung von GESSLER et al. (2005), sind die Bodenprofile flach- bis mittelgründige Rendzinen auf einem karstigen Weißjurasockel. An beiden Hängen weisen die Böden weniger als 50 cm Oberboden auf, der unterhalb von Fels mit vereinzelt Taschen organischen Materials und Mineralboden durchsetzt ist. Das Bodenprofil auf dem Südwesthang ist besonders felsig, mit mehr als 40 % Vol. Fels und Steinen mit mehr als 63 mm Durchmesser in den obersten 20 cm des Bodens, bis

hin zu 80% unterhalb von 50 cm Tiefe. Der Boden am Nordosthang enthält 15% Fels und Steine in den oberen 20 cm und ca. 30% unterhalb 50 cm Tiefe.

Zwei Kontrollflächen NO1.0 (bei horizontaler Projektion 68 x 77 m²) und SW2.0 (71 x 70 m²) wurden für die Auswertung ausgewählt, die seit 1999 nicht mehr durchforstet wurden. Die mittleren Eigenschaften zum Zeitpunkt der Versuchsflächeninventur im Winter 1998/99 sind in Tabelle 1 aufgelistet, wo Höhe und Durchmesser aus HAUSER (2003) entnommen wurden und die Stammzahlen pro ha bei horizontaler Projektion auf der Basis der Baumpositionen berechnet wurden. Die Artenverteilung innerhalb jeder der beiden Flächen war zu 94% Buche, zu 5% Edellaubholz und zu 1% Nadelholz. Alle Bäume wurden in der nachfolgenden Untersuchung als Buche behandelt.

Tabelle 1: Mitellhöhe, BHD und Stammzahl auf den Versuchsflächen

	NO1.0	SW2.0
hg (m)	26,5	21,1
BHD (cm)	25,6	21,5
N	516	658

Messungen

Als Einzelbaumdaten lagen in dieser Untersuchung BHD und Position vor, die im Winter 1998/99 gemessen worden waren (HAUSER 2003) und Bohrkernproben, die im Frühjahr 2011 entnommen und ausgemessen wurden. Auf Grundlage der alterskorrigierten BHD-Verteilung von 1999 und der beobachteten Häufigkeit der BHD-Verteilung in Intervallen von 10 cm wurde im März 2011 eine stratifizierte Stichprobe aus jeder der beiden Flächen genommen (n=27 auf NO1.0, n=26 auf SW2.0). Von jedem Stichprobenbaum wurden zwei Bohrkern in Brusthöhe versetzt um einen horizontalen Winkel von 90° entnommen, einer davon zur Hangseite. Auf der Fläche NO1.0 wurden von 23 Bäumen beide Bohrkern verwendet, während in den übrigen vier Fällen nur ein Kern pro Baum behalten wurde. Auf SW2.0 waren alle Bohrkernproben für die Auswertung geeignet. Baumhöhe, Kronenansatzhöhe und Kronendurchmesser wurden auf Grundlage der Einzelbaumlisten und der Höhe des Grundflächenmittelstammes mit SILVA (PRETZSCH et al. 2002) berechnet.

Modellbeschreibung

Die mechanistische Hauptkomponente des Modells besteht im wesentlichen aus dem Vegetationsmodell PSIM (Physiological Simulation Model, GROTE 2007, GROTE et al. 2009). PSIM betrachtet das Ökosystem als Ensemble mehrerer Vegetationsschichten oder Kohorten, die nach Baumart, vertikaler Dimension und Deckungsgrad unterschieden werden. Eine Kohorte wird von ihrem Durchschnittsbaum repräsentiert, der durch Durchmesser, Höhe, Kronenansatzhöhe und Stammzahl definiert ist (BOSSEL 1996, LANDSBERG und WARING 1997): Der Kohlenstoffgewinn der Kohorte, den PSIM liefert, wird auf den Volumenzuwachs abgebildet, der im herkömmlichen Strukturmodul über allometrische Beziehungen direkt auf den Dimensionszuwachs des repräsentativen Baumes umgelegt wird. Die neuen Dimensionen des Durchschnittsbaumes definieren die neuen strukturellen Eigenschaften, die Blattverteilung, Strahlungsregime und Konkurrenz innerhalb der Kohorte zu Beginn des Simulationslaufes im folgenden Jahr bestimmen. Wenn eine detaillierte Baumliste als Anfangsrandbedingung verwendet wird, wird der repräsentative Baum zu Beginn der Simulation aus ihr berechnet, indem Baumhöhe und Kronenansatzhöhe als Auswahlkriterien der Kohortenbildung verwendet werden. Alle Bäume innerhalb einer Kohorte werden daher als identisch angesehen und es wird angenommen, dass sie auf einem regelmäßigen Gitter angeordnet stehen, das einen realistischen Anteil an Lücken vorsieht, vorausgesetzt der Bedeckungsgrad liegt unterhalb 100% (GROTE et al. 2011b). Das Stammvolumen und die resultierenden Biomassen werden dann mit Hilfe artspezifischer Formparameter und allometrischer Zusammenhänge berechnet.

