©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 22, 96-106. Hannover 2010

Mitteleuropäische Wälder und der prognostizierte Klimawandel – Fakten und Thesen zur Situation der Buche

- Christoph Leuschner, Göttingen -

Abstract

This short literature review summarizes important new findings about the response of Central European tree species to current and expected future climatic changes. Factors considered are rising temperatures, extended growing season, warmer winters with reduced snow cover, elevated exposure to summer drought, reduced air humidities, and rising atmospheric CO_2 concentrations. In addition, the effect of the high atmospheric N deposition is discussed. The focus is set on European beech with spezial concideration of mature trees.

1. Einleitung

Analysen des Klimageschehens der vergangenen Jahrzehnte lassen Trends zu wärmeren Sommern und – zumindest regional – zu stärkerer Sommertrockenheit in Mitteleuropa erkennen (FINK et al. 2003, SCHÖNWIESE et al. 2003, PAL et al. 2004, MAYER et al. 2005), die sich mit großer Wahrscheinlichkeit in den kommenden Dekaden fortsetzen werden (IPCC 2007). Modellrechnungen lassen weiterhin annehmen, dass sich nicht nur die Temperatur- und Niederschlagsmittel verändern werden, sondern auch das Ausmaß der Witterungsextreme zunehmen wird. Beispielsweise sagen SCHÄR et al. (2004) für Europa für das Ende des 21. Jahrhunderts eine deutlich größere Häufigkeit von Hitzewellen als heute voraus, die in ihrem Ausmaß jener des Sommers 2003 ähneln (s. auch MEEHL & TEBALDI 2004). Sollten die Mitteltemperaturen tatsächlich um 2.5 bis 3.5 °C zunehmen und die Sommerniederschläge in manchen Regionen um bis zu 25 Prozent sinken (ROWELL & JONES 2006, JACOB et al. 2008), dann sind tiefgreifende Auswirkungen auf die Vitalität der Bäume und damit auf die mitteleuropäische Forstwirtschaft sehr wahrscheinlich. Aufgrund der langen Umtriebszeiten braucht der Forstsektor möglichst bald belastbare Informationen darüber, wie die wichtigsten Nutzhölzer (vor allem Fichte, Buche, Kiefer, Douglasie und die Eichen) auf den zu erwartenden Klimawandel reagieren werden und welche Baumarten besonders empfindlich sind.

Während bei der boreal-alpisch verbreiteten Fichte das Gefährdungspotential in großen Teilen Mitteleuropas durch ein zukünftig trocken-wärmeres Klima unstrittig ist, sind die Prognosen über die zukünftige Vitalität der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) unter den vorhergesagten Klimaveränderungen nicht einheitlich. Manche Forstwissenschaftler betonen bei dieser schwerpunktmäßig subozeanisch verbreiteten Baumart deren Regenerationsfähigkeit nach Schädigungen und verweisen auf Befunde, die eine gewisse Trockenheitstoleranz dieser wichtigsten Baumart der natürlichen Waldvegetation Mitteleuropas belegen (z.B. FELBERMEIER 1994, AMMER et al. 2005). Dem scheinen Ergebnisse von ökophysiologischen Untersuchungen zu widersprechen, die eine erhebliche Trockenheitsempfindlichkeit der Buche aufzeigen (z.B. LEUSCHNER et al. 2001a, RENNENBERG et al. 2004, GEßLER et al. 2007, LEUSCHNER 2008). Die Widersprüchlichkeit zeugt vor allem von den bestehenden Wissensdefiziten im

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Bereich der Stressphysiologie von Bäumen wie auch von der mangelnden Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf das Freiland und Altbestände.

Verlässliche Angaben über das Verhalten der Baumarten gegenüber dem vorhergesagten Klimawandel sind auch deshalb so schwierig, weil sich wahrscheinlich mindestens sechs wichtige, das Waldwachstum beeinflussende Umweltfaktoren gleichzeitig ändern werden:

- die Lufttemperatur in der Vegetationsperiode (Zunahme),
- die Länge der Vegetationsperiode (Zunahme),
- die Dauer der winterlichen Schneebedeckung (Abnahme),
- das Ausmaß und die Dauer sommerlicher Trockenperioden (Zunahme),
- die mittlere Luftfeuchte (Abnahme), und
- die atmosphärische CO_2-Konzentration (Zunahme).

Darüber hinaus kann der Klimawandel in Mitteleuropa nicht unabhängig von den relativ hohen Stickstoffeinträgen in die Ökosysteme betrachtet werden, die wahrscheinlich auch in den kommenden Dekaden beträchtlich sein werden und in fast allen Waldökosystemen Mitteleuropas bereits in der Vergangenheit zu Veränderungen in den Ökosystemfunktionen geführt haben (s. Übersicht in ELLENBERG & LEUSCHNER 2010).

Hier sollen einige Aspekte der Ökologie mitteleuropäischer Baumarten diskutiert werden, die für deren Antwort auf zukünftige Klima- und Umweltveränderungen wichtig sind. Der Schwerpunkt soll dabei auf der Buche liegen, der wichtigsten Baumart der natürlichen Waldvegetation Mitteleuropas.

2. Auswirkungen der Temperaturerhöhung

Im vergangenen Jahrhundert ist die Jahresmitteltemperatur in Deutschland um 0.9 K (ich verwende im Folgenden bei Temperaturänderungen Grad Kelvin) angestiegen (Flächenmittel, Periode 1901 - 2008); der Anstieg im Sommer (1.1 K) war dabei etwas größer als jener im Winter (0.8 K, Deutscher Wetterdienst, 2008). Besonders stark war die Erwärmung in den Jahren nach 1980. Eine Temperaturerhöhung könnte das Wachstum der Bäume auf mehreren Wegen beeinflussen, (1) über eine verlängerte Vegetationsperiode mit entsprechend größerem Kohlenstoffgewinn, (2) einen positiven Effekt auf die Netto-Photosyntheserate, (3) höhere Atmungsverluste des Baumes im Sommer und in den wärmeren Wintern, (4) positive Effekte auf die Blattflächenentwicklung und andere Wachstumsprozesse, und (5) über eine Reduktion der winterlichen Schneebedeckungsdauer, die – im Gegensatz zu den erhöhten Wintertemperaturen – die Frostgefährdung im Wurzelraum erhöhen kann.

