

Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland

The effects of climate change on beech forests in Germany

Johannes Sutmöller, Hermann Spellmann, Caroline Fiebiger und Matthias Albert

Zusammenfassung

Nach den Klimaprojektionen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden für die meisten Regionen Deutschlands bis zum Ende des Jahrhunderts höhere Temperaturen und geringere Niederschläge in der Vegetationszeit erwartet. Außerdem wird mit einem häufigeren Auftreten von Witterungsextremen gerechnet.

Der Schwerpunkt der natürlichen Verbreitung der Buche liegt in Mittel- und Westeuropa mit seinem atlantischen bis subkontinentalen Klima. In Deutschland fehlt die Buche lediglich in den Hochlagen der Mittelgebirge und der Alpen, auf azonalen Standorten sowie auf extrem nassen und trockenen Standorten.

Die klimatischen Verhältnisse im natürlichen Verbreitungsgebiet der Buche reichen für eine Beurteilung ihrer Anpassungsfähigkeit an die sich ändernden Klimabedingungen nicht aus. Hierzu bedarf es weiterer Informationen,

insbesondere zum Bodenwasserhaushalt, zur Lage und zu ihrem jeweiligen Leistungsvermögen.

In Zukunft werden die Wälder in der Vegetationszeit voraussichtlich vermehrt Trockenstressbedingungen ausgesetzt sein, die ihre Vitalität und Produktivität massiv beeinträchtigen können. Es werden daher wichtige Untersuchungen zum Trockenstressrisiko der Buche vorgestellt. Zudem wird der heute relativ geringe Einfluss klimatischer Faktoren auf die Höhenwuchsleistung der Buche an ihren derzeitigen Anbaustandorten mit Hilfe von Daten der zweiten Bundeswaldinventur verdeutlicht.

Die konkreten Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt eines Buchenbestandes werden am Beispiel einer Versuchsfläche im Hessischen Ried vorgestellt. In Zukunft würde sich unter den klimatischen Bedingungen der feuchten Variante des A1B-Klimaszenarios (nach IPCC) eine leichte und unter denen der trockenen Variante eine deutliche Verschlechterung in der Wasserversorgung einstellen.

In der Gesamtschau wird deutlich, dass der derzeitige Kenntnisstand noch keine abschließende Bewertung der Folgen klimatischer Veränderungen auf die Sensitivität, Stabilität und Elastizität von Buchen-Ökosystemen erlaubt. Die Betrachtungen münden daher in einer vorläufigen Abgrenzung der künftigen Anbaustandorte der Buche und in ersten Empfehlungen zur waldbaulichen Steuerung und Entwicklung von Buchenbeständen.

Stichworte: Buche, Klimawandel, Regionalisierung, Trockenstress, Wasserhaushalt

Abstract

The climate projections from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) predict higher temperatures and lower precipitation during the growing season for most regions in Germany by the end of the century. Furthermore, a more frequent occurrence of weather extremes is expected.

The natural distribution of beech is concentrated in central and western Europe where an Atlantic to sub-continental climate prevails. In Germany, beech is absent at high elevations in the central mountain ranges and the alps, on azonal sites, as well as on extremely wet and dry sites.

The climatic conditions in the natural range of beech are insufficient for an assessment of the adaptability of beech to the changing climatic conditions. Here, additional information is needed, in particular about the soil water budget, the site conditions, and the productivity of beech in each case.

In future, forests will be subject to increasing water stress during the growing season, which may have considerable impact on beech vitality and productivity. Consequently, important investigations into the risk to beech of drought stress are

presented. Moreover, the relative low influence of climatic factors on beech height growth at the existing beech sites today is shown clearly with data from the second national forest inventory.

The actual effects of climate change on the water budget of a beech stand are presented for a study site in “Hessisches Ried” (Hesse). In future, under the climatic conditions of the moist, and the dry variant in the A1B-climate scenario (from IPCC) a slight worsening, and a conspicuous worsening in the water availability would result respectively.

Overall, it is evident that current knowledge still is inconclusive about the consequences of climate change in relation to the sensitivity, stability and flexibility of beech ecosystems. These considerations provide a preliminary delimitation of sites of future beech occurrence, and the first recommendations for silvicultural management and development of beech stands.

Keywords: beech, climate change, regionalisation, drought stress, water budget

1 Einleitung

Der Klimawandel lässt für Deutschland einen deutlichen Temperaturanstieg bei gleichzeitig veränderter Niederschlagsverteilung erwarten. Die Klimaänderungen werden regional unterschiedlich stark ausgeprägt sein (SPEKAT et al. 2007). Bereits seit Beginn der 1990er Jahre hat sich die Jahresmitteltemperatur landesweit im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961 - 1990 um annähernd 1 °C erhöht. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird nach dem A1B-Szenario die Temperatur im Jahresmittel um 1,6 °C im Norden Deutschlands und bis zu 2,4 °C in Süddeutschland zunehmen (GERSTENGARBE 2008). Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass bis zum Jahr 2100 die mittlere Erwärmung in Deutschland zwischen 2,5 °C und 3,5 °C betragen wird (UBA 2006). Die Projektionen der Niederschläge zeigen für Deutschland keinen einheitlichen Trend. Allerdings werden für die Jahreszeiten markante Veränderungen in der Niederschlagsverteilung vorhergesagt. Während die Sommermonate deutlich trockener ausfallen sollen, wird für die Wintermonate eine Zunahme der Niederschläge erwartet. Neben den jahreszeitlichen Veränderungen werden in Zukunft die Häufigkeit und Stärke von Extremereignissen zunehmen. Dies betrifft sowohl Starkregenereignisse und Dürreperioden als auch Sturmereignisse.

Für die in langen Zeiträumen produzierende Forstwirtschaft stellen Ausmaß und Geschwindigkeit des erwarteten Klimawandels eine besondere Herausforderung dar. In Zukunft ist vor allem damit zu rechnen, dass es vermehrt zu Trockenstressbedingungen kommt, die die Vitalität, Stabilität und Produktivität der Wälder massiv beeinträchtigen können. Des Weiteren werden die warmen und niederschlagsreicheren Winter das Auftreten von Pilzerkrankungen begünstigen, die trockeneren Sommer die Massenvermehrung von Schadinsekten fördern und

der frühere Beginn der Vegetationsperiode das Spätfrostisiko erhöhen. Außerdem wird sich das Artenspektrum verändern, weil sich die Konkurrenzverhältnisse zwischen den Arten ebenso verschieben werden wie ihre Verbreitungsgrenzen. Zudem werden die waldbaulichen Bewirtschaftungskonzepte an die veränderten ökologischen Rahmenbedingungen angepasst werden müssen. Dies wird nicht ohne Folgen für den Holzmarkt und die Ertragssituation der Forstbetriebe bleiben (SPELLMANN et al. 2007).

Angesichts dieser tief greifenden Veränderungen bedarf es langfristig ausgerichteter Anpassungsstrategien, um die Risiken zu verteilen bzw. zu begrenzen. Die wichtigste forstbetriebliche Weichenstellung ist diesbezüglich die Baumartenwahl. Es stellt sich die Frage nach den Zukunftsaussichten unserer Hauptwirtschaftsbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer. Ihre heutigen Flächenanteile und Anbauswerpunkte sind ein Spiegelbild der Standorte und Regionalklimate, aber auch der sich im Laufe der Zeit ändernden eigentümerspezifischen und gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald. In den letzten 20 Jahren wurde mit Einführung des naturnahen Waldbaus im Staatswald und dessen Förderung im Privatwald der Laubwaldvermehrung Vorrang eingeräumt und insbesondere die Buche verstärkt angebaut. Ob diese Entwicklung angesichts der erwarteten Klimaänderungen anhalten wird, hängt vom Anpassungspotenzial der Buche ab, das seit einiger Zeit kontrovers diskutiert wird (u. a. LEUSCHNER et al. 2001, SCHRAMEL u. RENNENBERG 2002, RENNENBERG et al. 2004, v. LÜPKE 2004, AMMER et al. 2005, BRËDA et al. 2006, CZAJKOWSKI 2006, KÖLLING et al. 2005, KÖLLING u. ZIMMERMANN 2007, SPELLMANN et al. 2007, BOLTE et al. 2007, MANTHEY et al. 2007).

Mit diesem Beitrag wird der Versuch unternommen, wesentliche Gesichtspunkte der laufenden Diskussion aufzugreifen und zusammenzuführen.