PSIM diskretisiert die Krone und den Boden in zahlreiche vertikale Schichten mit einer Dicke von ca. 50 cm im oberirdischen Bereich und, je nach Initialisierung, 2 bis 50 cm im Boden. Die Umweltbedingungen, die auf einen Kohortenbaum wirken, werden vom Ressourcenangebot in den oberirdischen und unterirdischen Schichten bestimmt, die er entsprechend seiner Höhe, Kronenansatzhöhe und Durchwurzelungstiefe besetzt. Daher beeinflusst ein Kohortenbaum im Modell seine eigene Umgebung und die anderer Kohorten durch Beschattung und Verwendung von Bodenressourcen (Stickstoff und Wasser) auf der räumlichen Betrachtungsebene von Kronenschichten und Bodenschichten, was einer mechanistischen Darstellung der Konkurrenz entspricht.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die bisherige Höhen- und Durchmesser-Berechnung (GROTE et al. 2010) durch eine alternative Version ersetzt, die die Dimensionen des repräsentativen Baumes nicht unmittelbar aus dem Kohorten-Volumen ableitet, sondern in einem Zwischenschritt den Dimensionszuwachs jedes der Einzelbäume berechnet, aus denen die Kohorte gebildet wird (Abbildung 1). Dafür muss beim Simulationsstart eine

initiale Baumliste zur Verfügung gestellt werden, die die Anfangsdimensionen jedes Einzelbaumes im Bestand definiert.

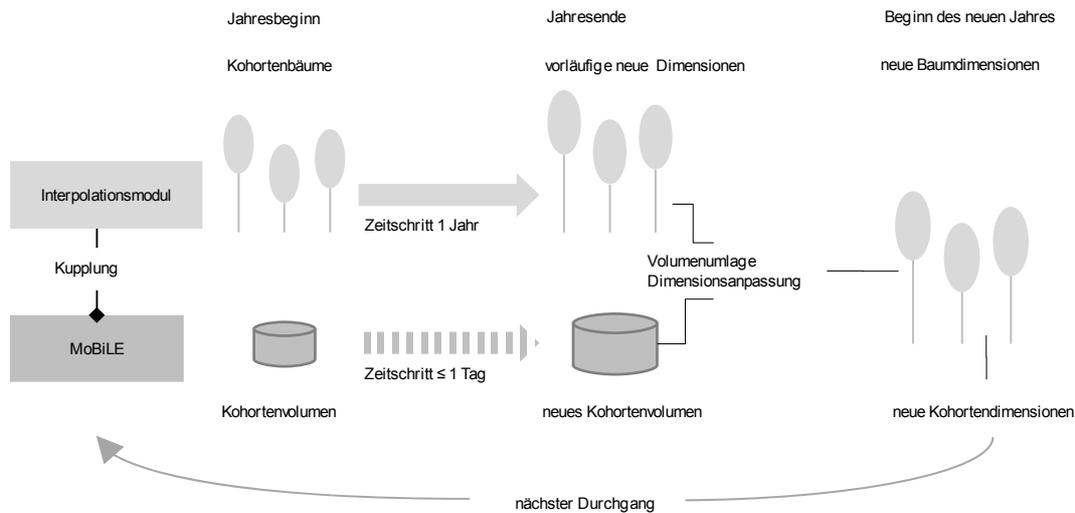
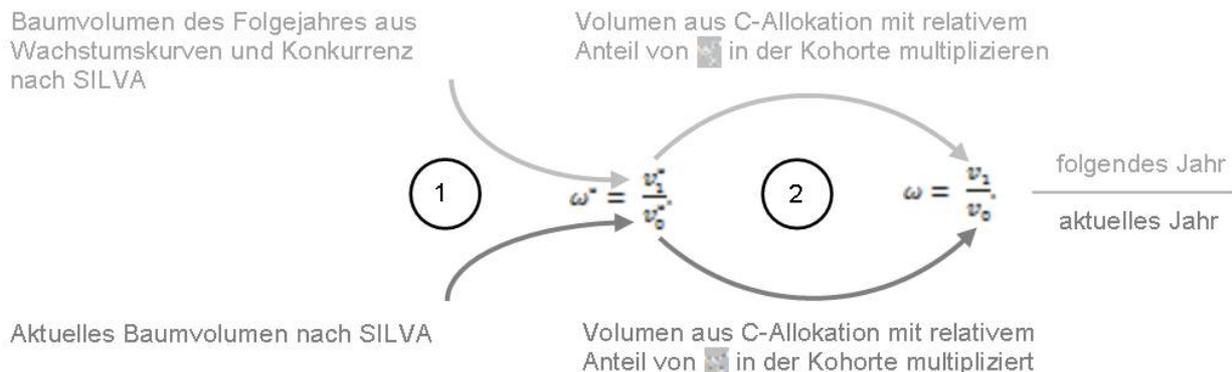


Abbildung 1: Kopplung zwischen MoBiLE und dem Interpolationsmodul vereinfacht

Der erste Schritt des Skalierungsverfahrens ist es, vorläufige Baumvolumina zu Beginn (v_0^*) und Ende (v_1^*) des aktuellen Jahres zu berechnen (Abbildung 2, Schritt 1): Er verwendet die Algorithmen von SILVA (PRETZSCH et al. 2002) für das potentielle Wachstum, den artspezifischen Konkurrenzfaktor und die Derholz-Formfunktionen. Im nächsten Schritt, wird das Kohortenvolumen, das mit dem Ergebnis von PSIM konsistent ist, über die vorläufig berechneten relativen Volumenanteile, die sich aus v_0^* und v_1^* ergeben, auf die Einzelbäume heruntergebrochen. Jedem einzelnen Baum kann dann ein relativer Volumenzuwachs zugeordnet werden, der mit dem Ergebnis der SILVA konsistent ist (Ergebnis von Abbildung 2, Schritt 1) und einer, der mit PSIM konsistent ist (Ergebnis von Abbildung 2, Schritt 2).