Tatsächlich hat sich die Länge der Vegetationsperiode bei der Buche in Mitteleuropa im Zeitraum 1950 - 2000 durch Vorverlegung des Blattaustriebs und späteren Blattabwurf um 5 Tage verlängert (bei der Eiche sogar um 9 Tage, MENZEL 2003). Der Trend ist signifikant, dürfte aber bisher für die Produktivität der Buche kaum relevant sein, da die Vegetationsperiode nur um etwa 3 Prozent verlängert wurde. Zumindest kann dieser Effekt die in jüngster Zeit vielerorts beobachtete Zunahme des Holzzuwachses bei der Rotbuche (z.B. PRETZSCH 1996, RÖHLE o.J.) nicht erklären. Findet allerdings im 21. Jahrhundert eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um weitere 3 K oder mehr statt, dann rechnen DAVI et al. (2006) mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode in Frankreich um rund 38 Tage, wodurch sich die Produktivität der Wälder zweifellos bedeutend erhöhen würde.

Inwieweit erhöhte Sommertemperaturen auch durch die unmittelbare Beeinflussung von Photosynthese und Wachstum – also nicht über eine verlängerte Wachstumsperiode – zu einer erhöhten Produktivität der Bäume führen, lässt sich weniger leicht klären, weil eine Erhöhung

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

der Temperaturen in den Außertropen in der Regel mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode verbunden ist (vgl. DAVI et al. 2006). So ergab sich in einem globalen Datensatz zwar eine lineare Zunahme der Nettoprimärproduktion der Wälder mit einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur von 5 auf 10 °C (LUYSSAERT et al. 2007); eine Trennung des Einflusses von Temperatur und Vegetationsperiodenlänge erfolgte jedoch nicht. KÖRNER (2006) nimmt sogar an, dass die Jahresmitteltemperatur so gut wie keinen Einfluss auf die Produktion von Wäldern hat, wenn die Zeit der Anpassung nur lang genug ist. Das würde für einen nur geringen direkten Temperatureinfluss und einen dominierenden Zeitfaktor bei der thermischen Abhängigkeit der Produktivität der Wälder sprechen.

Labor- und Gewächshausexperimente mit Jungbäumen zeigen dagegen häufig deutliche Effekte erhöhter Temperaturen auf produktionsrelevante Größen: Beispielsweise fanden FENDER et al. (2010) eine 60-prozentige Zunahme der Blattfläche und Produktivität von Jungbuchen, wenn sie bei 24 °C anstelle von 18 °C angezogen wurden. Von Gräsern und krautigen Pflanzen ist bekannt, dass das Blattstreckungswachstum nahezu linear mit steigenden Temperaturen zunimmt (z.B. KÖRNER & WOODWARD 1987). Ob sich diese Ergebnisse jedoch auf Altbäume im Freiland übertragen lassen, muss offen bleiben. Zumindest kann man nach der globalen Produktivitätsanalyse von LUYSSAERT et al. (2007) und auf ökosystemaren Gasflussmessungen beruhenden Modellen (DAVI et al. 2006), annehmen, dass eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 2.5 bis 4 K in Deutschland (also von heute 8-9 auf 11-13 °C) sicherlich zu einer Produktionssteigerung der Wälder führen wird, solange nicht andere Umweltfaktoren (Stickstoff- oder Phosphormangel, Wasserknappheit oder zunehmende Herbivoren- und Parasitendichten) limitierend wirken.

Wärmere Winter haben in den vergangenen 40 Jahren zu einer signifikanten Reduktion der Schneebedeckungsdauer in Mitteleuropa geführt. In den deutschen Mittelgebirgen und in den Alpen bis in 1000-1500 m Höhe sank die Andauer der Schneebedeckung um etwa 20 Prozent, in den höheren Lagen der Alpen dagegen kaum oder gar nicht (KIRCHGÄßNER 2001, ELSÄSSER & BÜRKI 2002, FOKEN 2004). Eine Folge ist stärkeres Bodengefrieren, weil die isolierende Schneedecke fehlt, und – zumindest bei der Fichte belegt – eine größere Mortalität der Feinwurzeln (GAUL et al. 2008). Ob wärmere Winter die Atmungsverluste der Bäume erhöhen oder aber senken, weil der Wurzelraum durch Schneearmut zeitweise kälter wird, ist für die Buche und die anderen mitteleuropäischen Baumarten außerhalb der Alpen noch ungenügend bekannt (vgl. für die Waldgrenzstandorte z.B. WIESER et al. 2005 und HAVRANEK & MATYSSEK 2005)

3. Auswirkungen einer erhöhten CO_2-Konzentration

Die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre hat sich seit Beginn der industriellen Revolution von etwa 280 auf heute knapp 390 ppm in Meereshöhe erhöht, ist also um etwa 30 Prozent gestiegen. Wenn nicht einschneidende Maßnahmen ergriffen werden, kann Ende dieses Jahrhunderts mit Werten >600 ppm CO_2 gerechnet werden. In Stadtnähe werden schon heute häufig Konzentrationen >400 ppm erreicht (ZISKA & BUNCE 2006).