2 Klimatische Ansprüche der Buche

2.1 Verbreitungsgebiet der Buche

Der Schwerpunkt der natürlichen Verbreitung der Buche (*Fagus sylvatica* L.) liegt in Mittel- und Westeuropa mit seinem atlantischen bis subkontinentalen Klima (s. Abb. 1). In Süd- und Südosteuropa ist sie auf die montane Stufe beschränkt, wobei sie in der Mitte und im Süden der iberischen Halbinsel ebenso fehlt wie im südlichen Griechenland. Im Osten reicht ihr Areal vom westlichen und südlichen Polen, über die Westukraine und Rumänien bis nach Bulgarien. Ausgeklammert bleiben die Tieflagen in Zentral- und Ostpolen sowie die ungarische und rumänische Tiefebene. Die Nordgrenze der Buche verläuft von Südengland entlang der Südküste Norwegens und reicht bis in den Süden Schwedens (RÖHRIG u. BARTSCH 1992).

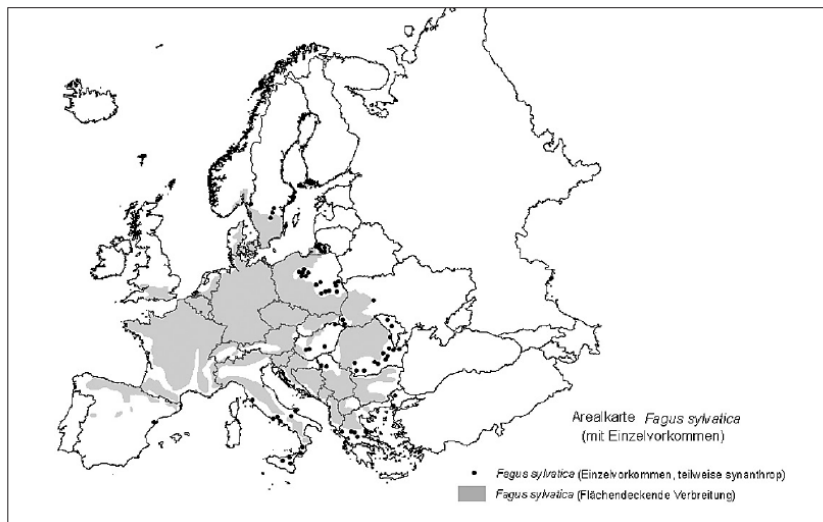


Abbildung 1: Arealkarte von *Fagus sylvatica* in Europa mit Einzelvorkommen (Punkte) (Institut für Geobotanik der Martin Luther Universität Halle-Wittenberg, Arbeitsgruppe Chronologie und Biogeographie der Gefäßpflanzen 2006; aus CZAJKOWSKI 2006)

In Deutschland ist die Buche fast flächendeckend vertreten. Ausgenommen sind lediglich die Hochlagen der Mittelgebirge und der Alpen, azonale Standorte (Auen, Brücher, Moore), Standorte mit hoch anstehendem Grundwasser, ausgeprägte Stauwasserstandorte und zu trockene Standorte wie Sandpodsole sowie extrem flachgründige Böden (vgl. OTTO 1994, ELLENBERG 1996). Der Hauptanteil der heutigen Buchenstandorte (ca. 75 %) befindet sich in einer Höhenlage von 200 bis 800 m (kolline bis mittelmontane Höhenstufe) (BMVEL 2004). Im Nordharz wächst die Buche bis in eine Höhe von etwa 600 m ü. NN, im südlichen Harz bis 800 m ü. NN. Im Schwarzwald reicht sie von 150 bis 1400 m ü. NN, im Bayerischen Wald bis 1300 m ü. NN und in den Nordalpen von 300 bis 1700 m ü. NN (OTTO 1994, FELBERMEIER 1993).

Angeichts des erwarteten Klimawandels sind die klimatischen Verhältnisse im natürlichen Verbreitungsgebiet der Buche von besonderem Interesse, um ihr heutiges klimatisches Anpassungsvermögen einschätzen zu können. Buchenwälder existieren in Mitteleuropa bei Jahresniederschlägen zwischen 460 bis > 2000 mm (LEUSCHNER 1998). Die Verbreitung wird vor allem durch die Bodenwasserverfügbarkeit begrenzt (RENNENBERG et al. 2004). Ist diese gering, so wird die Buche durch verschiedene Eichenarten ersetzt, im feuchten Bereich treten an ihre Stelle die Arten der Hartholzau (ELLENBERG 1996). Im nordöstlichen Mitteleuropa spricht vieles dafür, dass als weitere begrenzende Faktoren die thermische Kontinentalität mit heißen Sommern (Juli-Mitteltemperatur > 19 °C) und kalten, langen Wintern (> 141 Tage mit < 0 °C Mitteltemperatur und einer Januar-Mitteltemperatur < -3 °C) sowie die kurzen Wachstumsperioden (< 217 Tage ≥ 7 °C) hinzu-

kommen (CZAJKOWSKI 2006). Darüber hinaus sind auch noch zeitlich diskret auftretende Extremeinflüsse (Hitze, Dürre, Frost, Überflutungen) zu beachten (CZAJKOWSKI et al. 2006, RENNENBERG et al. 2004).

Derartige klimatische Informationen allein reichen allerdings nicht aus, um die Anpassungsfähigkeit der Buche oder anderer Baumarten an klimatische Veränderungen zu bewerten und Entscheidungshilfen für die Baumartenwahl zu geben. Dies gilt auch für die derzeit viel diskutierten Klimahüllen, bei denen das natürliche Vorkommen von Baumarten in Abhängigkeit von aktuellen und künftig erwarteten Jahresmitteltemperaturen und Jahresniederschlagssummen dargestellt wird (KÖLLING u. ZIMMERMANN 2007). Dieser statische Ansatz greift zu kurz, weil die natürlichen Verbreitungsgrenzen oft ungewiss sind und die künstlichen Verbreitungsgrenzen ebenso vernachlässigt werden wie die Extremstandorte. Außerdem bleiben die Anpassungspotenziale verschiedener Herkunftsorte wie auch die Konkurrenzeinflüsse anderer Baumarten unberücksichtigt. Des Weiteren wird nicht von den aussagefähigeren klimatischen Verhältnissen in der Vegetationszeit ausgegangen und es findet der lokale Bodenwasserhaushalt keine Beachtung (KÄTZEL 2008, BOLTE et al. 2008).

2.2 Trockenstressrisiko der Buche

In Zukunft ist damit zu rechnen, dass es vermehrt zu Trockenstressbedingungen kommt, die die Vitalität und Produktivität der Wälder massiv beeinträchtigen können. Hierzu wird auch die bereits zu beobachtende Verlängerung der Vegetationszeiten beitragen (MENZEL 1997).

Wie bei allen anderen Baumarten hängt bei der Buche die Effizienz der Wasserversorgung eines jeden Baumes von seinen Möglichkeiten ab, Wasser aufzunehmen und in Zeiten hoher Transpiration Wasserdefizite zu vermeiden. Relevant für die Beurteilung von Trockenstressgefährdung ist die tatsächliche Bodenfeuchte. Da es je nach Standort und Baumart spezifische Grenzen für Trockenstress gibt, ist eine pauschale Bewertung des Gefährdungspotentials nicht möglich.

Die Wasseraufnahme der Bäume wird von der räumlichen Ausdehnung des Wurzelwerks und der Feinwurzeldichte bestimmt. Bei abnehmendem Bodenwassergehalt wird die tatsächliche Verdunstung zunehmend eingeschränkt. Der Wasserpotenzialgradient zwischen Boden und Atmosphäre verändert sich, die zunehmende Saugspannung mindert die pflanzeninterne Wasserverfügbarkeit, das Sprosswasserpotenzial nimmt ab (RENNENBERG et al. 2004, BRÉDA et al. 2006). Als Abwehrreaktion schließt die Buche ihre Stomata. Hierdurch wird zum einen die Photosynthese eingeschränkt, zum anderen aber auch die Transpiration. Letztere beeinflusst entscheidend den Wasserpotenzialgradienten zwischen Boden und Wurzel und damit die Wasseraufnahme. Sind die Potenzialunterschiede zu groß, reißt die Wasserversorgung ab und es kommt zum Absterben der Feinwurzeln (LEUSCHNER u. HERTEL 2003). Bei hohen Temperaturen und geschlossenen Sto-

mata fehlt zudem die Verdunstungskälte, so dass die Blätter direkt geschädigt werden. Es kommt zu einem vorzeitigen Blattabfall und in extremen Trockenperioden zu einem teilweisen oder vollständigen Absterben alter Bäume (BRÉDA et al. 2006). Eine besondere Gefährdung der Buche ist zu erwarten, wenn sich Dürreereignisse wie im Jahre 2003 in aufeinander folgenden Jahren wiederholen sollten, weil dann die Bäume weder ihr Feinwurzelwerk noch ihre Belaubung ausreichend regenerieren können (vgl. RENNENBERG et al. 2004, BRÉDA et al. 2006). Nach solchen trockenen, heißen Sommern kommen im Folgejahr als weitere Stressfaktoren die vermehrte Blüte und Fruktifikation der Buche hinzu, die in einem erheblichen Umfang Reservestoffe binden.