Korrekturfaktor der Einzelbaumdimension

$$f = \frac{\sqrt[3]{\omega} - 1}{\sqrt[3]{\omega^*} - 1}$$

Abbildung 2: Berechnung des Korrekturfaktors für die Einzelbaumdimension aus dem Einzelbaumvolumen v des aktuellen (v_0) und nächsten Jahres (v_1)

Im dann folgenden Schritt werden die vorläufigen Einzelbaumdimensionen, die zu v_0^* und v_1^* gehören korrigiert, so dass sie mit dem gesamten Volumenzuwachs der Kohorte aus der Kohlenstoffallokation von PSIM konsistent sind: Der Korrekturfaktor vergleicht die relative Volumenzunahme des Einzelbaumes, wie sie SILVA entspricht mit der Zunahme des Einzelbaumvolumens, die mit PSIM konsistent ist, wie in Gleichung 1 gezeigt.

$$f = \frac{\sqrt[3]{\omega} - 1}{\sqrt[3]{\omega^*} - 1} \quad \text{wobei } \omega = \frac{v_1}{v_0} \quad \text{und } \omega^* = \frac{v_1^*}{v_0^*}. \quad \text{Gl.1}$$

Die vorläufigen Dimensionsänderungen der Kohortenbäume werden mit dem einzelbaumbezogenen Korrekturfaktor multipliziert, um die fortgeführte Einzelbaumliste der Kohorte mit den Dimensionen zu Beginn des folgenden Jahres zu erhalten: Die Bäume der Liste sollen ein Gesamtvolumen aufweisen, das mit der Kohlenstoffallokation der Kohorte konsistent ist. Die neuen Dimensionen des repräsentativen Kohortenbaumes werden als Durchschnitt der neuen Einzelbaumdimensionen gebildet.

Innerhalb des SILVA-basierten Interpolationsschrittes wird das potentielle Wachstum des Einzelbaumes in Höhe und Durchmesser jeweils auf Grundlage der Chapman-Richards-Gleichung berechnet (RICHARDS 1959). Ein Prozess, der das Wachstum des Einzelbaumes entscheidend beeinflusst ist die Konkurrenz, wie in der folgenden, stark vereinfachten Gleichung gezeigt:

$$g = \mathcal{P} \cdot c \quad \text{Gl.2}$$

wobei g das tatsächliche Wachstum ist und \mathcal{P} das standortabhängige potentielle Wachstum, für Höhe oder

Durchmesser. Variable c ist der im Wesentlichen mit Konkurrenz begündete Reduktionsterm, der bei Höhenwachstum und Durchmesserwachstum ebenfalls unterschiedlich ist. Die Reduktionsvariable hängt von den Baumpositionen und Dimensionen in der unmittelbaren Nachbarschaft ab (näheres bei PRETZSCH et al. 2002). Da bereits das physiologische Modell standortabhängig rechnet und um den Aufwand an Modellkonfiguration zu minimieren, wurden die standortabhängigen Wachstumsparameter auf großräumige Repräsentativwerte gesetzt.

Modellkonfiguration und Parameter

Die Simulationsläufe mit MoBiLE wurden ausschließlich bei aktivem Einzelbaummodul durchgeführt. Die initialen Baumdurchmesser waren aus Bestandesinventuren des Winters 1998/99 verfügbar (HAUSER 2003) und geben die Situation nach der initialen Durchforstung der ehemaligen Versuchsfläche im Jahr 1999 wieder. Höhendimensionen und Kronendimensionen wurden mit SILVA berechnet. Die vorliegende Studie beschränkt sich noch auf die Simulation des gesamten Bestandes als einzelne Kohorte.

Das Wetter war in den beiden Versuchsflächen NO1.0 und SW2.0 auf einem Turm von ca. 1,5-facher Bestandeshöhe aufgezeichnet worden wie von HOLST et al. (2004, 2010) und von HOLST und MAYER (2005) veröffentlicht. Die Instrumentierung ist bei MAYER et al. (2002) ausführlich beschrieben. Das Zeitintervall der Simulation war 2001 bis 2005. Ein Vorlauf von drei Jahren wurde jedem Simulationslauf vorangestellt, um einen plausiblen inneren Zustand der Variablen herzustellen, für die keine Anfangswerte vorgegeben werden können, wie poolspezifische Stickstoffkonzentrationen innerhalb des Bodens.

Die Verteilung des Einzelbaumwachstums aus der Modellsimulation wurde mit gemessenen Einzelbaumzuwächsen differenziert nach der Versuchsfläche verglichen. Im Rahmen der hier gezeigten Ergebnisse wurde der Vergleich integriert über die Jahre 2001-2005 durchgeführt. Da die BHD-Werte von 2001 nicht gemessen worden waren, wurden sie aus der Jahrringanalyse rekonstruiert. Exemplarisch gezeigte Verteilungsbreiten der Durchmesser-Zuwachsverteilung im Jahr 2005 wurden nach dem erweiterten Regressionsmodell berechnet, da die Verteilungen i.A. heteroskedastisch sind.

Ergebnisse

Die mittlere Jahrringbreite der Stichprobenbäume differenziert nach Versuchsfläche ist in Abbildung 3 gezeigt. Sie zeigt einen deutlichen Einbruch im trockenen Weiserjahr 1976. Die Wachstumsspitzen, von 1994 auf Fläche SW2.0 und von 1996 auf NO1.0 fallen mit den letzten waldbaulich begründeten Durchforstungen vor der Versuchsflächenrichtung zusammen (HAUSER 2003). Innerhalb des Simulationszeitraumes 2001 bis 2005 deckt der Jahrringzuwachs die typische Bandbreite ab, abgesehen von den Zuwachsspitzen der Jahre 1994 bis 1997. Der Zeitverlauf der Stichprobenmittel beider Flächen ist ähnlich. Beide zeigen keinen Einbruch im Jahr 2003.