Obwohl höhere CO_2-Konzentrationen kurzfristig die Photosynthese steigern, zeigen Pflanzen, die unter erhöhtem CO_2 assimilieren, mittel- und langfristig nur eine mäßige oder geringe Erhöhung des Kohlenstoffgewinns, weil der Photosyntheseapparat im Zuge einer Akklimatisierung herunterreguliert wird. In einer Meta-Analyse von FACE-(free-air carbon dioxide enrichment)-Experimenten fanden AINSWORTH & ROGERS (2007) eine Steigerung des Photosynthesesvermögens (A_{max}) verschiedener pflanzlicher Lebensformen im Mittel um 31 Prozent, wenn die CO_2-Konzentration um rund 60 % (von etwa 360 auf 570 ppm) erhöht

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

wurde. Jungbäume (1 - 20 Jahre alt) zeigten eine mittlere Produktivitätssteigerung um 23 % (NORBY et al. 2005). Möglicherweise lassen sich jedoch diese Ergebnisse nicht auf Altbäume übertragen: In einem FACE-Experiment mit ausgewachsenen Bäumen fanden ASSHOFF et al. (2006) nämlich keine Wachstumsstimulation nach vierjähriger CO_2-Begasung bei Buchen, Eichen und anderen mitteleuropäischen Baumarten. Verschiedene Ursachen könnten für einen nur schwachen oder fehlenden CO_2-Effekt bei ausgewachsenen Bäumen verantwortlich sein, darunter eine Limitierung des Wachstums durch Stickstoff oder Wasser, ein verstärkter Kohlenhydratfluss in die Feinwurzeln oder eine Akklimatisierung von Photosynthese und Blattleitfähigkeit (reduzierte Stomadichte) an erhöhte CO_2-Konzentrationen. Wenngleich auch manche Modellstudien einen starken CO_2-Düngungseffekt auf das Waldwachstum im 21. Jahrhundert prognostizieren (z.B. DAVI et al. 2006), deuten die wenigen bisher vorliegenden empirischen Daten doch eher auf einen nur schwachen produktionsfördernden CO_2-Effekt in Wäldern durch den Klimawandel hin.

4. Auswirkungen von verstärkter Sommertrockenheit

In Deutschland sind die Niederschlagsmengen in den letzten hundert Jahren angestiegen, und zwar im Mittel um 97 mm a^{-1} in der Periode 1901 - 2008 (Deutscher Wetterdienst 2008). Das gilt für die Niederschläge im Frühjahr, Herbst und Winter, während sich im Sommer eine leichte Abnahme (-3 mm a^{-1} im Flächenmittel) andeutet. Regional bestehen dabei große Unterschiede mit zunehmenden Sommerniederschlägen im Alpenvorland und weiten Teilen Bayerns und Nordrhein-Westfalens, dagegen Abnahmen vor allem im Südosten Deutschlands und in der mittleren und östlichen Norddeutschen Tiefebene (RAPP & SCHÖNWIESE 1996).

Klimaszenarien unter der Annahme einer Verdopplung der CO_2-Konzentration sagen eine weitere Abnahme der Sommerniederschläge vor allem im Osten Deutschlands um 10-30 Prozent, in bestimmten Regionen sogar um bis zu 50 %, voraus (z.B. SPEKAT et al. 2007), während die Winterniederschläge weiter ansteigen sollten. Trockenere Sommer bedeuten nicht nur geringere Bodenwasservorräte, vor allem in extremen Trockenperioden, sondern auch eine insgesamt reduzierte Luftfeuchtigkeit. Auch dieser Umweltfaktor kann – und zwar unabhängig von der Bodenfeuchte – Vitalität und Wachstum der heimischen Baumarten beeinflussen, wie LENDZION & LEUSCHNER (2008) und WERNEYER & LEUSCHNER (unveröff.) an Jungpflanzen der Buche experimentell nachweisen konnten. Ausgedehnte sommerliche Hitzewellen könnten danach Buchen und deren Jungwuchs sowohl über Bodenwasserverknappung als auch über die Einwirkung trockener Luft schädigen.

Neben der fördernden Wirkung einer Erhöhung von Temperatur und CO_2-Konzentration müssen bei der Abschätzung der Folgen des prognostizierten Klimawandels auf den Wald also die negativen Konsequenzen einer ansteigenden Trockenstressbelastung untersucht werden. Dies soll hier stichwortartig im Hinblick auf die Buche geschehen, in dem physiologische und standortökologische Befunde vor allem aus Freilandstudien an Altbäumen herangezogen werden (vgl. auch LEUSCHNER 2008):

1. Altbuchen haben in niederschlagsärmeren Regionen eine kleinere Feinwurzelbiomasse als in feuchten Regionen (MEIER & LEUSCHNER 2008a). Entlang eines Niederschlagsgradienten in Mitteldeutschland (1050 bis 520 mm a^{-1}) nahm die Bestandes-Feinwurzelbiomasse um rund 35 % ab.

2. Bodentrockenheit reduziert die mittlere Lebensdauer der Feinwurzeln der Buche und erhöht damit die Wurzelmortalität (MEIER & LEUSCHNER 2008 a, b). Trockenheitsbeeinflusste Buchenbestände haben danach eine geringere aufnehmende Wurzeloberfläche und

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

offenbar einen größeren spezifischen Kohlenstoffbedarf zum Unterhalt des Feinwurzelsystems. Eine Vergrößerung des Wurzel-/Spross-Verhältnisses, wie dies vor allem bei trockenheitsbeeinflussten krautigen Pflanzen beobachtet wird, wurde dagegen bei Altbuchen nicht gefunden.

3. Extreme Trockenperioden führen bei Buchen vor allem auf flachgründigen Böden zu vorzeitigem Blattabwurf ab Juli oder August, und zwar auf großer Fläche (z.B. GRUBER 2004, BRÉDA et al. 2006, LEUSCHNER 2008). Buchenwälder im trockenen Südwesten von Sachsen-Anhalt (mitteldeutsches Trockengebiet) haben auch in mittleren Jahren eine bis zu 5 Wochen kürzere Belaubungszeit als Bestände gleicher Höhenlage in feuchteren Regionen (LEUSCHNER & ASPELMEIER, unveröff.). Sommertrockenheit kann also auch im überwiegend humiden Mitteleuropa die Assimilationsperiode verkürzen und den Jahres-C-Gewinn von Altbuchen auf diesem Wege deutlich reduzieren (DREYER 1997).