MANTHEY et al. (2007) gehen davon aus, dass Buchenbestände auf sommertrockenen Standorten in Gebieten mit heute weniger als 650 mm Jahresniederschlag oder auf flachgründigen Böden in Zukunft bei trockenerem Klima nachhaltig geschädigt werden können. Dies kann, muss aber nicht so sein, weil es im Zusammenhang mit den Klimaänderungen zahlreiche Unwägbarkeiten gibt, der örtliche Bodenwasserhaushalt eine entscheidende Rolle spielt und bei der Buche eine große genetische Variation besteht. Ergebnisse aus Freiland- und Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass es deutliche Unterschiede in der Trockenstresstoleranz sowohl entlang eines West-Ost-Klimagradienten zwischen deutschen und polnischen Herkünften (CZAJKOWSKI u. Bolte 2006) als auch zwischen Lokalpopulationen in Baden-Württemberg (SCHRAML u. RENNENBERG 2002) gibt.

2.3 Höhenbonität der Buche in Abhängigkeit von Klimafaktoren

Die standortsbezogene Baumartenwahl erfolgt in der Forstpraxis auf ökologischer und ökonomischer Grundlage. Zu den wichtigsten ökonomischen Kriterien zählt die Ertragskraft der Baumarten, die im Allgemeinen durch absolute Höhenbonitäten (Höhe im Alter 100) angegeben wird. Im Gegensatz zur Fichte, bei der das Bestandeswachstum vor allem von den Niederschlags- und Wärmeverhältnissen beeinflusst wird (MITSCHERLICH 1950a), hat das Großklima im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss auf die Höhenwuchsleistung der Buche (MITSCHERLICH 1950b). Die Variablen Nährstoffangebot, Durchwurzelbarkeit des Bodens und Luftfeuchtigkeit erklären zu mehr als 90 % die Zusammenhänge zwischen der Leistung der Buche und den Standortsfaktoren in Baden-Württemberg (RÖHE 1985)

Dieser Sachverhalt lässt sich anhand der Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur (BWI 2) in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein weitgehend bestätigen (BMVEL 2004). Für diese Bundesländer liegen die Temperaturwerte und die berechnete Klimatische Wasserbilanz (KWB = Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration) auf einem 200 x 200 m Raster vor. Die potenzielle Evapotranspiration beschreibt die Wassermenge, die eine Pflanze bei uneingeschränkter Wasserverfügung ver-

dunsten kann. Der Bilanzierungszeitraum umfasst die Vegetationszeiten (VZ) der Klimanormalperiode 1961 - 1990.

Die Bonitierung der Buchenvorkommen erfolgte an jedem BWI-Punkt. Die zweidimensionale Dichteverteilung (Temperatur und KWB) wurde mit der Buchengrundfläche pro Hektar gewichtet, so dass vollbestockte Reinbestände mit größerem Gewicht in die Dichteverteilung eingehen als einzelne Buchen in Mischbeständen. In Abbildung 2 werden die 95 %-Quantile der Dichteverteilung für drei Bonitätsstufen und das 95 %-Quantil aller von der BWI in den vier Bundesländern erfassten Waldstandorte verglichen.

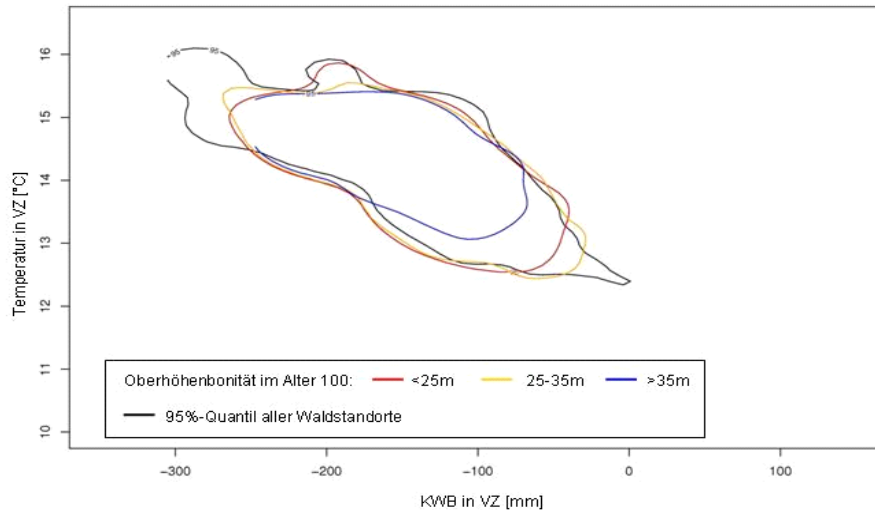


Abbildung 2: Die 95 %-Quantile für 3 Bonitätsstufen der BWI-Buchen-Stichprobenpunkte in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (KWB = Klimatische Wasserbilanz; VZ = Vegetationszeit)

Das Buchenvorkommen in den vier untersuchten Bundesländern deckt unter den Klimaverhältnissen der Normalperiode weite Teile des dortigen Standortspektrums ab. Nur auf den extrem warm-trockenen (hohes Wasserbilanzdefizit) und den äußerst kühl-nassen Standorten (geringes Defizit in der KWB) ist die Buche in Nordwestdeutschland nicht vertreten. Auffallend ist, dass einige Buchenvorkommen unter den bisherigen klimatischen Verhältnissen in der Vegetationszeit trotz größerer Wasserbilanzdefizite beachtliche Leistungen zeigen. Geht man von einem negativen Effekt auf das Höhenwachstum bei Mangel an pflanzenverfügbarem Wasser aus, heißt dies im Umkehrschluss, dass die Buchenbestände auf relativ gut wasserversorgten Standorten stocken müssen. Die Trockenheitsgrenze von ca. 275 mm KWB-Defizit in der Vegetationszeit hat keinen Einfluss auf die Höhenbonität der Buche, weil andere Standortsfaktoren kompensatorisch wirken. Auch die Wärmegrenze von rd. 15,5 °C in der Vegetationszeit hat keinen

Einfluss auf die Höhenleistung, jedoch wird der positive Effekt des Temperaturanstiegs im Bereich von ca. 12,5 °C bis 13,5 °C sichtbar.

3 Klimaszenarien

3.1 Einleitung

Der vierte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) fasst den aktuellen Kenntnisstand zur globalen Erwärmung zusammen (IPCC 2007). Er dokumentiert die Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen, die sich mit den wissenschaftlichen Grundlagen, möglichen Anpassungsstrategien und der Verminderung des Klimawandels beschäftigten. Der Arbeitsbereich „Wissenschaftliche Grundlagen“ kommt zu dem Ergebnis, dass der globale Klimawandel fast ausschließlich auf menschliches Handeln zurückzuführen ist. Daraus ergeben sich für die Zukunft verschiedene Projektionen der Klimaentwicklung. Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung, zum Wirtschaftswachstum und zur Umweltentwicklung. Aus der Kombination dieser Faktoren resultieren Emissionsszenarien, die einen mehr oder minder starken Anstieg der Globaltemperatur im 21. Jahrhundert erwarten lassen (s. Abb. 3).

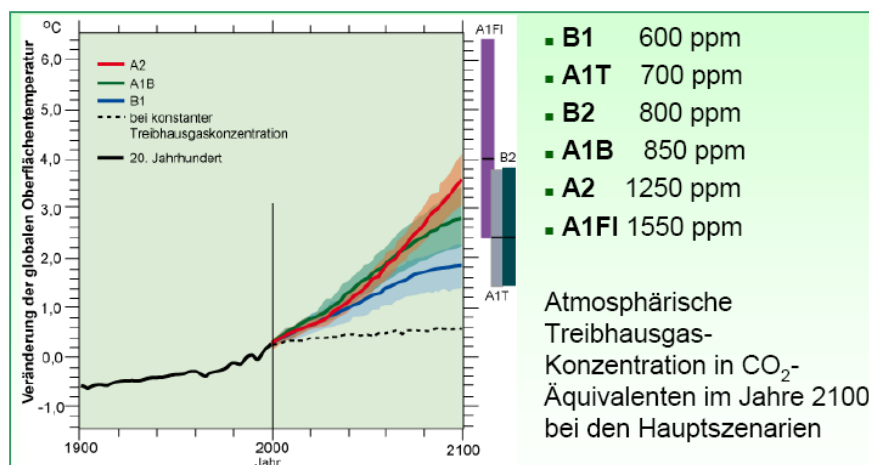


Abbildung 3: Erwarteter Temperaturanstieg bei verschiedenen Klimaszenarien (IPCC 2007)

Die Bandbreite der erwarteten globalen Erwärmung reicht von knapp 2 °C beim moderaten B1-Szenario bis über 6 °C beim A1FI-Szenario. Auffällig ist, dass etwa bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Schwankungsbreite der prognostizierten Temperaturerhöhung zwischen allen Szenarien nur bei rund 1 °C liegt und eine Erwärmung der Globaltemperatur um ca. 2 °C erwartet wird. Erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts nehmen die Unterschiede zwischen den Szenarien deutlich zu (s. Abb. 3). Erklären lässt sich diese Entwicklung durch die lange Verweilzeit der Treibhausgase in der Atmosphäre, die z. B. beim Kohlendioxid (CO₂) über einhundert Jahre beträgt. Dies hat zur Folge, dass bereits emittierte Treibhausgase auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts größtenteils noch nicht abgebaut sein werden und damit zur weiteren Erwärmung beitragen. Die Verhältnisse am Ende des 21. Jahrhunderts werden entscheidend davon abhängen, ob die Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten signifikant reduziert werden können, um den Temperaturanstieg langfristig auf maximal 2 °C zu stabilisieren.