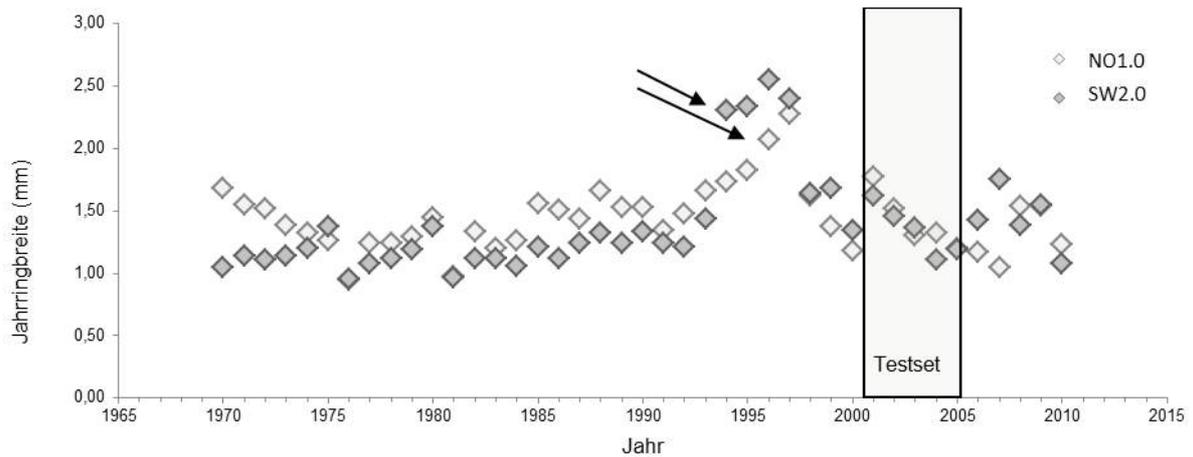


Abbildung 3: Mittlere jährliche Jahrringbreite nach Bohrkernstichprobe der Fläche NO1.0 und SW2.0. Die Ringbreiten direkt nach dem letzten forstwirtschaftlichen Eingriff sind durch Pfeile gekennzeichnet. Die Messwerte zwischen 2001 und 2005 (Testset) wurden zum Vergleich mit der Simulation verwendet

Abbildung 4 zeigt das von MoBiLE simulierte Einzelbaumwachstum von 2001 bis 2005 gegen das Ergebnis von SILVA auf der Fläche NO1.0 auf Grundlage der selben initialen Baumliste. Die Abweichung von MoBiLE gegenüber SILVA im BHD-Zuwachs beträgt $1,4 \text{ mm} \pm 0,8 \text{ mm}$ und beim Höhenzuwachs $18 \text{ cm} \pm 11 \text{ cm}$ jeweils beim Mittel von SILVA (1,24 cm im BHD und 1,01 m in der Höhe). Die Abweichungen beim Mittel wurden aus linearer Regression zwischen Zuwachsabweichung und Zuwachs berechnet.

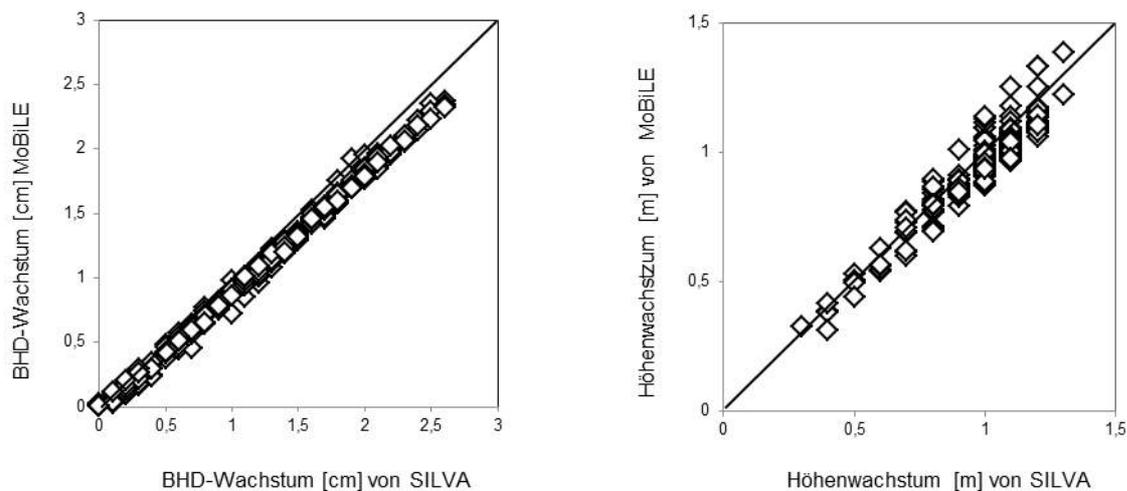


Abbildung 4: Simuliertes BHD-Wachstum und Höhenwachstum aller Einzelbäume auf Versuchsfläche NO1.0 im Zeitraum 2001 bis 2005, MoBiLE gegen SILVA, gezeigt mit der 1:1-Geraden