4. Reduzierte Sommerniederschläge führen dagegen nach Befunden in Buchenwäldern aus Mitteldeutschland nicht zu einer dauerhaften Verkleinerung der Bestandesblattfläche und auch nicht zu einer geringeren mittleren Blattgröße, wie es einem Grundtyp der pflanzlichen Trockenstress-Antwort entsprechen würde. Im Gegenteil, LEUSCHNER et al. (2006) und MEIER & LEUSCHNER (2008 c) fanden entlang von Niederschlagstransekten in Mitteldeutschland eine signifikante Zunahme der Bestandesblattfläche (Blattflächenindex LAI) wie auch der mittleren Blattgröße von den niederschlagsreichen (> 900 mm a^{-1}) zu den trockenen Beständen (< 600 mm a^{-1}). Diese unerwartete Reaktion erklärt sich aus der Tatsache, dass die Buche einer deterministischen Blattentfaltungsrhythmik mit einmaligem Austrieb im Mai unterliegt. Die Zahl der im Vorjahr angelegten Blattknospen und das Ausmaß der Blattstreckung im Mai werden von verschiedenen Umweltfaktoren bestimmt, darunter der Temperatur, dem Stickstoffangebot und der Wasserversorgung. Die ersten beiden Faktoren sind an den sommertrockenen Standorten günstiger als an den feuchteren und kühleren; auch die Wasserversorgung ist im Mai noch günstiger, so dass eine größere Blattfläche ausgebildet wird. Wenn im Hochsommer an den trockenen Standorten Wassermangel auftritt, kann die Buche als Art mit nur einmaligem Austrieb nur mit Blattabwurf, nicht jedoch durch Anpassung mit verringerter Blattfläche antworten. Im Hinblick auf die transpirierende Oberfläche muss die Buche deshalb als wenig anpassungsfähig gelten.

5. Welche Bedeutung trockenheitsbedingte Kavitation im Leitsystem der Buche und anderer Baumarten für Blatt- und Zweigabwürfe und Trockenschäden hat, ist noch nicht befriedigend geklärt (BRÉDA et al. 2006). Schwellenwerte der Kavitation (definiert als 50-prozentiger Leitfähigkeitsverlust von Sonnenzweigen) liegen bei Altbäumen der Buche bei etwa -3.1 MPa; viele andere mitteleuropäische Baumarten sind weniger empfindlich. Aufgrund einer luftfeuchteabhängigen Blattleitfähigkeitsregulation kann die Buche jedoch Emboliebildung im Leitgewebe der Zweige meist wirkungsvoll unterbinden (LEMOINE et al. 2002). Allerdings sind Schwach- und Feinwurzeln der Buche stärker durch Kavitation gefährdet (Schwellenwert bei -0.3 bis -0.5 MPa) als Zweige (REWALD & LEUSCHNER, unveröff.).

Aktive Anreicherung von Osmotika im Symplasten der Blätter (oder der Wurzeln) ist eine pflanzliche Strategie, um Turgorverluste in Trockenperioden zu vermeiden und Stoffwechsel und Wachstum aufrecht zu erhalten. SCHIPKA (2002) und BACKES (1996) fanden allerdings keine Hinweise auf aktive Osmotika-Anreicherung (osmotic adjustment) in den Sonnenblättern von Altbuchen an vier deutschen Standorten während sommerlicher Trockenperioden (vgl. auch ARANDA et al. 1996).

6. In trockenen Sommern zeigen Altbuchen eine deutliche Reduktion der lichtgesättigten Nettophotosyntheserate, die wahrscheinlich vor allem durch partiellen Stomaschluss bedingt wird. Im extrem trockenen Sommer 2003 wurde verbreiteter Stomaschluss und eine Redukti-

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

on der Photosynthese in Buchenwäldern beobachtet, wenn die verfügbaren Bodenwasservorräte auf weniger als 40 % reduziert waren (BRÉDA et al. 2006). Wenn 90 Prozent der Wasservorräte ausgeschöpft waren, muss mit einer Reduktion der Brutto-Photosyntheseleistung der Buchen um 40-60 Prozent gerechnet werden (GRANIER et al. 2007).

Indirekt könnte die Kohlenstoffassimilation und Produktivität von Buchen auch über trockenheitsinduzierten Stickstoffmangel verringert werden. GEßLER et al. (2004) maßen im Xylemsaft von Jung- wie auch Altbuchen an trockenen Standorten Südwestdeutschlands deutlich geringere Konzentrationen an gelöstem Nicht-Protein-Stickstoff. Allerdings zeigten Sonnenblätter von Altbuchen entlang des mitteldeutschen Niederschlagsgradienten keine Verringerung des Blatt-N-Gehaltes in Richtung auf trockenere Bestände, deuten also keine schlechtere N-Versorgung an den trockenen Standorten an (MEIER & LEUSCHNER 2008 c).

7. Dendrochronologische Studien zeigen, dass das Wasserangebot in den Sommermonaten ein entscheidender Faktor ist, der die Jahrringbreite von Buchen bestimmt (MITSCHERLICH 1975, BECKER et al. 1995). Das gilt vor allem für die Tieflagen und die Regionen mit subkontinental bis kontinental getöntem Klima in Mitteleuropa (z.B. ECKSTEIN et al. 1984, Z'GRAGGEN 1992, BONN 1998, DITTMAR & ELLING 1999, ELLING et al. 2007); in der montanen Stufe und in Küstennähe ist der Trockenheitseinfluss dagegen schwächer oder verschwindet (SCHOBER 1951, KRAUSE 1992). Oft wird die Trockenstressantwort erst nach zwei Jahren oder noch später sichtbar. Extreme Trockenperioden wie in 1976 und 2003 können zu starken Produktionseinbußen auf großer Fläche führen (CIAIS et al. 2005, BRÉDA et al. 2006), von denen sich die Buche nur nach mehreren Jahren oder gar Jahrzehnten erholt (POWER 1994). PETERKEN & MOUNTFORD (1996) beobachteten in England noch 15 Jahre nach der Trockenheit von 1976 eine erhöhte Mortalität von Altbuchen.

Starke Trockenheit kann auch im humiden Klima Mitteleuropas zum Tod von Altbuchen führen. Im Staatsforst Bovenden bei Göttingen wurden nach der starken Trockenheit 1959 mehr als 25.000 Festmeter vom Rindensterben betroffenen Buchenholzes gemessen (WAGENHOFF & WAGENHOFF 1975). Direkte Ursachen einer trockenheitsbedingten Mortalität können Defizite in der C-Bilanz der Bäume, Kavitation im Leitsystem oder verminderte Abwehr von sekundären Stressoren wie Pathogenen und Frost sein. Die Rotbuche zeigt in trockenen und warmen Sommern stärkere Zuwachseinbrücke als Eichen, Linden und Hainbuchen (BONN 1998, FRECH 2006); sie ist deshalb durch sommerliche Hitzewellen ohne Zweifel stärker gefährdet als diese Baumarten.

8. Es gibt Hinweise darauf, dass Buchenjungpflanzen empfindlicher auf Trockenheit reagieren als Altbäume. Erstere besitzen einen Schwellenwert der Emboliebildung im Zweigxylem von -1.9 MPa, letztere dagegen von -3.1 MPa (HACKE & SAUTER 1995, LEMOINE et al. 2002). Viele Buchenbestände an Standorten mit Niederschlägen unter 550 mm a^{-1} am Rande des mitteldeutschen Trockengebietes sind durch schwache oder fehlende Verjüngung gekennzeichnet, ein Hinweise darauf, dass das zarte Wurzelsystem der Verjüngung stärker unter der Austrocknung des Oberbodens leidet als das der Altbäume.

9. Diesen Indikatoren der Dürresensitivität steht die erhebliche Regenerationsfähigkeit der Buche entgegen, und zwar sowohl im Bereich des Zweig- und Stammholzwachstums als auch beim Wurzelwachstum (ROLOFF 1985, HERTEL 1999, LEUSCHNER et al. 2001 b, DITTMAR et al. 2003). Diese Eigenschaft erlaubt es der Buche, einzelne starke Trockenperioden zu überstehen, wenn keine physiologischen Toleranzgrenzen überschritten wurden.

10. Buchen können sich durch Ökotypenbildung mit veränderter Physiologie und Morphologie in begrenztem Maße an Standorte mit knappem Wasserangebot anpassen (PEUKE et al. 2002, MEIER & LEUSCHNER 2008 b, ROSE et al. 2009). Diese überwiegend genotypische Variabilität dürfte die Anpassungsfähigkeit der Art an künftigen Klimawandel erhöhen.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

5. Auswirkungen der erhöhten Stickstoffeinträge

In vielen Regionen Mitteleuropas werden gegenwärtig 20-30 kg N ha^{-1} a^{-1} über atmosphärische Deposition in die Waldökosysteme eingetragen, in manchen Gebieten noch deutlich mehr (Umweltbundesamt 2005, Übersicht in ELLENBERG & LEUSCHNER 2010). Aus diesem Grund sind in den vergangenen 40 Jahren die Stickstoffvorräte vor allem in der organischen Auflage der Waldböden deutlich angestiegen (z.B. MEIWES et al. 1999), ebenso die Stickstoffmineralisation und die Blatt-Nährstoffgehalte (z.B. CORRE et al. 2007, BÜTTNER 1997). Düngungsexperimente legen nahe, dass die bei der Buche und anderen mitteleuropäischen Baumarten in jüngster Zeit verzeichneten Zuwachsanstiege (z.B. PRETZSCH 1996, RÖHLE o.J., SPIECKER 1998) in erster Linie durch eine verbesserte Stickstoffversorgung bedingt wurden und weniger auf erhöhte Temperaturen, die CO_2-Anreicherung oder eine verlängerte Vegetationsperiode zurückgehen. Es ist nicht zu erwarten, dass diese Belastungssituation in absehbarer Zeit deutlich reduziert werden kann. Prognosen des Waldwachstums unter einem veränderten Klima müssen deshalb unbedingt diesen wichtigen Faktor mit einbeziehen, vor allem, weil die Antwort auf erhöhte Temperaturen und CO_2-Konzentrationen in vielen Fällen von der Stickstoffverfügbarkeit mitbestimmt wird. Unter den zahlreichen möglichen Effekten einer verbesserten N-Versorgung seien nur eine Vergrößerung der Blattfläche (LAI), erhöhte Wasserverluste, eine Reduktion der Feinwurzelmasse, Veränderungen in der Mykorrhizierung, eine reduzierte Frosthärte und erhöhte Photosyntheseleistungen genannt. Im Hinblick auf die wahrscheinlich steigende Trockenheitsbelastung der Buche sind der positive Effekt auf die Blattfläche und der negative auf das Feinwurzelsystem besonders bedeutsam, weil beide Wirkungspfade die Trockenstressempfindlichkeit verstärken würden.

6. Ausblick

Diese kurze Übersicht über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die mitteleuropäischen Baumarten mit besonderem Schwerpunkt auf der Buche kann keine erschöpfende Analyse des vorliegenden Wissens über mögliche Antworten der Bäume geben, sondern nur einzelne Themenkomplexe herausgreifen. Schwachpunkte in der bisherigen Forschung bestehen vor allem im Hinblick auf die mangelnde oder ungeklärte Extrapolierbarkeit von Experimenten an Jungbäumen im Gewächshaus oder Labor, auf Altbäume im Freiland und im Vorherrschen von Einzelfaktorstudien (z.B. über Temperatur- oder Feuchte-Effekte), die der Realität des Klima- und Globalen Wandels mit synchroner Änderung von zahlreichen Umweltfaktoren nur ungenügend gerecht werden. Künftige Modelle des Waldwachstums im 21. Jahrhundert müssen die gleichzeitige Wirkung einer Erhöhung von Temperatur, CO_2-Konzentration und Stickstoffangebot, die wachstumsfördernd wirken, und einer Zunahme der Trockenstressbelastung sowie von deren Interaktionen mechanistisch abbilden, um eine größere Realitätsnähe zu erreichen.

Trotz dieser Wissensdefizite lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass sommerliche Trockenperioden in Verbindung mit Hitzewellen die einflussreichsten Stressoren der Buche (und anderer mitteleuropäischer Baumarten) in heutiger Zeit sind und noch mehr in der Zukunft sein werden. Für die Trockenstressempfindlichkeit ist dabei die Nutzwasserkapazität der Böden von erheblicher Bedeutung. Tiefgründige Lehmböden bergen geringere Risiken als flachgründige Rendzinen oder (grobkörnige) Sandböden. Allerdings haben im Hitzesommer 2003 alle daraufhin untersuchten Buchenbestände weitgehend unabhängig von der Pedologie Produktivitätseinbußen erfahren (GRANIER et al. 2007).

Im Vergleich zu den meisten anderen mitteleuropäischen Laubbaumarten ist *Fagus* besonders trockenheitsempfindlich, weil sie eine relativ große Blattfläche ausbildet, relativ stark

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

kavitationsgefährdet ist und ihr Feinwurzelsystem sich offenbar an Trockenheit nur wenig anpassen kann. Hohe Zuwächse und relativ große Blattflächen in warm-trockenen Regionen können nicht als Indikatoren dafür gewertet werden, dass die Art an derartigen Standorten auch zukünftig noch trockenere Sommer tolerieren wird. Um Risiken zu minimieren, muss man der mitteleuropäischen Forstwirtschaft empfehlen, die Buche in Zukunft dort nicht mehr anzubauen, wo die Jahresniederschläge schon heute unter etwa 650 mm liegen; flachgründige Böden müssen auch bei höheren Niederschläge als besonders gefährdet gelten. Verstärkte Forschung zur Wirkung von Faktorkombinationen, weitergehende Studien an Altbäumen und Untersuchungen zu Provenienzunterschieden der Klimaantwort der mitteleuropäischen Waldbäume sind dringend erforderlich.

Zusammensassung

Diese kurze Übersicht fasst wichtige neuere Erkenntnisse zur Antwort der mitteleuropäischen Baumarten auf den bereits stattfindenden und den zu erwartenden Klimawandel zusammen. Betrachtet werden die Temperaturerhöhung, die Verlängerung der Vegetationsperiode, wärmere und schneeärmere Winter, erhöhte Trockenstressbelastung, verringerte Luftfeuchte und eine erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration. Weiterhin wird die Wirkung der hohen atmosphärischen Stickstoffdeposition diskutiert. Der Schwerpunkt des Literaturreviews liegt dabei auf der Rotbuche und der Antwort von Altbäumen.

Literatur

AINSWORTH, E.A. & ROGERS A. (2007): The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO_2]: mechanisms and environmental interactions. – Plant Cell Environ. **30**: 258-270.

AMMER, CH., ALBRECHT, L., BORCHERT, H. et al. (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa. – Allg. Forst- u. J.-Ztg. **176**: 60-67.

ARANDA, I., GIL, L. & PARDOS, J. (1996): Seasonal water relations of three broadleaved species *(Fagus sylvatica* L., *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. and *Quercus pyrenaica* Willd.) in a mixed stand in the centre of the Iberian Peninsula. – For. Ecol. Manage. **84**: 219-221.

ASSHOFF, R., ZOTZ, G. & KÖRNER, CH. (2006): Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevation CO_2. – Global Change Biol. **12**: 848-861.

BACKES, K. (1996). Der Wasserhaushalt vier verschiedener Baumarten der Heide-Wald-Sukzession. – Diss. Math.-Nat. Fak. Univ. Göttingen. 134 S.

BECKER, M., BERT, G.D., BOUCHON, J., DUPOUEY, J.L., PICARD, J.F. & ULRICH, E. (1995): Long term changes in forest productivity: the dendroecological approach. In: LANDMANN, G., BONNEAU, M. (eds.): Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains. Springer, Berlin. pp. 143-153.

BONN, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. – Forstwiss. Beitr. Tharandt **3**. 226 p.

BRÉDA, N., HUC, R., GRANIER, A. & DREYER, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. – Ann. For. Sci. **63**: 625-644.

BÜTTNER, G. (1997): Die Entwicklung der Ernährungssituation niedersächsischer Waldbäume. – Forst u. Holz **52**: 718-720.

CIAIS, PH., REICHSTEIN, M., VIOVY, N. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. – Nature **437**: 529-533.

CORRE, M.D., BRUMME, R., VELDKAMP, E. & BEESE, F. (2007): Changes in nitrogen cycling and retention processes in soils under spruce forests along a nitrogen enrichment gradient in Germany. – Global Change Biol. **13**: 1509-1527.

DAVI, H., DUFRENE, E., FRANCOIS, C. et al. (2006): Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. – Agric. For. Meteorol. **141**: 35-56.

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Deutscher Wetterdienst (2008): Mitteilung v. 22. Sept. 2008. Offenbach.

DITTMAR, C. & ELLING, W. (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. – Forstwiss. Cbl. **118**: 251-270.

DITTMAR, C., ZECH, W. & ELLING, W. (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. – For. Ecol. Manage. **173**: 63-78.

DREYER, E. (1997): Photosynthesis and drought in forest trees. In: RENNENBERG, H., ESCHRICH, W. & ZIEGLER, H. (eds.): Trees – Contributions to Modern Tree Physiology. Backhuys Publ., Leiden. S. 215-238.

ECKSTEIN, D., RICHTER, K., ANIOL, W. & QUIEHL, F. (1984): Dendroklimatologische Untersuchungen zum Buchensterben im südwestlichen Vogelsberg. – Forstwiss. Cbl. **103**: 274-290.

ELLENBERG, H. & LEUSCHNER, CH. (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 6. Aufl. – Ulmer, Stuttgart.

ELLING, W., HEBER, U., POLLE, A. & BEESE, F. (2007): Schädigung von Waldökosystemen. Spektrum, Heidelberg. 422 S.

ELSÄSSER, H. & BÜRKI, M. (2002): Climate change as a threat to turism in the Alps. – Clim. Res. **20**: 253-257.

FELBERMEIER, B. (1994): Die klimatische Belastbarkeit der Buche. – Forstwiss. Cbl. **113**: 152-174.

FINK; A, BRUCHER, T., KRUGER, A., LECKEBUSCH, G., PINTO, J. & ULBRICH, U. (2003): European summer heatwaves and drought – synoptic diagnosis and impacts. – Weather **59**: 2009-2016.

FENDER, A., MANTILLA-CONTRERAS, J. & LEUSCHNER, CH. (2010): Multiple environmental control of leaf area and its significance for productivity in beech saplings. Manuskript

FOKEN, T. (2004): Climate change in the Lehstenbach region. In: MATZNER, E. (ed.): Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment. Ecol. Stud. 172. Springer, Berlin. pp. 59-66.

FRECH, A. (2006): Walddynamik in Mischwäldern des Nationalparks Hainich. Untersuchung der Mechanismen und Prognose der Waldentwicklung. – Diss. Univ. Göttingen. 118 p.

GAUL, D., HERTEL, D. & LEUSCHNER, CH. (2008): Effects of experimental frost on the fine-root system of mature Norway spruce. – J. Plant Nutri. Soil Sci. **171**: 690-698.

GEßLER, A., KEITEL, C., NAHM, M. & RENNENBERG, H. (2004): Water shortage affects the water and nitrogen balance in Central European beech forests. - Plant Biol. **6**: 289-298.

GEßLER, A., KEITEL, C., KREUZWIESER, J., MATYSSEK, R., SEILER, W. & RENNENBERG, H. (2007): Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. – Trees **21**: 1-11.

GRANIER, A., REICHSTEIN, M., BRÉDA, N. et al. (2007): Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. – Agric. For. Meteorol. **143**: 123-145.

GRUBER, F. (2004): Ist der "Blattverlust" der Buche nur ein Witterungsphänomen? – AFZ/Der Wald **59**: 251-254.

HACKE, U.G. & SAUTER, J.J. (1995): Vulnerability of xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. – J. Exp. Bot. **46**: 1177-1183.

HAVRANEK, W.M. & MATYSSEK, R. (2005): The carbon balance of European larch (*Larix decidua*) at the alpine timberline. – Phyton **45**: 213-231.

HERTEL, D. (1999): Das Feinwurzelsystem von Rein- und Mischbeständen der Rotbuche: Struktur, Dynamik und interspezifische Konkurrenz. – Dissertationes Botanicae 317. Cramer, Berlin. 190 S.

IPCC (2007): Climate change 2007: the physical basis. Summary for policymakers. Contributions of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. https://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf.

JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P. & SIECK, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. – Umweltbundesamt, Dessau. Forsch.ber. 204 41 138.

KIRCHGÄßNER, A. (2001): Phänoklimatologie von Buchenwäldern im Südwesten der Schwäbischen Alb. – Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. **7**. 295 p.

KÖRNER, CH. & WOODWARD, F.I. (1987): The dynamics of leaf extension in plants with diverse altitudinal ranges. 2. Field studies in *Poa* species between 600 and 3200 m altitude. – Oecologia **72**: 279-283.

KRAUSE, C. (1992): Ganzbaumanalyse von Eiche, Buche, Kiefer und Fichte mit dendroökologischen

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

Methoden - unter besonderer Berücksichtigung von Klima-Wachstums-Beziehungen und Weiserjahren. – Diss. Univ. Hamburg. 163 S.

LEMOINE, D., COCHARD, H. & GRANIER, A. (2002): Within crown variation in hydraulic architecture in beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence for a stomatal control of xylem embolism. – Ann. For. Sci. **59**: 19-27.

LENDZION, J. & LEUSCHNER, CH. (2008): Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings is limited by elevated atmospheric vapor pressure deficits. – For. Ecol. Manage. **256**: 648-655.

LEUSCHNER, CH. (2008): Die Trockenheitsempfindlichkeit der Rotbuche vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels. – Jahrb. Akad. Wiss. Göttingen 2008: 281-296.

LEUSCHNER, CH., BACKES, K., HERTEL, D., SCHIPKA, F., SCHMITT, U., TERBORG, O. & RUNGE, M. (2001a):. 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. – For. Ecol. Manage. **149**: 33-46.

LEUSCHNER, CH., HERTEL, D., CONERS, H. & BÜTTNER, V. (2001b): Root competition between beech and oak: a hypothesis. – Oecologia **126**: 276-284.

LEUSCHNER, CH., VOSS, S., FOETZKI, A., & CLASES, Y. (2006): Variation in leaf area index and stand leaf mass of European beech (*Fagus sylvatica* L.) across gradients of soil acidity and precipitation. – Plant Ecol. **186**: 247-258.

LUYSSAERT, S., IMGLIMA, I., JUNG, M. et al. (2007): CO_2 balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. – Global Change Biol. **13**: 2509-2537.

MAYER, H., HOLST, T., BRUGGER, U. & KIRCHGÄßNER, A. (2005): Trends der forstlich relevanten Klimavariablen Lufttemperatur und Niederschlag im Südwesten Deutschlands von 1950 bis 2000. – Allg. Forst- u. J.-Ztg. **176**: 45-56.