Zur Berechnung möglicher Klimaentwicklungen werden globale Klimamodelle eingesetzt. Ihre maximale räumliche Auflösung beträgt 200 x 200 Kilometer. Für viele Fragestellungen ist diese räumliche Auflösung unzureichend, so dass für bestimmte Gebiete Regionalmodelle entwickelt wurden. Bei ihnen wird zwischen dynamischen und statistischen Modellen unterschieden. Dynamische Verfahren nutzen die Ergebnisse der Globalmodelle als Eingangsdaten und simulieren die Klimaentwicklung auf einem höher aufgelösten regionalen Gitternetz. Als Beispiel sei hier das Regionalmodell REMO des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie genannt (JACOB et al. 2007, JACOB 2001). Statistische Verfahren gehen davon aus, dass die globalen Klimamodelle die großräumigen Zirkulationsmuster (Wetterlagen) treffend beschreiben. Über die Kausalkette von sich verändernden Häufigkeitsverteilungen der Großwetterlagen werden lokale Auswirkungen auf meteorologischen Größen wie Niederschlag und Temperatur abgeleitet.

Das statistische Modell WETTREG (SPEKAT et al. 2007) liefert regionale Klimaprojektionen für Deutschland. Es nutzt die Ergebnisse, die mit dem Globalmodell ECHAM5/MPI-OM des Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie erzeugt wurden (ROECKNER et al. 2003, ROECKNER et al. 2004). Über statistische Beziehungen werden für Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Zeitreihen berechnet. Die mit WETTREG generierten Zeitreihen liegen für den Zeitraum von 1960 bis 2100 in verschiedenen Varianten der Szenarien B1, A1B und A2 vor. Damit das Modell für Szenariozwecke eingesetzt werden kann, wurde es für den Zeitraum von 1961 bis 1990 anhand von gemessenen Beobachtungsdaten validiert. Anschließend wurden die Stationsdaten der WETTREG-Simulationen mithilfe von Regionalisierungsverfahren auf ein Flächenraster interpoliert, um flächenhafte bzw. regionalspezifische Aussagen zum zukünftigen Klima treffen zu können.

3.2 Klimawandel in Deutschland

Das IDP-Modul der Potsdamer Firma CEC (Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH) kombiniert verschiedene Verfahren zur Regionalisierung der WETTREG-Stationsdaten auf ein Modellgitter (KREIENKAMP u. SPEKAT 2006). Während höhenunabhängige Wetterelemente, wie z. B. die Sonnenscheindauer mit dem abstandsgewichteten IDW-Verfahren (Inverse-Distance-Weighting) in die Fläche interpoliert werden, wird zur Regionalisierung der Lufttemperatur und der Niederschlagswerte die IDW-Methode mit einem höhenabhängigen Regressionsverfahren kombiniert.

Nachfolgend werden die wesentlichen klimatischen Veränderungen, die bei dem höheren Emissionsszenario A1B und dem moderaten Szenario B1 für Deutschland bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden, kurz vorgestellt. Der Vergleich der jeweiligen Szenarien wird für die Periode 2071 - 2100 und der Klimanormalperiode 1961 - 1990 durchgeführt. Die Ergebnisse wurden der Veröffentlichung von SPEKAT et al. 2007 entnommen.

Die Jahresmitteltemperatur für Deutschland betrug in der Klimanormalperiode 8,2 °C. Thermisch bevorzugt waren die großen Flusstäler in West- und Südwestdeutschland (Rhein, Main etc.) sowie die tieferen Lagen in Westdeutschland, Teile Brandenburgs und Sachsen-Anhalts. Hier erreichte die Jahresmitteltemperatur Werte von über 9 °C, während unterdurchschnittliche Temperaturwerte in den höheren Lagen der Gebirgsregionen auftraten. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für ganz Deutschland eine Temperaturzunahme von 1,8 °C (B1) bis 2,3 °C (A1B) erwartet. Regional sind die Unterschiede jedoch deutlich ausgeprägter. Eine vergleichsweise geringe Erwärmung wird für die Küstengebiete von Nord- und Ostsee, die Mittelgebirge und Ostbayern prognostiziert, überdurchschnittlich hoch wird die Temperaturzunahme im gesamten Norden Deutschlands und dem Alpenvorland mit annähernd 3 °C ausfallen. Im Jahresgang fällt die Temperaturzunahme sehr unterschiedlich aus. Die Wintermonate werden bis zu 3,5 °C (z. T. bis 4 °C) wärmer, das Frühjahr erfährt dagegen nur eine Erhöhung der Temperatur von unter 1 °C und die Sommer- und Herbstmonate folgen dem Jahrestrend mit einem Anstieg von 2 - 2,5 °C.

Beim Niederschlag zeigen die WETTREG-Simulationen einen klaren Trend. Während bei den Sommerniederschlägen mit teilweise erheblichen Rückgängen gerechnet werden muss, wird für die Wintermonate infolge der Zunahme von Westwindwetterlagen ein deutlicher Niederschlagsanstieg erwartet. Gebiete mit derzeit geringen Niederschlägen von teilweise unter 200 mm in den Sommermonaten sind im Osten und Nordosten Deutschlands sowie am Niederrhein zu finden. Der Süden, insbesondere die Alpen mit dem Alpenvorland, zeichnet sich durch überdurchschnittlich hohe Sommerniederschläge in der Periode 1961 - 1990 aus. Im Winter sind die regionalen Unterschiede in den Niederschlagsverhältnissen, abgesehen von den Mittelgebirgsregionen und den Alpen, relativ gering. Für die Periode 2071 - 2100 wird je nach Szenario im Mittel mit einer Zunahme der

Winterniederschläge von 20 - 30 % gerechnet. Allerdings wird insbesondere die Westhälfte Deutschlands von der Niederschlagszunahme profitieren (teilweise bis zu 80 % höhere Niederschläge). Weite Bereiche Ostdeutschlands und der Alpenraum erfahren hingegen nach den Klimasimulationen keine wesentliche Erhöhung der Winterniederschläge. In den Sommermonaten ist dagegen landesweit mit einer Abnahme der Niederschläge von rund 20 % zu rechnen, wobei für Teile Ostdeutschlands (Vorpommern) nach dem höheren A1B-Szenario ein Niederschlagsrückgang von bis zu 40 % prognostiziert wird. Dies bedeutet, dass in denjenigen Regionen Deutschlands, die bereits jetzt unter einem erhöhten Niederschlagsdefizit in den Sommermonaten zu leiden haben, in Zukunft die Gefahr von Trockenstress- und Wassermangelsituationen erheblich zunehmen wird.

3.3 Pflanzenverfügbares Wasser

Klimatische Wasserbilanz (KWB) und nutzbare Feldkapazität (nFK) sind wesentliche klimatologische und hydrologische Kenngrößen, um die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers charakterisieren zu können. Die nutzbare Feldkapazität entspricht der Wassermenge, die ein Boden in unveränderter Lagerung maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann, abzüglich des Totwassers.

Auf Grundlage der WETTREG-Simulationsergebnisse wurden für den Zuständigkeitsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt mit den Ländern Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein die Stationsdaten auf ein Modellgitter mit einer horizontalen räumlichen Auflösung von 200 x 200 Metern interpoliert. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM/ETH (SCHULLA 1997) wurde die potenzielle Evapotranspiration nach PENMAN-MONTEITH (MONTEITH 1965) ebenfalls für das 200 m-Raster berechnet und die klimatische Wasserbilanz für alle vier Bundesländer ermittelt. Die Auswertung wurde für das Szenario A1B (erhöhtes Emissionsszenario) durchgeführt, da dieses Szenario derzeit als die wahrscheinlichste Projektion der Klimaentwicklung angesehen wird (GERSTENGARBE 2008). Für jedes Klimaszenario wurden 10 Realisierungen (Varianten) pro Dekade erzeugt (SPEKAT et al. 2007). Um die Unsicherheit der Szenarienbandbreite bei der Berechnung der KWB zu berücksichtigen und der forstlichen Praxis einen Handlungskorridor aufzuzeigen, wurde jeweils die trockene und feuchte Variante des A1B-Szenarios ausgewertet.