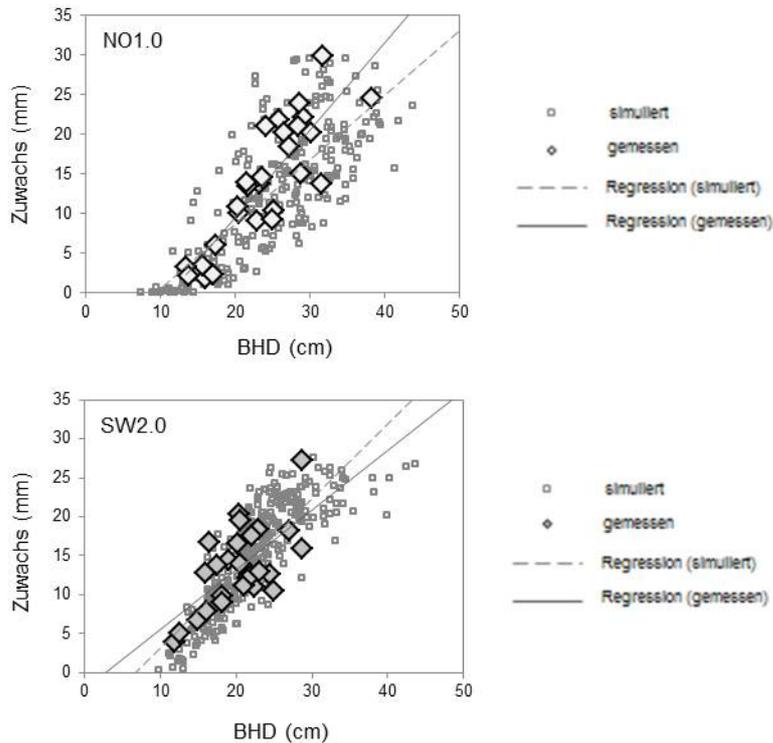


Abbildung 5: Vergleich des simulierten und des gemessenen BHD-Wachstums der Einzelbäume des Bestandes bzw. der Stichprobe von 2001 bis 2005 differenziert nach Versuchsfläche, oben NO1.0, unten SW2.0

Abschließend zeigt Abbildung 6, um einen Eindruck davon zu vermitteln, wie das Wachstum und seine Verteilungsbreite durch das Modell wiedergegeben werden, das 95%-Vorhersageintervall des BHD-Zuwachses von 2005 beim mittleren BHD sowohl nach Simulation als auch nach Messung.

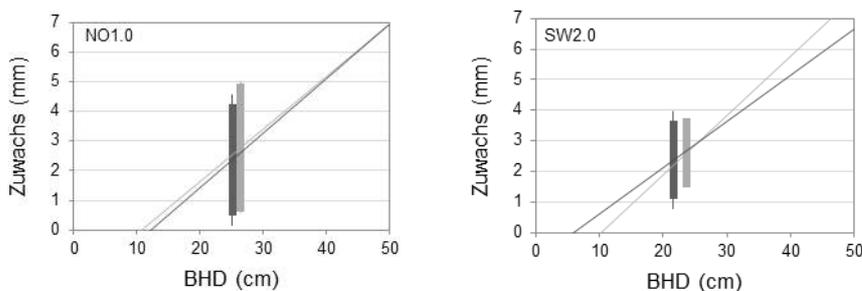


Abbildung 6: Spannweite des Durchmesserzuwachses im Jahr 2005 der simulierten Bäume (hellgrau) und der gemessenen Stichprobenbäume (dunkelgrau) differenziert nach Versuchsfläche (NO1.0 und SW2.0). Die Fehlerbalken (halbes Konfidenzintervall der Verteilungsbreitenschätzung), sind als schmale Endlinien dargestellt

Diskussion

Die Entwicklung der mittleren Jahrringbreite auf NO1.0 und SW2.0 von 1970 bis 2010 zeigt beachtliche Ähnlichkeit zwischen beiden Flächen und einen deutlichen Einbruch im trockenen Weiserjahr 1976. Die auffallenden Wachstumsspitzen in der Mitte der 1990er Jahre können wahrscheinlich mit der letzten Durchforstung vor Einrichtung der Versuchsflächen im Jahr 1999 erklärt werden, weil sie zeitnah zu den Eingriffsjahren auftreten. Die BHD-Verteilung und die Höhenverteilung auf Fläche SW2.0 sind weniger differenziert. SW2.0 weist eine geringere Höhe und ein geringeres Wachstum auf, das wahrscheinlich auf die geringere Wasserhaltekapazität des Standortes zurückzuführen ist (z.B. FRIEDRICHS et al. 2009, SCHARNWEBER et al. 2011).

Obwohl das Trockenjahr 2003 die Kohlenstoffassimilation in Europa im allgemeinen vermindert hat (CIAIS et al. 2005), insbesondere bei der Buche (CHARRU et al. 2010), war keine Verminderung der durchschnittlichen Jahrringbreite auf den Flächen NO1.0 und SW2.0 in diesem Jahr zu erkennen. Das könnte durch noch immer

günstige Wachstumsbedingungen nach der Trockenheit auf unseren Standorten und entsprechender Erholung zu begründen sein, wie bei VAN DER WERF et al. (2007). Bei MUND et al. 2011 wurde ein entsprechender Effekt auf besonders günstige Wachstumsbedingungen im warmen Frühjahr 2003 vor der Trockenheit zurückgeführt. Auch sind standortspezifische Anpassungen an trockene Bedingungen möglich (FOTELLI et al. 2009).