MEEHL, G.A. & TEBALDI, C. (2004): More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. – Science **305**: 994-997.

MEIER, I.C. & LEUSCHNER, CH. (2008): Belowground drought response of European beech: fine root biomass and production in 14 mature stands across a precipitation gradient. – Global Change Biology 14: 2081-2095.

MEIER, I.C. & LEUSCHNER, CH. (2008): Genotypic variation and phenotypic plasticity in the drought response of the fine root system of European beech. – Tree Physiol. **28**: 297-309.

MEIER, I.C. & LEUSCHNER, CH. (2008): Leaf size and leaf area index in *Fagus sylvatica* forests: competing effects of precipitation, temperature and nitrogen availability. – Ecosystems **11**: 655-669.

MEIWES, K.J., MEESENBURG, H. & RADEMACHER, P. (1999): Wirkung von Stickstoff auf Waldökosysteme. – Mitt. Norddeut. Naturschutzakad. (NNA, Schneverdingen) **1/99**: 118-121.

MENZEL, A. (2003): Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. – Climatic Change **57**: 243-263.

MITSCHERLICH, G. (1975): Wald, Wachstum und Umwelt. 3. Band. Boden, Luft und Produktion. Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M. 352 p.

NORBY, R.J., DELUCIA, E.H., GIELEN, B. et al. (2005): Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad rang of productivity. – Proceed. Nat. Acad. Sciences USA **102**: 18052-18056.

PAL, J.S., GIORGI, F. & BI, X.Q. (2004): Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. – Geophys. Res. Lett. **31**: L13202.

PETERKEN, G.F. & MOUNTFORD, E.P. (1996): Effects of drought on beech in Lady Park Wood, an unmanaged mixed deciduous woodland. – Forestry **69**: 125-136.

PEUKE, A.D., SCHRAML, C., HARTUNG, W. & RENNENBERG, H. (2002): Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. – New Phytol. **154**: 373-387.

POWER, S.A. (1994): Temporal trends in twig growth of *Fagus slyvatica* L. and their relationships with environmental factors. – Forestry **67**: 13-30.

PRETZSCH, H. (1996): Growth trends of forests in Southern Germany. Berlin, Springer Verlag

RAPP, J. & SCHÖNWIESE, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. – Frankfurter Geowiss. Arb., Ser. B - Meteorol. u. Geophys., Band **5**. 2. Aufl. 253 S.

RENNENBERG, H., SEILER, W., MATYSSEK, R., GEßLER, A. & KREUZWIESER, J. (2004): Die Buche *(Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? – Allg. Forst- u. J.-Ztg. **175**: 210-224.

RÖHLE, H. (o.J.): Wachstumstrends in Fichten-, Buchen- und Eichenbeständen. www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/publications/OnlinePublications/417.pdf

©Reinhold-Tüxen-Gesellschaft (http://www.reinhold-tuexen-gesellschaft.de/)

ROLOFF, A. (1985): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicher neuartiger Veränderungen. – Diss. Forstwiss. Fak. Univ. Göttingen.

ROSE, L., LEUSCHNER, CH., KÖCKEMANN, B. & BUSCHMANN, H. (2009): Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? – Eur. J. For. Res. **128**: 335-343.

ROWELL, D.P. & JONES, R.G. (2006): Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. – Climate Dynamics **27**: 281-299.

SCHÄR, C., VIDALE, P.L., LÜTHI, D., FREI, C., HÄBERLI, C., LINIGER, M.A. & APPENZELLER, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. – Nature **427**: 332-336.

SCHIPKA, F. (2002): Blattwasserzustand und Wasserumsatz von vier Buchenwäldern entlang eines Niederschlagsgradienten in Mitteldeutschland. – Diss. Math.-Nat. Fak. Univ. Göttingen. 155 S.

SCHOBER, R. (1951): Zum Einfluss der letzten Dürrejahre auf den Dickenzuwachs. – Forstwiss. Cbl. **70**: 204-228.

SPEKAT, A., ENKE, W. & KREIENKAMP, F. (CEC), (2007): Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG (Kurztitel). UBA-FZK 204 41 138,UBA-Publikationsreihe. Umweltbundesamt, Dessau. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-I/3133.pdfSpekat et al. 2007

SPIECKER, H. (1998): Overview of recent growth trends in Europe. – Water, Air, Soil Pollut. **116**: 33-46.

Umweltbundesamt (ed.), (2005): Daten zur Umwelt. Umweltbundesamt (Dessau). E. Schmidt Verlag, Berlin.

WAGENHOFF, A. & WAGENHOFF, E. (1975): Verlauf und Auswirkungen des Buchenrindensterbens im Forstamt Bovenden in den Jahren von 1959 bis 1965. – Aus dem Walde **24**: 111-168.

WIESER, G., GIGELE, T. & PAUSCH, H. (2005): The carbon budget of an adult Pinus cembra tree at the alpine timberline in the Central Austrian Alps. – Eur. J. For. Res. **124**: 1-8.

Z'GRAGGEN, S. (1992): Dendrohistometrisch-klimatologische Untersuchung an Buchen (Fagus syvlatica L.). – Diss. Univ. Basel. 167 p.

ZISKA, L.H. & BUNCE, J.A. (2006): Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: MORISON, J.I.L. & MORECROFT, M.D. (eds.) Plant Growth and Climate Change. Blackwell, Oxford. S. 17-47.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Christoph Leuschner, Pflanzenökologie und Ökosystemforschung, Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften, Untere Karspüle 2, D-37073 Göttingen

e-mail: cleusch@gwdg.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft

Jahr/Year: 2010

Band/Volume: 22

Autor(en)/Author(s): Leuschner Christoph

Artikel/Article: Mitteleuropäische Wälder und der prognostizierte Klimawandel – Fakten und Thesen zur Situation der Buche 96-106