In Tabelle 1 ist für den Zeitraum 1961 - 1990 und für die Dekaden 2041 - 2050 sowie 2091 - 2100 die jeweils modellierte KWB getrennt nach den vier Bundesländern aufgeführt. Die KWB wurde für die Vegetationsperiode bestimmt, die für die Entwicklung der Pflanzen maßgeblich ist. Die Vegetationsperiode wurde nach der Methode von MENZEL (1997) getrennt für die Bilanzierungsperioden berechnet, so dass die in Zukunft erwartete Verlängerung der Vegetationszeit bei der KWB berücksichtigt werden konnte.

Bereits in der Klimanormalperiode wird im Flächenmittel aller untersuchten Bundesländer ein mehr oder weniger hohes Wasserbilanzdefizit für die Vegetationszeit ausgewiesen. Die niedrigsten Defizite in der Klimanormalperiode weist das Land Hessen mit rund 120 mm auf (feuchte Variante A1B). Demgegenüber ist das mittlere Wasserbilanzdefizit von Sachsen-Anhalt bereits heute mit über 200 mm deutlich größer als in den anderen Bundesländern. In Zukunft werden sich die Wasserbilanzdefizite in allen vier Bundesländern weiter erhöhen und bis zum Ende des Jahrhunderts zwischen 250 mm und fast 400 mm (Sachsen-Anhalt, trockene Variante A1B) erreichen. Die Ursache sind trockene Sommer bei gleichzeitig zunehmender Verdunstungsleistung der Pflanzen infolge höherer Temperaturen.

Tabelle 1: *Simulierte Klimatische Wasserbilanz [mm] für die feuchte und trockene Variante des A1B-Szenarios für die Vegetationsperiode (März/April bis Oktober)*

Klimatische Wasserbilanz	1961 – 1990		2041 – 2050		2091 – 2100	
	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken
Hessen	-118	-137	-182	-273	-245	-303
Niedersachsen	-121	-165	-165	-255	-294	-303
Sachsen-Anhalt	-214	-246	-286	-353	-369	-395
Schleswig-Holstein	-139	-181	-142	-234	-284	-296

Ob der Bodenwasserspeicher das Wasserdefizit künftig ggf. ausgleichen kann, soll am Beispiel von Niedersachsen gezeigt werden (s. Abb. 4). Dazu wurde für die drei Untersuchungsperioden die nutzbare Feldkapazität zur KWB addiert. Die nutzbare Feldkapazität wurde aus der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000 (BÜK50) abgeleitet. Am Beispiel der feuchten und trockenen Variante des A1B-Szenarios wird sichtbar, dass bereits heute in einigen Regionen Niedersachsens das Bodenwasser nicht mehr ausreicht, um eine uneingeschränkte Verdunstung der Pflanzen zu ermöglichen. Im Landesmittel beträgt das Defizit bei der trockenen Variante für die Vegetationszeit rund 30 mm. Bei der feuchten Variante wird im Landesmittel noch ein leichter Überschuss berechnet. Das Defizit der KWB schwankt ohne Berücksichtigung des nutzbaren Bodenwassers zwischen 120 und 165 mm (s. Tab. 1). Das Defizit ist allerdings nicht flächendeckend über das Land gleich verteilt. Besonders die Sandböden im Osten Niedersachsens weisen für die Periode 1961 - 1990 gebietsweise ein Wasserdefizit von über 100 mm auf. Westniedersachsen und das südniedersächsische Bergland verfügen hingegen zurzeit noch über einen Wasserüberschuss. Zur Mitte des Jahrhunderts wird das Wasserdefizit unter Berücksichtigung der nutzbaren Feldkapazität je nach Variante des A1B-Szenarios

deutlich zunehmen und im Flächenmittel auf 30 mm (feuchte Variante) bis 120 mm (trockene Variante) steigen.

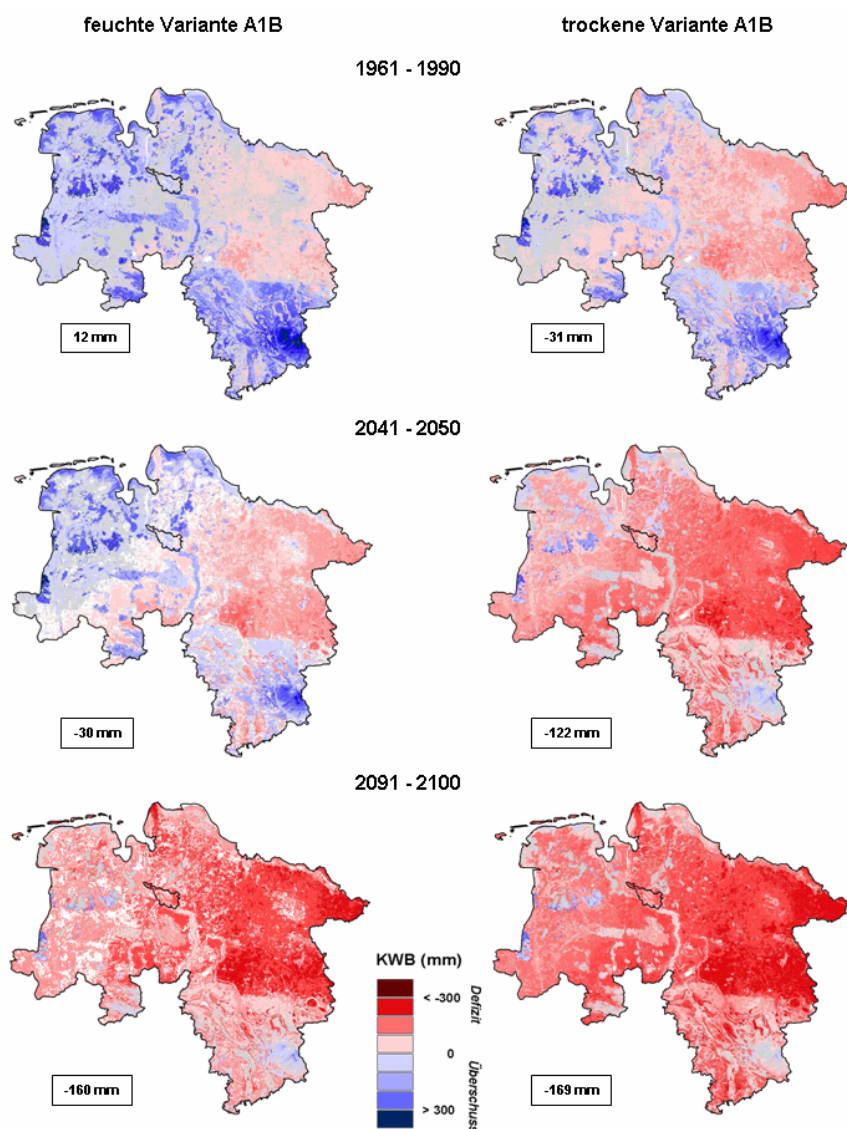


Abbildung 4: Periodische Veränderungen in der Wasserversorgung in Niedersachsen - Summe aus Klimatischer Wasserbilanz (KWB) und nutzbarer Feldkapazität (BÜK50) für die Vegetationszeit

Weite Bereiche des niedersächsischen Tieflandes werden dann ein mehr oder minder hohes Defizit in der klimatischen Wasserbilanz aufweisen, und nur Standorte mit hohen Bodenwasservorräten im Westen des Landes und die höheren Mittelgebirgslagen sind noch durch einen leichten Wasserüberschuss gekennzeichnet. In der Dekade 2091 bis 2100 ist dann fast flächendeckend, mit Ausnahme der Hochlagen des Harzes, mit einem teilweise über 200 mm reichenden hohen Wasserdefizit in der Vegetationszeit zu rechnen. Im Flächenmittel beträgt das Wasserbilanzdefizit dann bei beiden Varianten rund 170 mm.

In den anderen untersuchten Bundesländern ist mit einer vergleichbaren Erhöhung des Wasserbilanzdefizits während der Vegetationszeit zu rechnen (s. auch Tab. 1). Insbesondere in Sachsen-Anhalt und den angrenzenden ostdeutschen Bundesländern wird sich die Wasserversorgung der Pflanzen auf sandigen Böden mit geringer Wasserhaltefähigkeit deutlich verschlechtern.