MoBiLE-PSIM wurde im Hinblick auf das Bestandeswachstum homogener Wälder erfolgreich evaluiert (GROTE et al. 2011a). Im Rahmen der vorliegenden Studie zeigte sich, dass die neue Einzelbaumversion die Durchmesser-Zuwachsverteilung im Beispielfall weitgehend beschreiben kann. Die stärkere Abweichung auf der Fläche NO1.0 ist auf das Jahr 2001 zurückzuführen (hier nicht gezeigt), in dem ein überdurchschnittliches Wachstum gegenüber dem Zeitraum 2001 bis 2005 stattfand. Es ist naheliegend, dass insbesondere die dominanten Bäume auf Grund günstiger Wachstumsbedingungen (warmes Frühjahr, früher Sommer und ausreichender Niederschlag) und eine deutlichere Höhendifferenzierung auf der Fläche NO1.0 von ihrem Konkurrenzvorteil profitieren konnten. Eine plausible Erklärung für die Abweichung zwischen Simulation und Messung ist daher, dass der Effekt durch eine weitergehende vertikale Stratifizierung des Bestandes in mehrere Kohorten zu erfassen ist, was noch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit war.

Der simulierte Fünfjahreszuwachs von MoBiLE mit gekoppeltem Einzelbaummodul wurde auch mit dem von SILVA simulierten Zuwachs auf dem Standort NO1.0 auf der Basis einer identischen Baumliste verglichen. Auf Grund ihrer unterschiedlichen Zeitschrittweite, kann nicht vorausgesetzt werden, dass beide Modelle den Dimensionszuwachs identisch simulieren, aber die Ähnlichkeit, die beide Modellläufe zeigen, unterstützt die Qualität der MoBiLE-Erweiterung. Die Zeitskala von fünf Jahren ist die typische Zeitschrittweite eines beobachtungsbasierten Modells. Daher besteht der Wissenszuwachs, der durch das Kohortenmodell ohne Interpolationsmodul bereits gegeben ist, in der interannuellen Witterungssensitivität der Konkurrenz und des Wachstums auf der Ebene ganzer Kohorten. Die Erweiterung von MoBiLE mit einem beobachtungsbasierten Einzelbaummodul stellt dann zusätzlich die interannuelle Variabilität der Konkurrenz und des Dimensionszuwachses auch auf der Einzelbaumebene dar. Die Regressionen zeigen, dass der Ansatz die Beziehung zwischen Dominanz und Konkurrenzvorteil (PRETZSCH und BIBER 2010 u.a.) im Bereich der verwendeten Witterungsdaten und bei vorläufiger Beschränkung auf eine einzige Kohorte treffend darstellt. Eine weitergehende Differenzierung nach mehreren Kohorten wurde bereits im Rahmen von Biomassesimulationen ohne Einzelbaummodul durchgeführt (GROTE et al. 2011b).

Es ist naheliegend, aber noch zu zeigen, dass die Modellerweiterung sich auch eignet, um die Konkurrenz zwischen Einzelbäumen wiederzugeben, die zu verschiedenen Kohorten mit unterschiedlichen lokalen Umweltbedingungen gehören. Interessante Fragen, die durch die Erweiterung des Kohortenmodells um das Einzelbaummodul untersucht werden können, sind, ob ein gezieltes Management einem zunehmenden Trockenstress entgegenwirken kann, indem es die Konkurrenz um Wasser vermindert (KÖHLER et al. 2010) und zu welchem Grad die Beziehung zwischen oberirdischer und unterirdischer Konkurrenz sich unter diesen Bedingungen verändert (PRETZSCH und BIBER 2010, PRETZSCH und DIELER 2011).

Schlussfolgerung

Beobachtungsbasierte Waldwachstumsmodelle wie SILVA sind zu wichtigen Werkzeugen geworden, wo Systemwissen als Know-how für das Forstmanagement und die forstliche Beratung zur Verfügung gestellt wird. Der besondere Nutzen solcher Modelle ist die Entscheidungsunterstützung auf Einzelbaumebene, die der Betrachtungsebene des Managements entspricht. Da solche Modelle standortsensitiv sind, können sie auch für Klimawirkungsstudien verwendet werden (z.B. PRETZSCH et al. 2000, SCHMID et al. 2006), solange ihr spezifischer Beobachtungshorizont nicht zu weit überschritten wird. Außerdem kann ihr Gültigkeitsbereich durch Parametrisierung mit den Ergebnissen physiologischer Modelle erweitert werden (z.B. MOSHAMMER et al. 2009), die weniger auf der Beobachtung von Beständen, als vielmehr auf mechanistischen Gleichungen gestützt durch physiologische Experimente beruhen. Sie können einen weiteren Rahmen von Umweltveränderungen erfassen.

Wir haben hier einen innovativen Ansatz dargestellt, um das Waldwachstum auch unter solchen Veränderungen zu repräsentieren: Sein Kern ist ein physiologisch basiertes Prozessmodell, das in der Beschreibung der Bestandesstruktur einfach gehalten ist und um ein beobachtungsbasiertes Interpolationsmodul für die Einzelbaumebene erweitert wird. Es ist durch seine Modularität anpassungsfähig, schnell und kann verschiedenste Kombinationen von Umwelteinflüssen in hoher zeitlicher Auflösung abbilden.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung innerhalb des Projektes „Modeling beech-dominated deciduous forest development based on competitive mechanisms of water und nitrogen partitioning“ unter Vertragsnummer GE 1090/9-1. Weiterhin danken wir Matthias Ulbricht und Gerhard Schütze für die sorgfältige Entnahme und Auswertung der Bohrkerne, ohne die diese Untersuchung nicht möglich gewesen wäre.

Literaturverzeichnis

- BOISVENUE,C., RUNNING, S.W.: Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century, *Global Change Biol.* 12, 862-882, 2006
- BOLTE,A., CZAJKOWSKI,T., KOMPA,T.: The north-eastern distribution range of European beech - a review, *Forestry* 80, 413-429, 2007
- BOLTE,A., HILBRIG,L., GRUNDMANN,B., KAMPF,F., BRUNET,J., ROLOFF,A.: Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce-beech forest, *Eur J Forest Res* 129, 261-276, 2010
- BOSSEL,H.: TREEDYN3 forest simulation model, *Ecol. Modell.* 90, 187-227, 1996
- CHARRU,M., SEYNAVE,I., MORNEAU,F., BONTEMPS,J.D.: Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France, *For. Ecol. Manage.* 260, 864-874, 2010
- CIAIS,PH., REICHSTEIN,M., VIOVY,N., GRANIER,A., OGEE,J., ALLARD,V., AUBINET,M., BUCHMANN,N., BERNHOFER,C., CARRARA,A., CHEVALLIER,F., DE NOBLET,N., FRIEND,A.D., FRIEDLINGSTEIN,P., GRÜNWALD,T., HEINESCH,B., KERONEN,P., KNOHL,A., KRINNER,G., LOUSTAU,D., MANCA,G., MATTEUCCI,G., MIGLIETTA,F., OURCIVAL,J.M., PAPAIE,D., PILEG-AARD,K., RAMBAL,S., SEUFERT,G., SOUSSANA,J.F., SANZ,M.J., SCHULZE,E.D., VESALA,T., VALENTINI,R.: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature* 437, 529-533, 2005
- FONTES,L., BONTEMPS,J.-D., BUGMANN,H., VAN OIJEN,M., GRACIA,C., KRAMER,K., LINDNER,M., RÖTZER,T., SKOVSGAARD,J.P.: Models for supporting forest management in a changing environment, *Forest Systems* 19, 8-29, 2010
- FOTELLI,M.N., NAHM,M., KALLIOPI,R., RENNENBERG,H., HALYVOPOULOS,G., MATZARAKIS,A.: Seasonal and interannual ecophysiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) at its south-eastern distribution limit in Europe, *For. Ecol. Manage.* 257, 1157-1164, 2009
- FRIEDRICH,D., TROUET,V., BÜNTGEN,U., FRANK,D., ESPER,J., NEUWIRTH,B., LÖFFLER,J.: Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany, *Trees* 23, 729-739, 2009.
- GESSLER,A., SCHREMPP,S., MATZARAKIS,A., MAYER,H., RENNENBERG,H.: Radiation modifies the effect of water availability on the carbon isotope composition of beech (*Fagus sylvatica* (L.)), *New Phytol.* 150, 653-664, 2001
- GESSLER,A., JUNG,K., GASCHER,R., PAPAN,H., HEIDENFELDER,A., BÖRNER,E., METZLER,B., AUGUSTIN,S., HILDEBRAND,E., RENNENBERG,H.: Climate and forest management influence nitrogen balance of European beech forests: microbial N transformations and inorganic N net uptake capacity of mycorrhizal roots, *Eur J Forest Res* 124, 95-111, 2005
- GESSLER,A., KEITEL,C., KREUZWIESER,J., MATYSSEK,R., SEILER,W., RENNENBERG,H.: Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate, *Trees* 21, 1-11, 2007
- GROTE,R., PRETZSCH,H.: A model for individual tree development based on physiological processes, *Plant Biol (Stutt)* 4, 167-180, 2002
- GROTE,R.: Sensitivity of volatile monoterpene emission to changes in canopy structure – A model based exercise with a process-based emission model, *New Phytol.* 173, 550-561, 2007
- GROTE,R., LEHMANN,E., BRÜMMER,C., BRÜGGEMANN,N., SZARZYNSKI,J., KUNSTMANN,H.: Modelling and observation of biosphere-atmosphere interactions in natural savannah in Burkina Faso, West Africa., *Phys. Chem. Earth* 34, 251-260, 2009
- GROTE,R., KIESE,R., GRÜNWALD,T., OURCIVAL,J.-M., GRANIER,A.: Modelling forest carbon balances considering tree mortality and removal, *Agric. Forest Meteorol.* 151, 179-190, 2011a
- GROTE R., KORHONEN J., MAMMARELLA I.: Challenges for evaluating process-based models of gas exchange at forest sites with fetches of various species, *Forest Systems* 20, 389-406, 2011b
- HAUSER,S.: Dynamik hochaufgelöster radialer Schaftveränderungen und des Dickenwachstums bei Buchen (*Fagus sylvatica* L.) der Schwäbischen Alb unter dem Einfluss von Witterung und Bewirtschaftung, *Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Brsg.*, 212 S., 2003
- HOLST,J., GROTE,R., OFFERMANN,C., FERRIO,J.P., GESSLER,A., MAYER,H., RENNENBERG,H.: Water fluxes within beech stands in complex terrain, *Int J Biometeorol* 54, 23-36, 2010
- HOLST,T., MAYER,H., SCHINDLER,D.: Microclimate within beech stands—part II: thermal conditions, *Eur J Forest Res* 123, 13-28, 2004
- HOLST,T., MAYER,H.: Radiation components of beech stands in Southwest Germany, *Meteorol. Zeitschrift* 14, 107-115, 2005
- JUMP,A.S., HUNT,J.M., PEÑUELAS,J.: Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica* (L.), *Global Change Biol.* 12, 2163-2174, 2006
- KOCA,D., SMITH,B., SYKES,M.T.: Modelling regional climate change effects on potential natural ecosystems in Sweden, *Climatic Change* 78, 381-406, 2006

- KOHLER,M., SOHN,J., NÄGELE,G., BAUHUS,J.: Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? *Eur J Forest Res* 129, 1109-1118, 2010
- KUBISKE,M.E., QUINN,V.S., HEILMAN,W.E., MCDONALD,E.P., MARQUARDT,P.E., TECLAW,R.M., FRIEND,A.L., KARNOSKY,D.F.: Interannual climatic variation mediates elevated CO₂ and O₃ effects on forest growth, *Global Change Biol.* 12, 1054-1068, 2006
- LANDSBERG,J., WARING,R.H.: A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning, *For. Ecol. Manage.* 95, 209-228, 1997
- LANDSBERG,J.: Physiology in forest models: History and the future, *FBMIS* 1, 49-63, 2003
- LÖW,M., HERBINGER,K., NUNN,A.J., HÄBERLE,K.-H., LEUCHNER,M., HEERDT,C., WERNER,H., WIPFLER,P., PRETZSCH,H., TAUSZ,M., MATYSSEK,R.: Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica* (L.)). *Trees* 20, 539-548, 2006
- MAATEN, E., 2011. Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees*, 26(3), 777-788.
- MATYSSEK,R., LE THIEC,D., LÖW,M., DIZENGREMEL,P., NUNN,A.J., HÄBERLE,K.H.: Interactions between drought and O₃ stress in forest trees, *Plant biol (Stutt)* 8, 11-17, 2006
- MAYER,H., HOLST,T., SCHINDLER,D.: Microclimate within beech stands - part I: photosynthetically active radiation, *Forstw. Cbl.* 121, 301-321, 2002
- MOSHAMMER,R., RÖTZER,T., PRETZSCH,H.: Analyse der Waldentwicklung unter veränderten Umweltbedingungen – Neue Informationen für die Forstplanung durch Kopplung von Modellen am Beispiel des Forstbetriebes Zittau, *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 8,63–70, 2009
- MUND,M., KUTSCH,W. L., WIRTH,C., KAHL,T., KNOHL,A., SKOMARKOVA,M.V., SCHULZE, E.D.: The influence of climate and fructification on the inter-annual variability of stem growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest, *Tree physiology*, 30(6), 689-704, 2010
- MUYS,B., HYNYNEN, J.,PALAHÍ,M., LEXER,M.J., FABRIKA,M., PRETZSCH,H., GILLET,F., BRICEÑO,E., NABUURS,G.J., KINT,V.: Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. *Forest Systems*. 19, 86-99, 2010
- OLLINGER,S.V., ABER,J.D., REICH,P.B., FREUDER,R.J.: Interactive effects of nitrogen deposition, tropospheric ozone, elevated CO₂ and land use history on the carbon dynamics of northern hardwood forests, *Global Change Biol.* 8, 545-562, 2002
- PORTE,A., BARTELINK,H.H.: Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management, *Ecol. Modell.* 150, 141–188, 2002
- PRETZSCH,H., BIBER,P., DURSKY,J.: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation, *For. Ecol. Manage.* 162, 3-21, 2002
- PRETZSCH,H., DURSKY,J., POMMERENING,A., FABRIKA,M.: Waldwachstum unter dem Einfluss großregionaler Standortveränderungen, *Forst und Holz* 55, 307-314, 2000
- PRETZSCH, H., GROTE, R., REINEKING, B., RÖTZER, T., SEIFERT, S.: Models for forest ecosystem management: a European perspective, *Annals of botany*, 101(8), 1065-87, 2008
- PRETZSCH,H., BIBER,P.: Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe, *Can. J. For. Res.* 40, 370-384, 2010
- PRETZSCH, H., DIELER, J.: The dependency of the size-growth relationship of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in forest stands on long-term site conditions, drought events, and ozone stress, *Trees* 25, 355-369, 2010
- RICHARDS, F.J.: A Flexible Growth Function for Empirical Use, *J.Exp.Bot.* 10(29), 290-300, 1959
- SAXE,H., CANNELL,M.G.R., JOHNSEN,O., RYAN,M.G., VOURLITIS,G.: Tree and forest functioning in response to global warming, *New Phytol.* 149, 369-399, 2002
- SCHARNWEBER,T., MANTHEY,M., CRIEGEE,C., BAUWE,A., SCHRÖDER,C., WILMKING,M.: Drought matters - Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany, *For. Ecol. Manage.* 262, 947-961, 2011
- SCHMID,S., THÜRIG,E., KAUFMANN,E., LISCHKE,H., BUGMANN,H.: Effect of forest management on future carbon pools and fluxes: A model comparison, *For. Ecol. Manage.* 237, 65-82, 2006
- SCHWINNING,S. WEINER,J.: Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants, *Oecologia* 113:447-455, 1998
- RENNENBERG, H., GESSLER, A., ADAMS, M.A., FOTELLI, M.N., KEITEL C.: Charakterisierung des Wasserhaushalts von Buchen in Abhängigkeit von Klima und Bewirtschaftung. In: Buchendominierte Laubwälder unter dem Einfluss von Klima und Bewirtschaftung: Ökologische, waldbauliche und sozialwissenschaftliche Analysen. Abschlussbericht des SFB 433, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, S. 187-229, 2001
- VAN DER WERF,G.W., SASS-KLAASSEN,U.G.W., MOHREN,G.M.J.: The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* (L.)) and oak (*Quercus robur* (L.)) on a dry site in the Netherlands, *Dendrochronologia* 25, 103-112, 2007
- WEINER, J.: Asymmetric competition in plant populations. *Trends in ecology & evolution*, 5(11), 360-364, 1990

- WICHMANN, L.: Annual Variations in Competition Symmetry in Even-aged Sitka Spruce. *Annals of Botany*, 88(1), 145-151, 2001
- WICHMANN, L.: Modelling the effects of competition between individual trees in forest stands. Ph.D. thesis, Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark, 2002