4 Folgen des Klimawandels für die Buche

4.1 Auswirkungen auf die Wasserversorgung - Beispiel Hessisches Ried

Angaben zur klimatischen Wasserbilanz erlauben eine erste Einschätzung des Wasserangebotes für bestimmte Räume. Abgesicherte Erkenntnisse über das pflanzenverfügbare Wasser an einem bestimmten Standort lassen sich nur über Messungen zum Bodenwasserhaushalt und die Erfassung der örtlich wirksamen klimatischen Faktoren gewinnen. Um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen auf die Wasserversorgung eines Standortes beurteilen zu können, ist der Einsatz eines Wasserhaushaltsmodells notwendig, das die wesentlichen Komponenten des hydrologischen Prozessgeschehens abbildet. Am Beispiel einer Standortsimulation mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM/ETH (SCHULLA 1997) werden die Folgen des Klimawandels auf einen Buchenbestand im Hessischen Ried untersucht.

Das Hessische Ried ist durch sehr geringe Reliefunterschiede und einen natürlicherweise geringen Grundwasserflurabstand charakterisiert. Bedingt durch großflächige Grundwasserabsenkungen entwickelten sich die ursprünglich stark grundwasserbeeinflussten Standorte aus tiefgründigem, sandigem Substrat zu trockenen Standorten. Auf vielen Flächen treten in unterschiedlichen Tiefen tonige Stauschichten auf. Mit rund 640 mm Jahresniederschlag und einer Jahresmitteltemperatur von 9,5 °C gehört das Hessische Ried bereits heute zu den trockensten und wärmsten Regionen in Hessen.

Im Rahmen der Waldökosystemstudie Hessen wurden im Jahr 1998 im Hessischen Ried drei Intensivmessflächen in einem Kiefern-, Eichen- und Buchenbestand eingerichtet (EICHHORN 1992). Für die Standorte wurden bereits ab 1974 in einem Abstand von rund fünf Jahren waldwachstumskundliche Daten erhoben.

Der Buchenbestand wies im Jahr 1998 ein mittleres Alter von 98 Jahren auf, die mittlere Bestandeshöhe betrug 27 m und der mittlere Brusthöhendurchmesser (BHD) 32 cm. Der Buchenbestand war voll geschlossen und es gab am Boden keine Tendenz zur Vergrasung.

Die klimatische Wasserbilanz weist für die Klimanormalperiode 1961 – 1990 für den Buchenstandort in der Vegetationszeit ein mittleres Wasserdefizit von 275 mm auf (s. Tab. 2). Bei einer reinen Grasvegetation würde sich das Defizit auf knapp 165 mm reduzieren. Dies liegt deutlich über dem Flächenmittel von Hessen mit rund 120 mm (vgl. Tab. 1). Bis zum Jahr 2050 wird unter Berücksichtigung der Bestandesentwicklung das Defizit in der klimatischen Wasserbilanz des Buchenstandortes je nach Variante des A1B-Szenarios auf 315 bis 460 mm zunehmen (Gras: 200-320 mm Defizit). Die Bestandesentwicklung bis zum Jahr 2050 wurde mit dem Waldwachstumssimulator WaldPlaner (HANSEN 2006, NAGEL et al. 2006) fortgeschrieben. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass sich der Buchenbestand ohne forstliche Eingriffe weiter entwickelt und ein Abgang nur durch natürliche Mortalität erfolgt.

Auf der Buchenfläche betrug die Verdunstung während der Vegetationszeit im Mittel der Referenzperiode 1961 - 1990 rund 75 % ($ETR = 500$ mm) der aufgrund der klimatischen Verhältnisse maximal möglichen Verdunstungsleistung von 650 mm (ETP). Das Ergebnis der Wasserhaushaltssimulation zur realen Verdunstung liegt über den Werten, die von MÜLLER (2003) für einen Buchenstandort im nordostdeutschen Tiefland gemessen wurden. Die überdurchschnittlich hohe Verdunstungsleistung der Buchenfläche im Hessischen Ried ist auf die hohe Bestandesdichte, die dort höheren Temperaturen und die im Vergleich zu Nordostdeutschland längere Vegetationszeit zurückzuführen.

Bei der feuchten Variante des A1B-Szenarios verdunsten in der Dekade 2041 - 2050 bei vergleichbarem Niederschlagsangebot von 380 mm ebenfalls rund 75 % der maximal möglichen Verdunstungsmenge. Allerdings erhöht sich infolge der Temperaturzunahme und der verlängerten Vegetationsperiode die reale Verdunstung (ETR) auf 540 mm. Dabei vergrößert sich das Wasserbilanzdefizit (Niederschlag minus realer Verdunstung) auf 160 mm. Das Defizit wird durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser kompensiert.

Bei der trockenen Variante des A1B-Szenarios fallen im Mittel der Jahre 2041 - 2050 rund 320 mm und damit knapp 20 % weniger Niederschlag im Vergleich zur feuchten Variante und zur Referenzperiode. Ebenso wie bei der feuchten Variante findet keine Grundwasserneubildung statt (s. Tab. 2). Auffällig ist die stark eingeschränkte reale Verdunstungsleistung der Buchenfläche im Vergleich zur feuchten Variante. Im Mittel beträgt die reale Verdunstung 450 mm und liegt damit um 90 mm unter der Verdunstungsrate der feuchten A1B-Variante (s. Tab. 2). Rund zwei Drittel der Differenz werden durch die verminderte Niederschlagsmenge während der Vegetationszeit verursacht. Aber auch die eingeschränkte Auffüllung des Bodenspeichers während des Winterhalbjahres hat zur Folge, dass zu Beginn

der Vegetationsperiode nicht genügend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden ist, so dass die Verdunstungsleistung der Buchenfläche frühzeitig eingeschränkt wird. Die relative Verdunstung (ETR/ETP-Verhältnis) während der Vegetationszeit ist mit im Mittel rund 0,58 sehr niedrig und deutet darauf hin, dass unter trockenen A1B-Klimabedingungen die Buchenfläche im Hessischen Ried zukünftig einem hohen Trockenstressrisiko ausgesetzt sein würde.

Tabelle 2: Wasserbilanz für die Vegetationsperiode (März/April bis Oktober) für den Buchenstandort im Hessischen Ried (alle Angaben in mm; ETR/ETP [-])

	Klimanormalperiode 1961 – 1990		feuchte Variante A1B, 2041 – 2050		trockene Variante A1B, 2041 – 2050	
	Gras	Buche	Gras	Buche	Gras	Buche
Niederschlag	375	375	380	380	320	320
ETR	390	500	425	540	400	450
Interzeption	25	85	45	115	40	110
Sickerwasser	80	20	80	0	45	0
Wasserbilanz	-95	-145	-125	-160	-125	-130
ETP	540	650	580	695	640	780
ETR/ETP	0.72	0.77	0.73	0.78	0.63	0.58
KWB	-165	-275	-200	-315	-320	-460

ETR = reale Verdunstung; ETP = potenzielle Verdunstung; KWB = klimatische Wasserbilanz;
Wasserbilanz = Niederschlag – (ETR + Sickerwasser)

Der Vergleich der KWB mit der Bilanz der Wasserhaushaltsmodellierung verdeutlicht, dass bereits heute die Buchenfläche im Hessischen Ried während der Vegetationszeit ein Wasserdefizit aufweist, das durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser kompensiert werden muss. Die Buche reagiert mit einer eingeschränkten Verdunstungsleistung auf das Wasserdefizit. In Zukunft würde sich ohne den negativen Effekt der Grundwasserabsenkungen unter den klimatischen Bedingungen der feuchten Variante des A1B-Szenarios eine leichte und unter denen der trockenen Variante eine deutliche Verschlechterung in der Wasserversorgung der Buchenfläche im Hessischen Ried einstellen.

Im Hessischen Ried stellt die Trockenheit ein wesentliches Risiko für die Bestandesstabilität dar. Hohe Wasserbilanzdefizite während der Vegetationszeit können nur bedingt durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser ausgeglichen

werden. Auch in Zukunft muss von einem erhöhten Trockenstressrisiko für den Buchenbestand im Hessischen Ried ausgegangen werden. Hierbei liefert die Wasserhaushaltssimulation wertvolle Erkenntnisse, die eine im Vergleich zur KWB bessere Risikoabschätzung in der Wasserversorgung des Buchenbestandes unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen erlaubt.

4.2 Auswirkungen auf die Anbauschwerpunkte

Der Klimawandel wird sich vielfältig auf die Wälder in Deutschland auswirken. Zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre belegen, dass sich die forstliche Forschung der Thematik angenommen hat (u. a. THOMASIIUS 1991, LINDNER et al. 2002, RENNENBERG et al. 2004, v. LÜPKE 2004, WAGNER 2004, AMMER et al. 2005, BOLTE 2005, BRÉDA et al. 2006, WOHLGEMUTH et al. 2006, SPELLMANN et al. 2007, BOLTE u. IBISCH 2007, KÖLLING u. ZIMMERMANN 2007, MANTHEY et al. 2007, KÄTZEL 2008).

Die Folgen des Klimawandels für die Buche werden unterschiedlich beurteilt. VON LÜPKE (2004) stuft unter Abwägung zahlreicher Kriterien die Buche neben Weißtanne und Fichte als relativ schlecht angepasste Baumart ein. Er empfiehlt, wo möglich, mit Mischungen zu arbeiten, um die Risiken zu verteilen und die Elastizität der Bestände nach Störungen zu erhöhen. Für RENNENBERG et al. (2004) ist die Buche eine trockenstress- und überflutungssensitive Baumart, deren einseitige Bevorzugung im Zuge des Waldumbaus der letzten 20 Jahre mit einem hohen Risikopotenzial für die Zukunft verbunden ist. Auch er empfiehlt, die Buche zur Risikoverminderung mit anderen Baumarten zu mischen, die entweder gegenüber Trockenheit oder gegenüber Staunässe toleranter sind. Im Gegensatz zu diesen Auffassungen stehen die Ansichten von AMMER et al. (2005) oder KÖLLING et al. (2005, 2007). Sie gehen davon aus, dass der erwartete Klimawandel dazu führen wird, dass die Buche zur Hauptbaumart der mitteleuropäischen Wälder wird.

Bei Abwägung der in diesem Beitrag zusammengetragenen Fakten lässt sich festhalten, dass die Buche ein großes Anpassungspotenzial hat, das ihr auch in Zukunft einen bedeutenden Flächenanteil an der Waldfläche in Deutschland sichern wird. Es werden jedoch nicht immer die gleichen Standorte sein, auf denen sie heute als führende Baumart stockt. Die Buche wird sich im Zuge des Klimawandels sowohl neue Bereiche erschließen als auch Gebiete mit extremen Standortbedingungen oder hohem Gefährdungspotenzial verlieren.

Die höheren Lagen (montane Höhenstufe) der Mittelgebirge und der Alpen werden mit zunehmender Erwärmung und Verlängerung der Vegetationszeit als potenzielle Buchenstandorte in Frage kommen. Hier wird die Buche aber auch in Zukunft mit der Fichte konkurrieren, da deren Wasserbedarf dort trotz abnehmender Sommerniederschläge in der Regel gedeckt sein wird. Demgegenüber werden Flächen mit einer schlechten Wasserversorgung zunehmend als potenzielle Anbaustandorte ausfallen, weil die Buche relativ trockenstressempfindlich ist. Dies

betrifft Bereiche des ost- und nordostdeutschen Tieflandes, die bereits heute selten mit Buche bestockt sind, aber auch Gebiete im norddeutschen Tiefland (z. B. Lüneburger Heide) und möglicherweise in den tieferen Lagen Südwestdeutschlands (z. B. Rhein-Main-Gebiet, Oberrheingraben). Als gefährdete Standorte kommen die wechselfeuchten und wechselfrockenen Standorte hinzu, auf denen schon heute in bzw. nach Trockenperioden vermehrt Buchen in Altbeständen ausfallen bzw. die eine geringe Vitalität mit späterem Befall durch den Buchenprachtkäfer zeigen (s. Abb. 5) sowie die Mittelgebirgslagen mit hohen Niederschlagsmengen und anhaltend hoher Luftfeuchtigkeit in milden Wintern, wo die Buchen-Komplexkrankheit unter Beteiligung der Buchenwollschildlaus und des Pilzes *Neonectria coccinea* ein großes Gefährdungspotenzial darstellt (vgl. AREND et al. 2006, NIESAR 2007, PETERCORD et al. 2007).



Abbildung 5: Buchenvitalitätsschwäche im NFA Reinhausen

Allgemein ist zu berücksichtigen, dass das Spätfrostisiko für nicht überschirmte Buchenverjüngungen zunehmen wird, weil viele phänologische Beobachtungen (MENZEL 1997) belegen, dass seit Ende des letzten Jahrhunderts der Vegetationsbeginn bei vielen Pflanzenarten 1 bis 2 Wochen früher gegenüber der Klimanormalperiode eingesetzt hat. Die Klimaprojektionen lassen für die Zukunft einen noch früheren Beginn der Vegetationszeit erwarten, wobei nicht mit einem Rückgang des Spätfrostisikos gerechnet wird.

5 Fazit

Der erwartete Klimawandel wird maßgeblich durch das menschliche Handeln verursacht (IPCC 2007). Die weitere Entwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird davon abhängen, inwieweit die Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten signifikant reduziert werden können. Ein Anstieg der Globaltemperatur um 2 °C bis zum Jahr 2050 erscheint allerdings kaum noch abwendbar. Für die in langen Zeiträumen produzierende Forstwirtschaft stellt der Klimawandel daher eine besondere Herausforderung dar.

Die Klimaprojektionen lassen auch für Deutschland einen deutlichen Temperaturanstieg erwarten. Gleichzeitig werden die Sommermonate trockener als bisher, und in den Wintern ist mit einer Zunahme der Niederschläge zu rechnen. Das verminderte Niederschlagsangebot in der Vegetationszeit wird sich negativ auf die Wasserversorgung der Pflanzen auswirken. Trockenstresstolerantere Baumarten werden für die Forstwirtschaft an Bedeutung gewinnen.

Die Buche zählt nicht zu dieser Gruppe von Baumarten. Dennoch kann gegenwärtig nicht abgesichert beurteilt werden, welche Rolle diese Baumart mit ihrem heute ausgesprochen breiten Anbauspektrum in Zukunft spielen wird. Den zusätzlichen Chancen in den höheren Lagen des Berglandes stehen Risiken in den niederschlagsärmeren Regionen mit durchlässigen bzw. flachgründigen Böden gegenüber, die heute noch ihrem Anbaubereich zugeschrieben werden. Hinzu kommen die Standorte mit hoch anstehendem Grundwasser und stauenden Horizonten, die angesichts der erhöhten Winterniederschläge zu einem wachsenden Problem werden können. Auf die besonderen Gefahren einmaliger bzw. sich wiederholender Dürreereignisse selbst auf optimalen Buchenstandorten wurde verwiesen (s. Kap. 2.2).

Die Unsicherheiten in der Einschätzung der Zukunftsaussichten der Buche zeigen, dass die Klimafolgenforschung noch in ihren Anfängen steckt. Der derzeitige Kenntnisstand über die Auswirkungen des Klimawandels und über die Sensitivität, Stabilität bzw. Elastizität von Buchenwald-Ökosystemen muss noch erweitert werden. Hierzu sind Systembewertungen erforderlich, wie KÄTZEL (2008) sie fordert, die zahlreiche Faktoren einbeziehen. Zu ihnen zählen nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Einflussgrößen.

Für den forstlichen Praktiker, der nicht so lange warten will bzw. warten kann, gilt zunächst die allgemeine Empfehlung von BOLTE (2005), der zu einem risikobewussten Waldbau mit der Buche rät. Konkret heißt dies, strenge Beachtung der standörtlichen Verhältnisse (Klima, Boden, Lage), Berücksichtigung der biotischen und abiotischen Risiken, Begründung und Entwicklung von Mischbeständen, gestaffelte Hochdurchforstungen, die den bodenpfleglichen Unter- und Zwischenstand erhalten, Z-Baum-Zahlen, die Verluste berücksichtigen, und differenziert geführte Zielstärkennutzungen, die neben der Dimension und der Qualität auch die Vitalität und Bestandesstellung beachten.

Literatur

- AMMER, C.; ALBRECHT, L.; BORCHERT, H.; BROSINGER, F.; DITTMAR, C.; ELLING, W.; EWALD, J.; FELBERMEIER, B.; VON GILSA, H.; HUSS, J.; KENK, G.; KÖLLING, C.; KOHNLE, U.; MEYER, P.; MOSANDEL, R.; MOOSMEYER, H.-U.; PALMER, S.; REIF, A.; REHFUESS, K.-E. u. STIMM, B. (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von RENNENBERG et al. (2004). *AFJZ*, 176, 60-67
- AREND, J.-P.; EISENBARTH, E. u. PETERCORD, R. (2006): Buchenkomplexkrankheit in Luxemburg und Rheinland-Pfalz – Schadsymptome, Ausmaß und Entwicklung der Schäden. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 59, 11-22
- BMVEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2004): Die zweite Bundeswaldinventur - BWI. Das Wichtigste in Kürze, Bonn, 87 S.
- BOLTE, A. (2005): Die klimatische Anpassungsfähigkeit der „Mutter des Waldes“. Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa. *AFZ/Der Wald*, 60, 1077-1078
- BOLTE, A. u. IBISCH, P.L. (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. *AFZ/Der Wald*, 62, 572-576
- BOLTE, A.; CZAJKOWSKI, T. u. KOMPA, T. (2007): The north-eastern distribution range of European beech – a review. *Forestry*, 80, 413-428
- BOLTE, A.; IBISCH, P.; MENZEL, A. u. ROTHE, A. (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. *AFZ/Der Wald*, 63, 800-803
- BRÉDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A. u. DREYER, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe draught: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644
- CZAJKOWSKI, T. (2006): Zur zukünftigen Rolle der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der natürlichen Vegetation. Diss., Universität Göttingen, 63 S.
- CZAJKOWSKI, T. u. BOLTE, A. (2006): Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. *AFJZ*, 117, 30-40
- CZAJKOWSKI, T.; KOMPA, T. u. BOLTE, A. (2006): Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Forstarchiv*, 77, 203-216
- EICHHORN, J. (HRSG.) (1992): 10 Jahre Waldökosystemstudie Hessen: Ergebnisse und Perspektiven. Forschungsber. Hessische Forstliche Versuchsanstalt 15
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 5. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart
- FELBERMEIER, B. (1993): Der Einfluß von Klimaänderungen auf die Areale von Baumarten. Methodenstudie und regionale Abschätzung für die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München, 134
- GERSTENGARBE, F.-W. (2008): Der Klimawandel – Ursachen und Veränderungen. Gartower Gespräche. Eigenverlag
- HANSEN, J. (2006): Der WaldPlaner – Ein System zur Entscheidungsunterstützung in einer nachhaltigen Forstwirtschaft. In: DEGENHARDT, A. u. WUNN, U. (Hrsg.): Sammlung der Beiträge von der 18. Jahrestagung der Sektion Biometrie und Informatik des DVFFA vom 25. bis 27.09.2006 in Trippstadt. Die Grüne Reihe, 112-119
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2007): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC
- JACOB, D. (2001): A note to the simulation of the Annual and Interannual Variability of the Water Budget over the Baltic Sea Drainage Basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 77, No. 1-4, 61-74.
- JACOB, D.; BÄRRING, L.; CHRISTENSEN, O.B.; CHRISTENSEN, J.H.; HAGEMANN, S.; HIRSCHI, M.; KJELLSTRÖM, E.; LENDERINK, G.; ROCKEL, B.; SCHÄR, C.; SENEVIRATNE, S.I.; SOMOT, S.; VAN ULDEN, A. u. VAN DEN HURK, B. (2007): An inter-comparison of regional climate models for

- Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81, 31-52. DOI 10.1007/s10584-006-9213-4
- KÄTZEL, R. (2008): Klimawandel – Zur genetischen und physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldbaumarten. *Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie*, 42, 9 - 15
- KÖLLING, C.; WALENTOWSKI, H. u. BORCHERT, H. (2005): Die Buche in Mitteleuropa. *AFZ/Der Wald*, 60, 696-699
- KÖLLING, C. u. ZIMMERMANN, L. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefährstoffe – Reinhaltung der Luft*, 67, 259-268
- KÖLLING, C.; ZIMMERMANN, L. u. WALENTOWSKI, H. (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte. *AFZ/Der Wald*, 62, 584-588
- KREIENKAMP, F. u. SPEKAT, A. (2006): IDP2006 – Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Teilbericht zum Vorhaben: Ableitung von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose- und Präsentationstools
- LEUSCHNER, C. (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. *Ber. Reinh. Tüxen-Ges.*, 10, 5-18
- LEUSCHNER, C.; BACKES, K.; HERTEL, D.; SCHIPKA, F.; SCHMITT, U.; TERBORG, O. u. RUNGE, M. (2001): Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. *Trees in dry and wet years. Forest ecology and Management*, 149, 33-46
- LEUSCHNER, C. u. HERTEL, D. (2003): Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. *Progress in Botany*, 64, 405-438
- LINDNER, M.; BADECK, F.-W.; BARTELHEIMER, P.; BONK, S.; CRAMER, W.; DIETER, M.; DÖBBELER, H.; DURSÝ, J.; DUSCHL, C.; FABRIKA, M.; FRÖMDLING, D.; GUNDERMANN, E.; HENNIG, P.; HÖLZER, W.; LASCH, P.; LEISCHNER, B.; LIESEBACH, M.; POMMERENING, A.; POTT, M.; PRETZSCH, H.; SCHLOTT, W.; SCHOLZ, F.; SPELLMANN, H.; SUCKOW, F.; SUDA, M. u. WOLFF, B. (2002): Integrating Forest Growth Dynamics, Forest Economics and Decision Making to Assess the Sensitivity of the German Forest Sector to Climate Change. *Forstwiss. Centralblatt, Volume 121, Supplement 1*, 191-208
- LÜPKE, B. v. (2004): Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. *Forstarchiv*, 75, 43-50
- MANTHEY, M.; LEUSCHNER, C. u. HÄRDITLE, W. (2007): Buchenwälder und Klimawandel. *Natur und Landschaft*, 82, 441-445
- MENZEL, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen. *Forstliche Forschungsberichte München*, 164
- MITSCHERLICH, G. (1950a): Die Bedeutung der Wuchsgebiete für das Bestandeswachstum von Buche, Eiche, Erle und Birke. *Forstw. Cbl.*, 69, 27-51
- MITSCHERLICH, G. (1950b): Die Bedeutung der Wuchsgebiete für das Bestandeswachstum von Fichte und Douglasie. *Forstw. Cbl.*, 69, 184-211
- MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: 205-224
- MÜLLER, J. (2003): Wasserhaushalt von Kiefern- und Buchenreinbeständen und von Kiefern- und Buchenmischbeständen im nordostdeutschen Tiefland. 10. Lysimetertagung der Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irding/Österreich, *BAL Bericht*, 105-109
- NAGEL, J.; DUDA, H. u. HANSEN, J. (2006): Forest Simulator BWINPro7. *Forst und Holz*, 61, 427-429
- NIESAR, M. (2007): Symptom- und Ursachenanalyse der aktuellen Buchenerkrankungen in höheren Lagen von Nordrhein-Westfalen. *Diss. Universität Göttingen*, 115 S.
- OTTO, H.-J. (1994): *Waldökologie*. Ulmer Verlag, Stuttgart, 391 S.
- PETERCORD, R.; DELB, H. u. SCHRÖTER, H. (2007): Vermeintliche Dürreschäden an Buche entpuppen sich als Käferbefall: Schwere Schäden durch den Buchen-Prachtkäfer in Baden-Württemberg. *AFZ/Der Wald*, 62, 686-690

- RENNENBERG, H.; SEILER, W.; MATYSSEK, R.; GESSLER, A. u. KREUZWIESER, J. (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? Allg. Forst- u. J.-Ztg., 175, 210-224
- ROECKNER, E.; BAEUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. u. TOMPKINS A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 1: Model Description. MPI-Berichte, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bd. 349
- ROECKNER, E.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; SCHLESE, U. u. SCHULZWEIDA, U. (2004): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution. MPI-Berichte, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bd. 354
- RÖHE, P. (1985): Untersuchungen über das Wachstum der Buche in Baden-Württemberg. Schriftenr. Landesforstverw. Baden-Württemberg, Nr. 61
- RÖHRIG, E. u. BARTSCH, N. (1992): Der Wald als Vegetationsform und seine Bedeutung für den Menschen. Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin, 350 S.
- SCHRAML, C. u. RENNINGER, H. (2002): Ökotypen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Trockenstress. Forstw. Cbl., 121, 59-72
- SCHULLA, J. (1997): Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM-ETH, Anwender-Handbuch, Geogr. Inst. ETH Zürich
- SPEKAT, A.; ENKE, W. u. KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf der Basis mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2; FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138, Publikationen des Umweltbundesamtes
- SPELLMANN, H.; SUTMÖLLER, J. u. MEESENBURG, H. (2007): Risikovorwarnung im Zeichen des Klimawandels. AFZ/Der Wald, 52, 1246-1249
- THOMAS, H. (1991): Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Wälder in Mitteleuropa. Forstw. Cbl., 110, 305-330
- UBA (UMWELTBUNDESAMT) (2006): Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Hintergrundpapier
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – Konsequenzen für künftige Baumartenwahl und Bestandesstrukturierung. Tagungsbericht des Brandenburgischen Forstvereins e. V. zur Jahrestagung vom 26. Mai 2004 in Eberswalde, 56-66
- WOHLGEMUT, T.; BUGMANN, H.; LISCHKE, H. u. TINNER, W. (2006): Wie rasch ändert sich die Waldvegetation als Folge von raschen Klimaänderungen? Forum für Wissen, 7-16

Korrespondierender Autor:

Johannes Suttmöller
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstr. 2
37079 Göttingen
E-Mail: Johannes.Sutmoeller@nw-fva.de
URL: www.nw-fva.de

Prof. Dr. Hermann Spellmann
Dr. Caroline Fiebiger
Dr. Matthias Albert
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt