

Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003

Assessment of the drought resistance of beech
exemplified by the 2003 extreme weather conditions

*Johannes Eichborn, Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Mascha Albrecht,
Wolfgang Beck und Uwe Paar*

Zusammenfassung

Jahre mit extremer Witterung können Risiken für die Buche bedeuten. Am Beispiel des in der Reihe der letzten Jahre ganz besonders warmen und niederschlagsarmen Jahres 2003 wird das Reaktionsmuster der Buche auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Nordwestdeutschland untersucht.

Der Biomassezuwachs für Derbholz und Äste wird im Jahr 2004 um ca. 50 % reduziert, die Entwicklung der Höhentriebe bleibt mehrere Jahre eingeschränkt. Mit der Reduktion der Höhen- und der Durchmesserleistung geht eine forstbetrieblich relevante Verringerung des Holzertrages einher. Bei aufeinanderfolgenden extrem warm-trockenen Jahren kann die Produktion von Buchenholz als nachwachsender Rohstoff mit allen ökologischen und ökonomischen Konsequenzen weitere Einschränkungen erfahren.

In Bezug auf die Nettoprimärproduktion wird die Minderleistung im Stammholz durch eine 2004 sehr umfangreiche Mast ausgeglichen. Die Biomasse in Blättern reagiert nur unwesentlich, so dass insgesamt die oberirdische Nettoprimärproduktion 2004 nur um etwa 3 % verringert ist; Wurzelsysteme sind nicht berücksichtigt. Ausgelöst durch die Witterungsbedingungen des Jahres 2003 ändert sich damit im Nachfolgejahr die Baumstrategie von Holzproduktion, Raumeroberung und baumindividueller Stabilität hin zur Fruchtbildung, natürlicher Regeneration und Arterhaltung. Die aktive Anpassung der Kohlenstoff-Allokation an veränderte Umweltbedingungen ist ein wesentliches Indiz für eine hohe Stresstoleranz der Buche. Die Buche weist im Vergleich der Hauptbaumarten gegenwärtig die niedrigste Absterberate auf. Es ergeben sich gegenwärtig keine Hinweise auf eine schwerwiegende Einschränkung der Vitalität der Buche. Inwieweit eine unmittelbare Abfolge mehrerer Extremjahre wie 2003 zu Grenzen der Anpassungsfähigkeit der Buche führen wird, bleibt offen.

Stichworte: Resilienz, Vitalität, Wachstum, Mortalität, Fruktifikation, Kohlenstoff-Allokation

Abstract

The occurrence of extreme weather conditions may create risks for beech. Following 2003, which stands out from other years as being a particularly hot year with low precipitation, the response patterns of beech were investigated at forest monitoring plots in northwest Germany.

In 2004, the growth of beech merchantable wood and branch biomass declined by 50 %. After 2003, the development of apical shoots was restricted for a number of years. The decrease in height and diameter growth may lead to a reduction in timber yield. In the event of a series of successive extreme hot dry years, the production of the renewable beech wood resource may decrease even further with severe ecological and economic consequences.

Overall the net primary production was balanced as an extensive mast in 2004 compensated for the reduced height and diameter growth. The difference in leaf biomass was minimal, resulting in an overall decrease in the aboveground net primary production in 2004 of only about 3 %; root systems were not considered. As a consequence of the 2003 extreme weather conditions, the beech growth strategy changed in the following year from one of wood production, spatial acquisition and individual tree stability to one of pronounced fruit development, natural regeneration and species maintenance. The high ability of beech to adapt its allocation of carbon in response to changes in environmental conditions is an important indicator of its high stress tolerance. Currently, beech has the lowest mortality rate of the main tree species. To date, the criteria investigated show no evidence of a serious reduction in beech vitality. The extent to which the occurrence of extreme

weather conditions such as in 2003 in successive subsequent years would affect the adaptability of beech is still uncertain.

Keywords: resilience, vitality, growth, mortality, fructification, C-allocation

1 Einleitung

1.1 Klimawandel durch CO₂-Freisetzung aus fossilen Energieträgern

Die vom IPCC (2007) vorgelegten Indizien einer globalen Erwärmung begründen eine gesellschaftliche Diskussion des Klimawandels auf wissenschaftlicher Grundlage.

Die Kohlendioxid-(CO₂)-Freisetzung aus fossilen Energieträgern ist nach IPCC die Ursache des Klimawandels. Nach HORN et al. (2007) und ZIESING (2007, 2008) steigen die CO₂-bezogenen Emissionen global seit 1990 bis heute exponentiell an (1990: 21,6; 2000: 24,0; 2006: 29,0 Mio. t CO₂ je Jahr). Die Jahre 2005 und 2007 hatten global sogar die höchsten CO₂-Steigerungsraten seit Beginn der Aufzeichnungen (NOAA 2008). Neben CO₂ sind auch andere klimarelevante Gase zu beachten. Trotz aller Anstrengungen nach dem Kyoto-Protokoll, treibhauswirksame Methan-(CH₄)-Emissionen zu reduzieren, ist in den Jahren 2007 und 2008 nach einer Phase der Stabilisierung sogar eine Trendwende hin zu steigenden CH₄-Konzentrationen festzustellen.

Das von der EU im Jahr 2008 vorgelegte Klimapaket 2020 stellt die Grundlage für eine neue Energiepolitik in der EU dar. Bis 2020 soll der CO₂-Ausstoß um 20 % verringert werden, der Anteil an erneuerbarer Energie auf 20 % ansteigen und 20 % Energie eingespart werden. Allerdings lässt eine um jährlich etwa 80 Millionen Menschen steigende Weltbevölkerung sowie die wirtschaftliche Entwicklung - nicht nur in den Schwellenländern China und Indien – global einen weiterhin steigenden Energiebedarf erwarten.

Die von der EU eingeleitete Politik soll dazu beitragen, dass Temperaturänderungen von global 2 °C im Jahresdurchschnitt nicht überschritten werden. Diese Differenz bedeutet allerdings bereits - auch in Verbindung mit damit einhergehenden Extremereignissen - eine für die Ökologie der Wälder grundlegende Veränderung ihrer Lebensbedingungen (EICHHORN u. PAAR 2008, SPELLMANN et al. 2007).

1.2 Ausgangssituation für Buchenwälder

Mit der Nutzung fossiler Energie entstand schon vor der Wahrnehmung des Klimawandels eine Vielzahl wesentlicher Veränderungen für die Ökologie der Buchenwälder. Schwefelverbindungen begründeten eine gerichtete Veränderung

des Säurehaushaltes (ULRICH et al. 1979). Der Säureeintrag (potenzielle Säuredeposition nach GAUGER et al. 2002) in Buchenwälder lag etwa im Solling im Mittel der 1970er Jahre bei etwa $6,0 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und nahm auf ca. $2,5 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Mittel der 1990er Jahre ab. Ein abnehmender Trend der Säureeinträge konnte von MEESENBURG et al. (1995) auch auf anderen intensiven Versuchsflächen in Niedersachsen gefunden werden. Der Eintrag von Stickstoffverbindungen (MEESENBURG et al. 2002) konnte insbesondere auf manchen ehemals streugennutzten Standorten die grundlegende Stickstoffunterversorgung ausgleichen, führte andererseits bei Stickstoffüberschüssen zu belastenden Bedingungen für Buchenwälder (EICHHORN 1995), teilweise mit Nitratanreicherungen in die Hydrosphäre und N-Abgabe in Form von treibhausrelevanten Spurengasen in die Atmosphäre (BRUMME 1999). Mit Blick auf die Waldgeschichte ab Ende des Mittelalters mit Bedarfsdeckung im Wald wie Köhlerei, Waldweide und vor allem Streunutzung wird deutlich, dass die durch die Umwelt beeinflussten Wachstumsfaktoren für Buchenwälder stets variabel und in vielfältiger Weise durch menschliche Einflüsse geprägt waren.

Was bedeutet aber eine derartige Variabilität der standörtlichen Bedingungen für die Buche? Die Buche findet zunächst auf einer großen Zahl mitteleuropäischer Wuchsorte gut geeignete Bedingungen. Die Standortsamplitude von Buchenwäldern reicht von sehr sauren Böden bis zu reinen Kalkstandorten. Die Buche gedeiht sowohl in Regionen mit einer mittleren Jahresniederschlagssumme von weniger als 550 mm als auch von über 2000 mm (LEUSCHNER et al. 2006), allerdings nimmt unter 650 mm das Trockenstressrisiko zu (MANTHEY et al. 2007). Im nördlichen Teil Deutschlands kommt die Buche bis an die Küste vor, im Südharz bis in Höhen von 800 m ü. NN, in den Nordalpen bis zu 1700 m ü. NN (OTTO 1994). In Europa wird das Verbreitungsgebiet der Buche im Osten vor allem durch kontinental kalte Winter begrenzt, im Süden durch Sommerdürre und im Norden durch zu lange Winter und Spätfrost (SCHULZE et al. 2002). Dabei erhalten die Buchenwälder in Mittel- und Ostpolen etwas mehr Niederschlag als die im Nordostdeutschen Tiefland. Nach ELLENBERG (1996) ist die Buche die einzige Baumart, die alle übrigen aus ihrem physiologischem Optimalbereich ganz oder fast ganz verdrängen kann. Die hohe interspezifische Konkurrenzkraft beruht zum einen auf der Fähigkeit der Buche, Schatten zu tolerieren und Schatten zu erzeugen und zum anderen auf ihrem flexiblen Höhenwachstum. Zusätzlich ist die Buche in der Lage, mit ihrem Wurzelwerk den Bodenraum erfolgreicher zu erschließen als beispielsweise die Konkurrenzbaumart Traubeneiche (LEUSCHNER 1998). LEUSCHNER (2006) bewertet die Buche aufgrund ihrer ökologischen Potenz in Zentraleuropa als besonders erfolgreiche Pflanzenart. In der Mehrzahl der Fälle stellen unsere heutigen Buchenwälder autochthone Restpopulationen dar, die in der jeweiligen Region über viele Generationen standortsangepasst sind. Unter den gegenwärtigen ökologischen Rahmenbedingungen lässt sich danach auf eine große Anpassungsfähigkeit der Buche schließen.

Tatsächlich ist das Vorkommen der Buche in der jüngeren Vergangenheit wesentlich durch waldbauliche Ziele geprägt. Die Ergebnisse der Bundeswaldinventur (BMVEL 2004) belegen eine Zunahme der Buchenfläche in den alten Ländern um 2 % im Zeitraum von 15 Jahren. Heute nehmen Buchenwälder einen Anteil von rd. 15 % der Waldfläche in Deutschland ein. Besonders hoch ist der Anteil in Hessen (30 %), in Niedersachsen sind 14 % und in Sachsen-Anhalt – begründet in menschlichen Aktivitäten sowie regional ausgeprägter Sommer-trockenheit - nur 6 % der Waldfläche mit Buche bestockt.

Wie kann nun beurteilt werden, ob witterungsextreme Jahre ein Risiko für die Stabilität der Buche und ihre Bewirtschaftung darstellen? Welche Indikatoren sind zu erfassen? Hat sich nach dem witterungsextremen Jahr 2003 die Allokation des assimilierten Kohlenstoffs der Buche charakteristisch verändert? Sind nach 2003 Einschränkungen der Buchenvitalität nachweisbar? Wie schnell klingen die Reaktionen der Buche auf 2003 wieder ab und erreichen normale Werte? Wie anpassungsfähig ist die Buche bei Witterungsextremen?

1.3 Der außerordentlich trocken-heiße Sommer 2003 - Beispiel für Wirkungen eines witterungsextremen Jahres auf Buchenwälder

In der Reihe der letzten Jahre war 2003 ganz besonders warm und niederschlagsarm. Die Durchschnittstemperatur lag mehr als 3 °C über dem langjährigen Mittel und war damit die höchste seit 1949.

Zwischen Oktober 2002 bis Januar 2003 sowie im Mai 2003 fielen überdurchschnittliche Niederschläge; allein im Oktober 2002 70 % mehr als im langjährigen Mittel. Nachdem die Bodenspeicher in der Nichtvegetationszeit 2002/2003 gut mit Wasser gefüllt waren, fielen in den Monaten Februar bis April sehr geringe Niederschläge. Ende Juni waren die Bodenwasservorräte bereits weitgehend aufgebraucht. Daher kommt dem Ausbleiben der Niederschläge von Juni bis August 2003 eine besondere Bedeutung zu. Sichtbare Auswirkungen an den Bäumen zeigten sich ab Mitte August auf flachgründigen, wechselfeuchten, und wechsel-trockenen sowie auf sonnenexponierten Standorten. Hier war an einigen Orten ein frühzeitiger Laubfall mit in der Regel noch grünen Blättern zu beobachten. Die Vegetationsperiode 2003 erwies sich im großräumig bewaldeten forsthydrologischen Forschungsgebiet Elsterbach (Nordhessen) als Phase mit der geringsten Abflusshöhe seit Messbeginn Ende der 1960er Jahre. Erstmals wurde in der Vegetationszeit des Jahres 2003 weniger als die Hälfte des langjährigen Abfluss-Mittelwerts erreicht.

2 Resilienzeigenschaften als Bewertungskriterium für die Vitalität der Buche

Störungen sind den Waldökosystemen zugehörige Erscheinungen, ihr Eintreten ist für die Walddynamik von ausschlaggebender Bedeutung (OTTO 1994). Ohne Anpassung ist für Bäume aufgrund ihrer Ortsgebundenheit kein Überleben möglich. Optimierung und zugleich Anpassung sind daher bei Bäumen besonders wichtig (ROLOFF 2005). Waldökosysteme besitzen als komplexes biologisches System die Fähigkeit, auf Veränderungen und Störungen widerstandsfähig oder resilient zu antworten. Als Resilienz wird die Fähigkeit definiert, auf unterschiedliche Bedingungen bzw. Störungen zu reagieren, diese aber elastisch zu tolerieren, ohne dass sich langfristig ein anderer Ökosystemzustand einstellt (WALKER 1995, WALKER et al. 1999, CROPP et al. 2002). Bei Bäumen sind dabei art- und standortsspezifische Unterschiede zu erwarten.

2.1 Vitalitätsdreieck „Langlebigkeit - Funktion - Stresstoleranz“

Bezogen auf die Gesundheit von Bäumen und Wäldern definierte SCHWERDT-FEGER (1970), dass „*unter Krankheit gemeinbin eine Abweichung vom normalen Verlauf der Lebensvorgänge im Organismus verstanden wird, die ihn oder Teile von ihm in Gedeihen oder Dasein bedrohen. Nicht jede Abweichung vom Normalen braucht Gedeihen oder Dasein des Lebewesens zu gefährden. Im Einzelfall kann es schwer sein, eine Grenze zwischen krank und gesund zu ziehen.*“ Im paneuropäischen ICP Forests Manual zur visuellen Ansprache des Zustandes von Baumkronen (EICHHORN ET AL. 2006) definiert ROSKAMS (2006) Schaden als Abweichung eines Kompartiments eines Baumes mit einem nachteiligen Effekt für die vom Baum zu erfüllenden biologischen Funktionen.

GEHRIG (2004) setzt an den Eigenschaften des Systems Baum an und definiert in seinem Vitalitätsdreieck "Vitalität als Zustand im Spannungsdreieck: Langlebigkeit - Funktion - Stresstoleranz". Ein Organismus ist nach GEHRIG vital, wenn er unter den herrschenden Umweltbedingungen die zur Verfügung stehende Energie in diesem Dreieck optimal einsetzt. Das Vitalitätsdreieck bietet Ansätze zu einer praktisch durchführbaren, quantifizierenden Erfassung von Resilienzeigenschaften an Bäumen und Wäldern.

Die Absterberate in bewirtschafteten Wäldern wird als Hinweis verwendet, inwieweit Einschränkungen des natürlichen Alters *langlebiger* Baumarten zu erwarten sind. Anhand der Erfassung der annualen Mortalität von Probestämmen einer systematischen Stichprobe aller Altersstufen wird die *Langlebigkeit* zu einer zahlenmäßigen Größe.

Grundlegende *biologische Funktionen des Baumlebens* sind Wachstum und Fruchtbildung bzw. Vermehrung; Beide Schlüsselprozesse sind Ausdruck der Kohlenstoffallokation der Bäume bzw. stehen auch für wichtige Formen der Kohlenstoffspeicherung im globalen C-Haushalt.

Gegenüber den äußeren Faktoren ist als *Stresstoleranz* die Fähigkeit zu verstehen, abiotische und biotische Einflüsse zu ertragen und sich an diese anzupassen. Wie ist etwa die Stärke der Reaktion der Pflanzen auf Phasen hoher Temperatur oder Trockenheit (auch Extremereignisse), wie schnell erfolgt die Erholung nach einer solchen Reaktion? Ergeben sich in Abhängigkeit von der Stärke der Einflussgröße reversible bzw. nicht reversible Reaktionen? Ein klassisches Beispiel für pflanzengruppenbezogene Stresstoleranz mit Wirkung auf die Evolution der Bäume im Übergang von Gymnospermen zu Angiospermen ist die Empfindlichkeit gegenüber der Phase der Frosttrocknis ausgangs des Winters: Die sich erwärmende bodennahe Luft übt einen Transpirationsanreiz aus, während der Boden noch gefroren ist - eine Situation, an die laubabwerfende Bäume besser angepasst sind als die immergrünen.

3 Konzept zur Erfassung der Resilienz von Bäumen und Wäldern

Ziel eines Konzepts zur Erfassung der Resilienz ist es, Reaktionen von Bäumen und Beständen in ihrem Zeitbezug zu erfassen und diese im Hinblick auf ökologische und ökonomische Risiken zu bewerten. Den hier vorgeschlagenen Indikatoren ist gemein, dass die Methoden definiert sind (z. B. Manual ICP Forests, EICHHORN et al. 2006), ihre Anwendung qualitätsgesichert erfolgt, nur wissenschaftlich geprüfte Merkmale vorgeschlagen werden und die Zeitachse der jahresbezogenen Ergebnisse auch in die Vergangenheit reicht. Einige der für eine Bewertung der Resilienzeigenschaften von Wäldern wesentlichen Merkmale sind bislang für die Dauerbeobachtung der Wälder nicht als verpflichtend eingestuft. Eine Weiterentwicklung der europaweiten forstlichen Dauerbeobachtung ist deshalb erforderlich (DOBBERTIN u. DE VRIES 2008, EICHHORN u. SZEPESI 2008).

Nachfolgend werden die Reaktionsmuster der Buche anhand konkreter Indikatoren zahlenmäßig ermittelt. Dabei findet für „Langlebigkeit“ die annuelle Mortalität von Probestämmen Verwendung. Für die biologische Funktion der Buche werden insbesondere die Indikatoren Durchmesser- und Höhenzuwachs, Fruktifikation, Belaubung der Oberkrone sowie Blattbiomasse herangezogen. Aus der zeitlichen Entwicklung der Messwerte erfolgen Rückschlüsse auf die Stresstoleranz der Buche.

3.1 Langlebigkeit

Im Rahmen der systematischen Stichproben der Waldzustandserhebung wird jährlich der Ausfall von Probestämmen registriert und dessen Ursache ermittelt. Auf diese Weise können Baumentnahmen im Rahmen von Durchforstungen oder Endnutzungen vom echten Absterben unterschieden werden. Die Stichprobenpunkte unterliegen der normalen Waldbewirtschaftung. Ausgefallene Bäume

werden jeweils nach objektiven Prinzipien ersetzt, die Zahl der Bäume in der Stichprobe bleibt grundsätzlich konstant (Stichprobe Buche 2007 in Hessen: 1397 Bäume, in Niedersachsen: 2315 und in Sachsen-Anhalt: 492). Das Stichprobenkonzept ermöglicht etwa für Bundesländer flächenbezogene Aussagen, erfasst jedoch unzureichend lokale Absterbeprozesse durch regional begrenzte biotische bzw. standörtliche Faktoren (vgl. BRESSEM in diesem Band). Messgröße ist die annuelle Mortalität in Prozent des Stichprobenkollektives.

Ein Vergleich aller Baumarten und Altersstufen im systematischen Stichprobennetz des ICP Forests-Systems Level I (16 km x 16 km) der Jahre 1987 - 2004 ergibt für Spanien eine annuelle Mortalität von 0,24 %, für Frankreich 0,20 %, für Deutschland 0,25 % und für die Tschechische Republik 0,61 %. Im Vergleich dazu bleibt die annuelle Mortalität in Finnland mit 0,17 % relativ gering. Insgesamt ergibt sich zwischen 1987 und 2004 eine geringe Mortalität. Im stärker von Säurebelastungen betroffenen kontinentalen Europa sind die Werte etwas erhöht. Auf europäischer Ebene liegt die Mortalitätsrate der Buche niedriger als die von Fichte, Kiefer und Eiche (UN/ECE u. EC 2000).

Die Zeitreihen zeigen für Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt durchschnittliche Absterberaten zwischen 0,1 % in Niedersachsen und 0,3 % in Hessen sowie Sachsen-Anhalt, die Ergebnisse entsprechen also etwa dem europäischen Niveau.

Zwischen den Hauptbaumarten bestehen Unterschiede. Deutlich ist in allen drei Ländern die besondere Überlebensfähigkeit der Buche erkennbar, der Hauptbaumart mit der niedrigsten jährlichen Absterberate. Zwischen 1984 und 2007 sind stets nur einzelne Bäume betroffen, so dass die durchschnittliche Absterberate für die Buche (Alter über 60 Jahre) im Mittel unter 0,05 % liegt. Nach den Sturmwürfen Anfang der 1990er Jahre wie auch nach dem außerordentlichen Sommer 2003 sind in Hessen wie auch in Sachsen-Anhalt und Niedersachsen vereinzelt Mortalitätsraten der Buche von immer noch sehr geringen 0,3 % festzustellen. Auch auf intensiv betreuten Versuchsflächen bestätigt sich die geringe Mortalität der Buche (DAMMANN et al. 2000).

Eine Analyse der geringen Buchenmortalität auf dem 4 km x 4 km Netz der Waldzustandserhebung Hessen zeigt, dass die geringe Buchenmortalität in allen Landesteilen ein vergleichsweise homogener Befund ist.

Im Vergleich dazu reichen bei der Fichte die Mortalitätsraten bis zu 3,3 % (s. Abb. 1), ein Unterschied um den Faktor 10 gegenüber der Buche. Phasen mit erhöhten Absterberaten sind für diese Baumart insbesondere in den Jahren nach Sturmwürfen, Borkenkäferbefall sowie im Anschluss an besonders trocken/heiße Jahre wie 2003 zu verzeichnen. Maximale Werte wurden dabei in der Periode 2004/2005 erreicht, also eineinhalb Jahre nach dem außerordentlichen Sommer. Ähnliche Befunde liegen für Frankreich vor. Nach 2003 trat in Frankreich das bisherige Maximum der Mortalität der Zeitreihe 1989 bis 2004 auf. Laubbaumarten

erreichten 0,5 %, Nadelbaumarten 1,3 % Mortalität. Der Kurvenverlauf kann auch durch Maßnahmen zur Steuerung der Borkenkäferpopulation bestimmt sein.

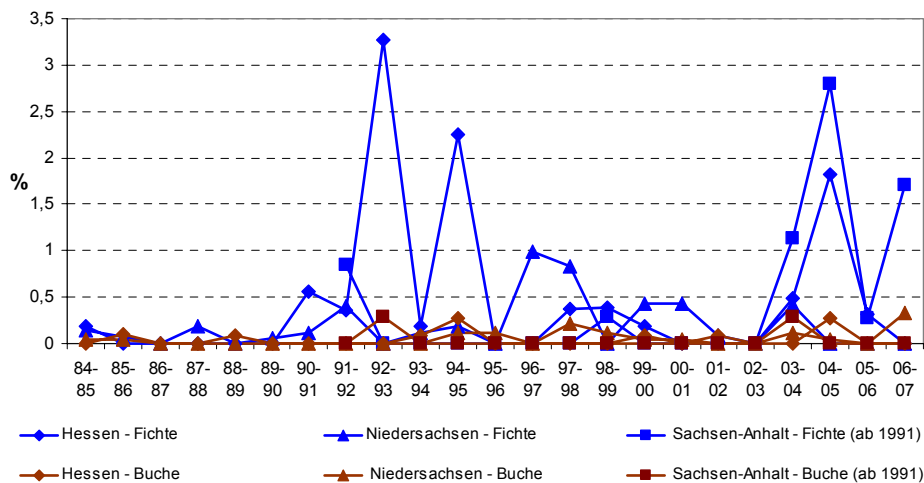


Abbildung 1: Jährliche Absterberate (%) von Fichte und Buche (Alter über 60 Jahre) in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (Waldzustandserhebung 1984 - 2007, in Sachsen-Anhalt ab 1991)

3.2 Wachstum und Fruktifikation

Im Sinne von GIVNISH (1988) sind Produkte der Kohlenstoffassimilation und deren Zuordnung zu verschiedenen Baumkompartimenten (C-Allokation) Ausdruck der biologischen Funktionalität des Baumlebens. Werden die Indikatoren der C-Allokation wie beispielsweise das Baumwachstum oder die Fruktifikation in jährlichen Zeitintervallen erfasst, ermöglicht dies eine zeitabhängige, quantitative Bewertung der Reaktion von Bäumen auf äußere Faktoren, also der Toleranz von Bäumen gegenüber Stressoren. Nachfolgend werden daher die Reaktionen des Baumwachstums und der Fruktifikation auch im Zusammenhang mit der Fragestellung Stresstoleranz diskutiert.

Zum Zuwachs an Biomasse von Bäumen zählen insbesondere die Kompartimente Blätter, Früchte mit den zugehörigen Knospen und Fruchtschalen, Äste und Derbholz sowie Wurzeln. Im Rahmen von Untersuchungen auf Dauerbeobachtungsflächen liegen für die Buche längere Zeitreihen vor, insbesondere zum Höhen- und Durchmesserwachstum, zur Belaubung und Fruchtbildung. Die hessischen intensiven Beobachtungsflächen weisen optimale Wuchsbedingungen für die Buche auf [Hünfeld: 625 mm Jahresniederschlag, Braunerde-Pseudogley, Buntsandstein; Kirchhain: 650 mm Jahresniederschlag, Parabraunerde-Pseudogley, Basalt mit Lößlehm; Kellerwald: 650 mm, Braunerde, Tonschiefer u. Grauwacke in Wechsellagerung; Homberg/Efze: 700 mm Jahresniederschlag, Parabraunerde-

Pseudogley, Basalt; Zierenberg: 700 mm Jahresniederschlag, Braunerde, Basalt; Kalbach: 825 mm Jahresniederschlag, Braunerde, Buntsandsteinsubstrat; Spessart: 963 mm Jahresniederschlag, podsolierte Braunerde, Buntsandstein; Weilburg: 950 mm Jahresniederschlag, Lockerbraunerde, Schieferton].

3.2.1 Durchmesserzuwachs

Der Durchmesserzuwachs (in 1,30 m Höhe) wurde auf den im Mittel 140 Jahre alten Buchenflächen der intensiven Dauerbeobachtung exemplarisch in Hessen (Hünfeld, Kirchhain, Kellerwald, Homberg/Efze, Zierenberg, Spessart und Weilburg) anhand von je 2 Kernbohrungen von 20 herrschenden Buchen je Fläche erfasst (s. Abb. 2). Kernbohrungen ermöglichen einen Vergleich von aktuellen mit retrospektiven Befunden.

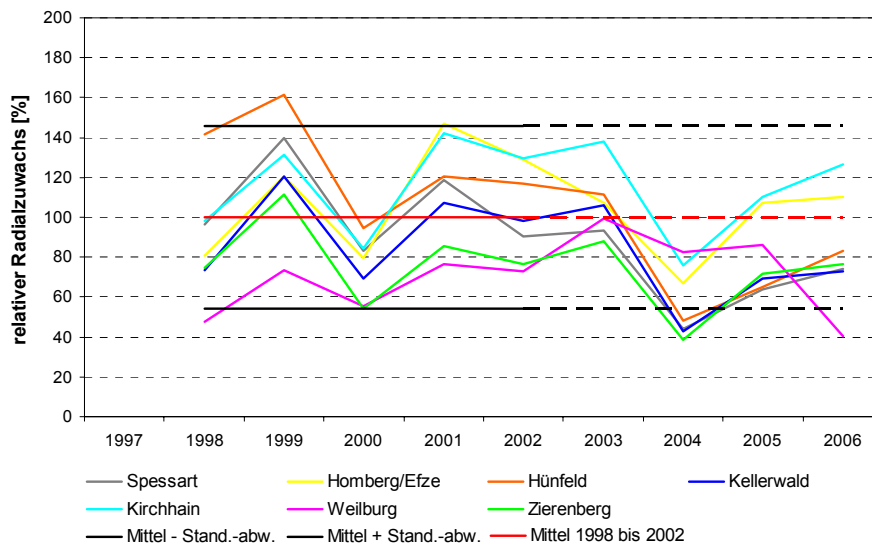


Abbildung 2: Entwicklung des mittleren relativen Radialzuwachses von Buche auf sieben Flächen der intensiven Dauerbeobachtung (Level II) in Hessen. Vergleich der Jahreswerte ab 2003 mit dem Zeitraum 1998 - 2002.

Auf den Buchenflächen beträgt 2003 der Radialzuwachs 107 % des Mittels 1998 - 2002. Bereits vor dem Eintritt der anhaltenden Trockenheit und Hitze war in diesem Jahr der größte Teil der Jahrringbreite ausgebildet. In der Vegetationszeit 2004, also ein Jahr nach dem „Jahrhundertssommer“ 2003, zeigt sich ein signifikanter Einbruch des Radialzuwachses auf 57 % des Mittels von 1998 - 2002. Der Radialzuwachs der Buchen erholt sich im darauf folgenden Jahr 2005 wie auch 2006 auf 84 % des Mittels. Trotz Erholung wird das Ausgangsniveau nicht ganz erreicht.

3.2.2 Höhenzuwachs

Ende Juli/Anfang August 2007 wurden auf den Buchenflächen des intensiven Monitorings in Hessen auf jeder Fläche von sechs vorherrschenden und herrschenden Bäumen je zwei Triebe aus der Lichtkrone gewonnen und anschließend die einzelnen Triebblängen der Jahre 1997 - 2007 am Haupttrieb vermessen. Anhand der Triebbasisnarben war eine retrospektive Bewertung der Triebblängen möglich.

Analog zum Radialzuwachs in 1,30 m Höhe tritt erst in der Vegetationszeit nach dem besonders warmen-trockenen Jahr auf allen Flächen eine massive Wachstumsreduktion auf (s. Abb. 3). Die Höhentriebe erreichen 2004 nur 70 % der Länge der Vorjahre. Nach einem gemischten Modell mit den Probestämmen und Flächen als zufällige Faktoren ist der Rückgang der Triebblängen 2003/2004 von 34 mm höchst signifikant ($p = 0,0004$). Im Gegensatz zur Durchmesserentwicklung setzt sich diese Depression länger fort (2005: 55 %). Nach günstigen Höhentrieben im Jahr 2006 tritt 2007 erneut ein sehr kurzer Trieb auf. Die Nachwirkungen nach dem Jahr 2003 sind bis 2007 zu erkennen. Im Mittel erreichen die Höhentriebe in diesen vier Jahren nur 66 % des Mittels der Jahre 1998 bis 2002, ein Hinweis auf eine längerfristige Wirkung des Jahres 2003 für die Entwicklung der Höhentriebe. Nach ROLOFF (2001) führen Trockenphasen zu einer Bildung von Kurztrieben, die sich bei Buchen jüngeren und mittleren Alters im nachfolgenden Jahr wieder normalisieren sollte. Eine Abfolge einer Reihe von Kurztrieben, sog. Kurztriebketten, wird als Vitalitätseinschränkung definiert. 2003 hat großräumig einen Impuls zur Bildung von Kurztriebketten ausgelöst

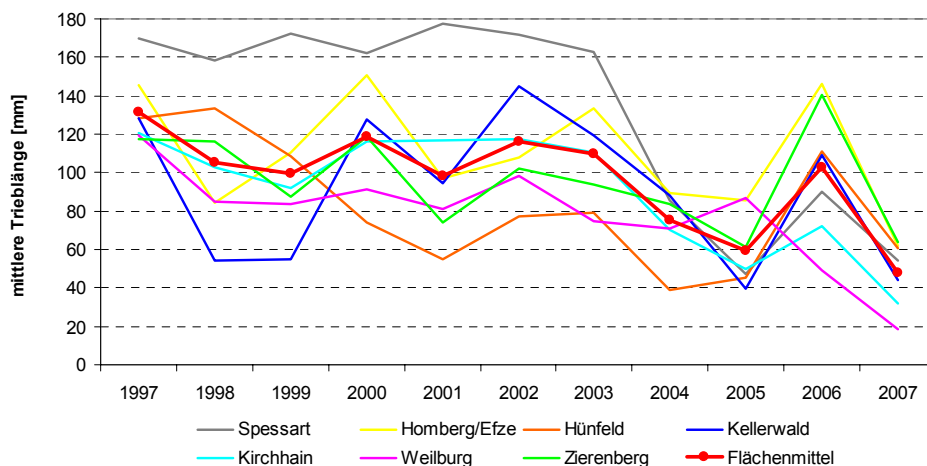


Abbildung 3: Entwicklung apikaler Triebblängen von Buche auf sieben Flächen der intensiven Dauerbeobachtung (Level II) in Hessen 1997 – 2007

Nach dem gleichen Verfahren wie auf den Flächen des intensiven Monitorings wurden die Trieb­längen von Bäumen der Stichproben-Flächen der extensiven Dauerbeobachtung in Hessen ermittelt (s. Abb. 4). Von drei vorherrschenden oder herrschenden Bäumen pro Fläche wurden je zwei Triebe aus der Lichtkrone erworben. Die Stichprobe umfasst 240 Buchen von 80 Flächen. Als Teilstichprobe des systematischen 8 km x 8 km Netzes ermöglicht diese Auswertung eine flächen-repräsentative Aussage für die Buche in Hessen.

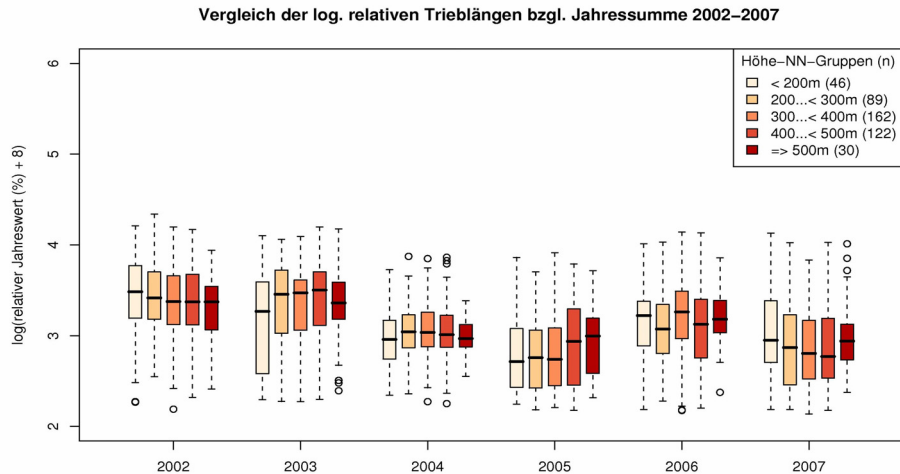


Abbildung 4: Entwicklung der Trieb­längen der obersten Kronenspitze von Buche auf 80 Flächen der extensiven Dauerbeobachtung (8 km x 8 km; Level I) in Hessen 2002 - 2007 nach Höhenstufen. Absolute Trieb­längen in Relation zum Mittel der Jahre 2002 - 2007 im Hinblick auf Normalverteilung logarithmiert; Box and Whisker-Plots mit Median-darstellung.

Zunächst bestätigt die Auswertung der systematischen Stichprobe den Befund der Intensivmessflächen. Die Buchen in Hessen zeigen im Jahr 2003 keine Reduktion der Höhentriebentwicklung. Der Höhentrieb war schon relativ zeitig abgeschlossen, also noch vor dem Eintritt der Trockenheitsphase (vgl. auch MITSCHERLICH 1978).

Dagegen erscheinen die Werte in den beiden nachfolgenden Jahren und insbesondere 2005 deutlich verringert. In diesem Jahr ist im Gegensatz zu anderen bemerkenswert, dass die Reduktion der Höhentriebe in größeren Höhenlagen (über 400 m bzw. über 500 m über NN) geringer ausfällt als in den tieferen Lagen (s. Abb. 4). Kurze Triebe sind 2004 und verstärkt 2005 vor allem auf Standorten mit geringer Summe aus klimatischer Wasserbilanz und nutzbarer Feldkapazität (< 50 mm) anzutreffen. Buchenbestände sind auf nährstoffreichen Standorten (Basalt, tertiäre Tone, aber auch kalkbeeinflusste Böden) mit vielfach höherer nutzbarer Feldkapazität tendenziell weniger von dem Witterungseinfluss 2003 betroffen

als solche auf nährstoffarmem Buntsandstein und vor allem auf Sandstandorten mit geringer Wasserspeicherung wie im Rhein-Main Gebiet. Nach günstigen Höhentrieben im Jahr 2006 tritt 2007 erneut ein sehr kurzer Trieb auf.

3.2.3 Fruktifikation

Auch bei der Einstufung der Fruktifikation ergänzen sich die Ergebnisse der flächenrepräsentativen Übersichtserhebung und der intensiven Dauerbeobachtung. Die bei der jährlichen Übersichtserhebung (Level I) einzelbaumweise durchgeführte Einstufung der Fruktifikation gibt vor allem Aufschluss über Vorkommen und Intensität der Fruchtbildung. Quantitative Daten aus Streufalluntersuchungen der intensiven Dauerbeobachtung auf Buchenflächen zu Knospen, Blüten, Schalen und Früchten ermöglichen dagegen Beiträge zum Verständnis der Kohlenstoffallokation der Buche in Jahren mit und ohne Fruchtbehang.

Die Blüten- und Fruchtbildung ist ebenso wie das Sprosswachstum oder die Laubbildung eine Stoffwechsellistung der Buche, für die erhebliche Baustoffe beansprucht werden. Im Allgemeinen unterbrechen intensive Mast- oder Fruchtjahre bei der Buche mehrjährige Phasen ohne Mastanhang. In einem Buchenbestand fruktifizieren die besonders wuchskräftigen Buchen im vollen Lichtgenuss sowie großkronige Randbäume meist häufiger und intensiver als die übrigen Bestandesmitglieder.

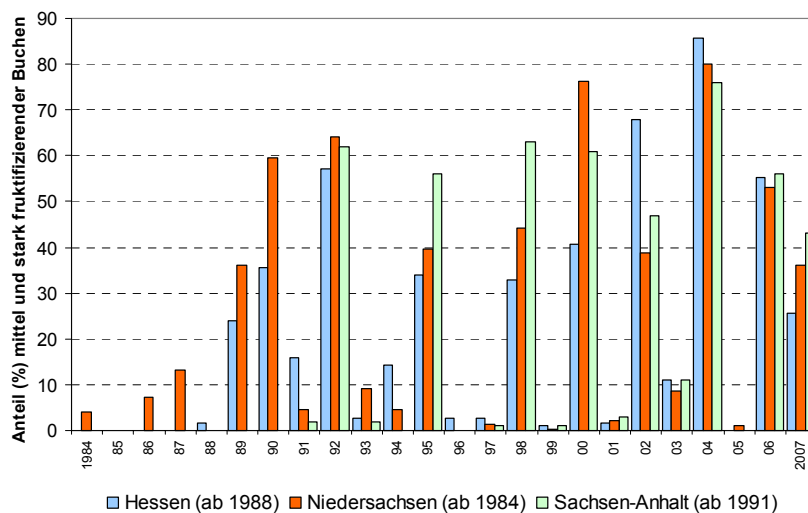


Abbildung 5: Anteil der Buchen (Alter über 60 Jahre) mit mittlerem bis starkem Fruchtanhang (Waldzustandserhebung 1984 - 2007, Hessen ab 1988, Sachsen-Anhalt ab 1991)

Aus Abbildung 5 ergibt sich, dass die Fruchtbildung in den letzten Jahren häufiger auftritt (PAAR et al. 2000) als noch in den 1980ern bzw. als dies aufgrund früherer

Angaben zu erwarten gewesen wäre. So geben diesbezüglich SCHWAPPACH (1895), BORCHERS (1954), ROHMEDER (1967) und BURSCHEL (1966) Zeitintervalle von 7-8 Jahren an. Für Niedersachsen ist nachzuweisen, dass die intensive Fruktifikation im Jahr 1989 im Anschluss an eine fünfjährige Phase ohne nennenswerte Fruchtbildung aufgetreten ist. Nach 1989 sind 1990, 1992, 1995, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 und 2007 jeweils Jahre mit einer intensiven Fruchtbildung. Fast ohne Eckern waren die Buchen dagegen beispielsweise in den Jahren 1997, 1999, 2001 und 2005. Damit hat sich seit 1998 ein etwa 2-jähriger Turnus intensiver Buchenmasten entwickelt. Die Fruchtbildung der Buche verläuft in Hessen, Niedersachsen und in Sachsen-Anhalt weitgehend synchron, daher ist von großräumig gleichlaufenden Steuergrößen wie Großwetterlagen auszugehen (WACHTER 1964). Im Jahr 2004 wurde in allen drei Ländern der im Vergleich der Zeitreihe umfangreichste Bucheckernanhang festgestellt.

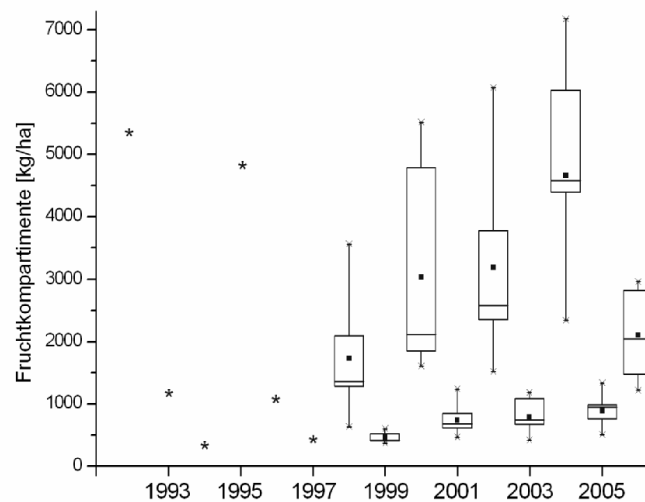


Abbildung 6: Fruchtbiomasse (Summe aus Knospen, Blüten, Früchten und Schalen) im Streufall der Buchen der Level II-Flächen (1998 – 2006): Kalbach (bis 2004), Hünfeld, Kirchhain, Zierenberg, Homberg/Efze, Spessart und Weilburg; Sterne: Zierenberg (1992 - 1997); Box- und Whisker-Plots (Querstriche in der Box: Median, Quadrate: arithmetisches Mittel)

Die im Streufall gemessenen Fruchtbiomasse (Summe aus Früchten, Blüten, Knospen und Schalen) der sieben intensiv beobachteten Buchenflächen in Hessen (s. Abb. 6, Tab. 1) ergeben eine mittlere Fruchtbiomasse von $2090 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Bemerkenswert ist aber die im Vergleich zur Blattmasse (s. Abb. 9) außerordentlich große Variabilität von Jahr zu Jahr (1999: $463 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, dagegen 2004 ein 10facher Wert von $4668 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Abfolge von starker und geringer Fruktifikation auf den Level II-Fallstudien ist mit der Rhythmik der flächenbezogenen Übersichtserhebung (s. Abb. 5) vergleichbar. Dies trifft insbesondere für die Mast-

jahre 1998, 2000, 2002, 2004 und 2006 wie auch im Falle von Zierenberg für 1992 und 1995 zu.

Tabelle 1: Oberirdische Nettoprimärproduktion (in t Biomasse ha⁻¹ a⁻¹) 1998 bis 2004 im Mittel von sieben Level II-Flächen in Hessen

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Mittel
Blätter	3,003	3,614	3,291	3,625	2,971	3,186	3,563	3,322
Früchte	0,378	0,007	0,917	0,029	0,879	0,046	1,480	0,534
Knospen	0,301	0,276	0,442	0,292	0,440	0,302	0,484	0,363
Blüten	0,119	0,032	0,305	0,039	0,251	0,049	0,440	0,176
Schalen	0,935	0,148	1,375	0,386	1,625	0,393	2,264	1,018
Summe Frucht-kompartimente	1,733	0,463	3,039	0,745	3,194	0,790	4,668	2,090

In den Mastjahren (1998, 2000, 2002, 2004) betrug die im Streufall gemessene Biomasse an Blüten im Mittel 279 kg ha⁻¹ a⁻¹; 2004 erreichten die Blüten mit 440 kg ha⁻¹ a⁻¹ den höchsten Wert der Zeitreihe. Früchte fanden sich in Mastjahren im Mittel 913 kg ha⁻¹ a⁻¹ (2004: 1481), dagegen in Nichtmastjahren im Mittel nur 27 kg ha⁻¹ a⁻¹. Bemerkenswert ist, dass in Nichtmastjahren nicht nur weniger Blüten entstehen, sondern sich zudem aus gebildeten Blüten auch deutlich weniger Früchte entwickeln. In der Regel entsteht in diesen Jahren je Kilogramm Blüten sogar weniger als ein Kilogramm Früchte (Quotient Früchte/Blüten s. Abb. 7, links).

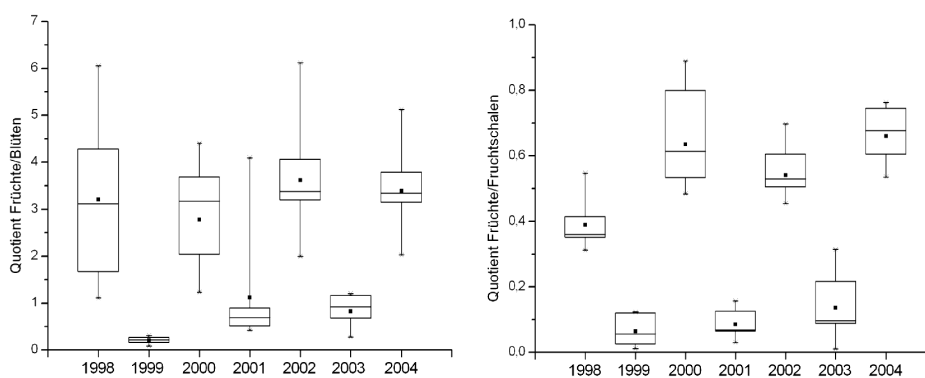


Abbildung 7: Quotient Früchte/Blüten (links) und Früchte/Fruchtschalen (rechts), Biomasse im Streufall der Buchen der Level II-Flächen (1998 - 2004): Kalbach, Hünfeld, Kirchbain, Zierenberg, Homberg/Efze, Spessart und Weilburg; Box- und Whisker-Plots (Querstriche in der Box: Median, Quadrate: arithmetisches Mittel)

Auch der Quotient aus Früchten und Fruchtschalen unterscheidet sich in den beiden Jahresgruppen (s. Abb. 7, rechts). In Mastjahren sind deutlich mehr Früchte je Einheit Schalen vorhanden als in Nichtmastjahren.

Eine Erklärung ermöglicht das Verhältnis von Bucheckern-Schalen und Blüten. Dieser Quotient variiert in den beiden Gruppen vergleichsweise wenig (Quotient Mastjahre: 6,1; Nicht-Mastjahre 7,8). Während sich die Größe von Bucheckern von Jahr zu Jahr kaum unterscheidet, entwickeln sich in Nichtmastjahren aus einem nennenswerten Teil der Blüten Früchte mit Cupula, aber keine vollständig ausgebildeten Bucheckern. Nichtmastjahre zeichnen sich demnach einerseits durch weniger Blüten, andererseits auch durch eine sehr gehemmte Entwicklung von Früchten aus.

Die veränderte Abfolge von Mastjahren bei Buche ist Ausdruck einer veränderten Zyklisierung und Verfügbarkeit von Bau- und Reservestoffen. Zwar wird der Impuls zu einer Fruktifikation durch Temperaturkriterien der Vorjahre ausgelöst (GRUBER 2004), die weitere Entwicklung bis hin zu vitalen Früchten erfordert jedoch in großem Umfang verfügbare Baustoffe und chemische Energie. Dies wird anschaulich in der chemischen Zusammensetzung von Bucheckern (gesättigte und ungesättigte Fettsäuren wie Linolsäure und Ölsäure, Stärke sowie Aminosäuren einschließlich pflanzlichen Eiweißes), aber auch im Gehalt von Elementen wie Stickstoff (N) in den Fruchtkompartimenten der Streu. So wurde beispielsweise für die Level II-Fläche Zierenberg ein N-Gehalt von 150 kg ha⁻¹ im Jahr 2004 in der Streu gemessen, davon 120 kg in Fruchtkompartimenten (Früchte, Fruchtschalen und Blüten) und nur 30 kg N in der Blattbiomasse.

3.3 Belaubung

3.3.1 Verlichtung der Oberkrone

Die Zeitreihe der mittleren Oberkronenverlichtung¹ fängt für die über 60-jährigen Buchen 1984 in Hessen und auch in Niedersachsen mit einem Ausgangswert von etwa 15 % an. Bis Mitte der 1990er Jahre verdoppeln sich die Werte. 1995 fehlen im Vergleich zu einer wuchsplatzbezogenen Referenz einer vollbelaubten Oberkrone der Buche im Mittel etwa 1/3 der Blätter. Seit Mitte der 1990er Jahre sind Jahre erkennbar, die unterschiedlich vom mehrjährigen Niveau abweichen. Beispielsweise ist die mittlere Oberkronenverlichtung insbesondere in Hessen und

¹ Nach dem ICP-Forests-Manual zur Ansprache von Baumkronen (EICHHORN et al. 2006) werden in der Waldzustandserhebung die von Baumnachbarn unbeeinflussten *oberen* Teile von vorherrschenden, herrschenden und mitherrschenden Bäumen beurteilt.

in Sachsen-Anhalt in den Jahren 2000 und 2004 sprunghaft erhöht; beides Jahre mit einem besonders hohen Fruchtanhang (s. Abb. 5).

Im Anschluss an das warm-trockene Jahr 2003 ist die markanteste Steigerung der Verlichtungswerte seit Beginn der Beobachtungen 1984 festzustellen.

Bei der Buche besteht seit Beginn der Erhebung ein differenzierter Trend zwischen jungen und alten Bäumen (s. Abb. 8). Die Oberkronenverlichtung der jüngeren (bis 60-jährigen) Buchen liegt weit unter den Werten der Älteren (über 60-jährigen). Insbesondere fehlen die sprunghaften Anstiege der Jahre 1992 und 2000.

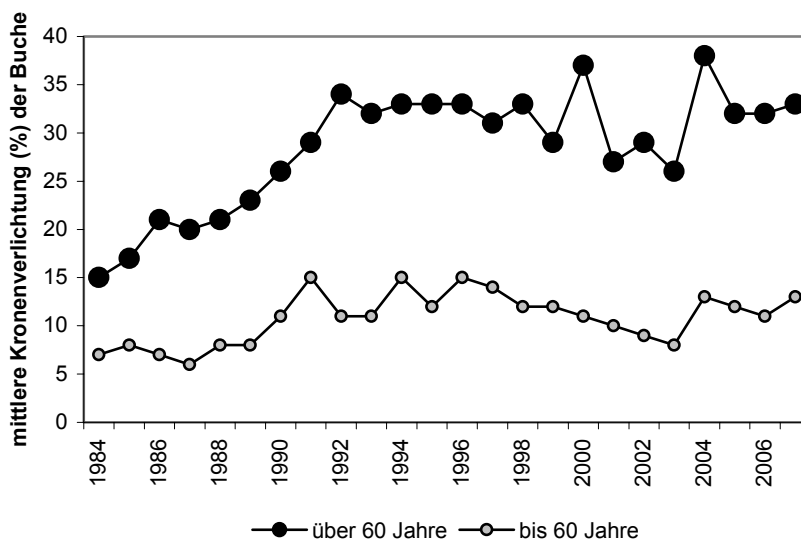


Abbildung 8: Entwicklung der mittleren Kronenverlichtung (%) in der von Nachbarbäumen unbeeinflussten Oberkronen der Buche in Hessen getrennt nach Altersstufen (8 km x 8 km Netz)

Da die Blühreife der Buche überwiegend erst ab dem Alter 40 einsetzt, wirken sich intensive Fruchtjahre auf den Verlauf der mittleren Oberkronenverlichtung der jüngeren Buche kaum aus. Eine gewisse Besonderheit stellt das Jahr 2004 dar, da in diesem Jahr auch bei der jüngeren Buche ein sprunghafter Anstieg der Kronenverlichtung festzustellen ist, allerdings schwächer ausgeprägt im Vergleich zu den älteren Bäumen.

Für Eichenbestände besteht in der Rhein-Main-Ebene ein gesicherter statistischer Zusammenhang zwischen hohen Blattverlusten in der Oberkrone und nachfolgender Mortalität. Der Anteil von über 60-jährigen Bäumen mit mehr als 60 % Blattverlust erreicht hier – wie in keinem anderen hessischen Wuchsgebiet oder bei keiner anderen Baumart – seit 1994 häufig Werte zwischen 10 % und 22 %. Während die annuelle Mortalität bei Eichen mit einem Blattverlust unter 60 % bei unter 1 % liegt, steigt die Wahrscheinlichkeit des Absterbens ab 60 % Blattverlust

rasch und überproportional an. Das Beispiel zeigt, dass bei der Eiche starke Blattverluste der Oberkrone ein sicherer Weiser für Absterberisiken sind.

Wie veränderte sich im Vergleich zur Eiche bei der Buche die Häufigkeit der Blattverluststufe über 60 % nach 2003? Im Mittel der Jahre 1998 bis 2002 erreicht der Anteil starker Oberkronenverlichtung in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt lediglich 3 %. Der Wert bleibt auch 2003 unauffällig. 2004 verdreifacht bis vervierfacht sich jedoch der Anteil der Buchen mit über 60 % Blattverlust in der Oberkrone in Hessen und in Sachsen-Anhalt. In Sachsen-Anhalt tritt 2006 abermals ein hoher Wert auf. Trotz erhöhter Anteile starker Oberkronenverlichtung zeigt die Buche gegenwärtig nur unwesentlich erhöhte Mortalitätsraten.

3.3.2 Blattbiomasse

Im Gegensatz zur Belaubungsschätzung, bei der per Definition eine Beurteilung des nicht von Nachbarbäumen beeinflussten Teils der Lichtkrone der vorherrschenden, herrschenden und mitherrschenden Buchen erfolgt, gibt der Streufall eine bestandesbezogene Information wieder. Es werden Blätter aller Bäume aus allen Kronenbereichen erfasst, insbesondere auch die größeren und schwereren Schattblätter aus den unteren Kronenteilen.

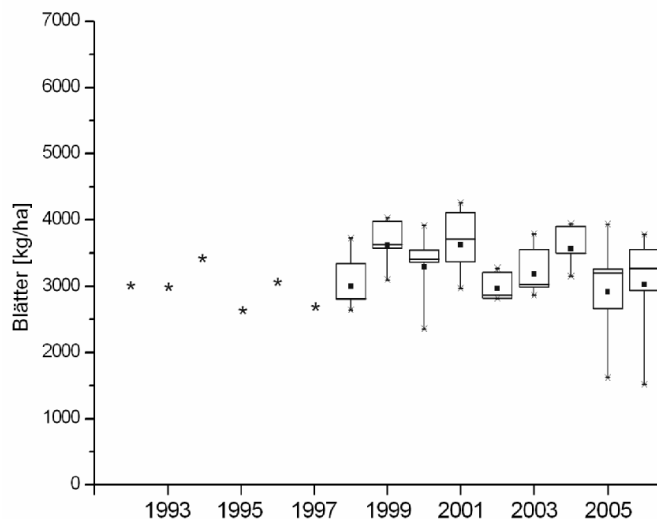


Abbildung 9: Entwicklung der Blattbiomasse auf sieben Level II-Flächen in Hessen 1998 - 2006, dargestellt als Box- und Whisker-Plots (Querstriche in der Box: Median, Quadrate: arithmetisches Mittel). Für die Fläche Zierenberg (Sterne) liegt die Zeitreihe seit 1992 vor.

Im Mittel werfen die sieben Buchenbestände $3.301 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Laubstreu ab (s. Abb. 9). Die Variabilität von Jahr zu Jahr ist mit einer Spannweite zwischen $2971 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2002) und $3625 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2001) eher gering. Der Laubabfall des

Jahres 2003 entspricht einem mittleren Wert, 2004 lag die Gesamtmasse der Blätter sogar über dem Durchschnitt. Dagegen zeigt der Box- und Whisker-Plot des Jahres 2005 mit im Mittel $2920 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine niedrige Blattbiomasse an (vgl. Abschnitt 3.2).

Am Beispiel der Level II-Fläche Zierenberg (s. Abb. 10) wird deutlich, dass in Fruktifikationsjahren die Biomasse der Fruchtkompartimente nicht aus einer jeweils reduzierten Blattmasse resultiert, wie dies aus einer bei Buche biologisch konkurrierenden Bildung von Blatt- und Blütenknospen denkbar wäre.

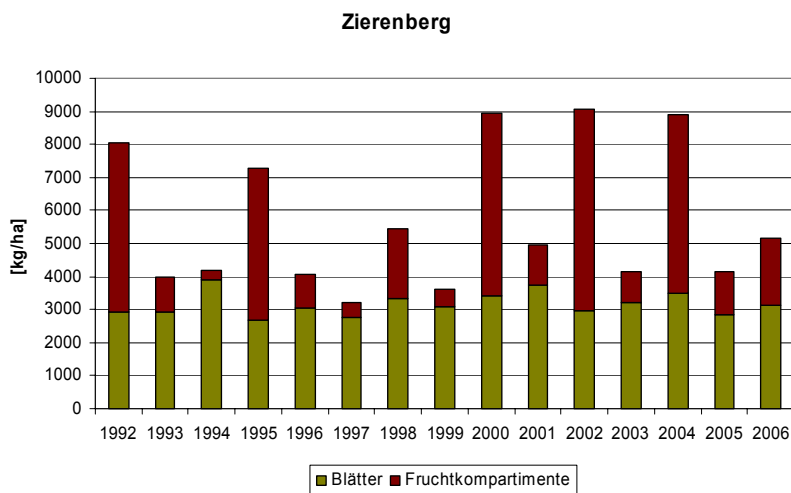


Abbildung 10: Blatt- und Fruchtbiomasse auf der Level II-Fläche Zierenberg 1992 - 2006. Gleicher Befund auf den Vergleichsflächen.

3.4 Blattvergilbung, Ernährungszustand und biotische Faktoren

Der grüne Blattfarbstoff, das Chlorophyll, ist Sitz der Kohlenstoff-Assimilation. Seit Beginn der Waldzustands-Übersichtserhebung wird deshalb die Häufigkeit und Intensität der *Vergilbung* von Nadeln und Blättern erfasst. Vergilbungen an nahezu einem Drittel der beobachteten Bäume traten vorzugsweise in der zweiten Hälfte der 1980er und der ersten Hälfte der 1990er Jahre auf. Seit 1995 ist Vergilbung nur an rd. 5 % der Buchen feststellbar, in den letzten Jahren liegen die Werte oft nur bei 1-2 %. 2004 und 2005 sind die Werte auf sehr niedrigem Niveau leicht erhöht.

Zur Beurteilung der *Ernährungssituation* der Buche in Hessen und Niedersachsen werden an elf Buchenflächen jährlich Blattanalysen durchgeführt. Die untersuchten Buchenbestände repräsentieren eine breite Amplitude von Standorten. Eine Bewertung der Elementgehalte anhand der Referenzwerte des ARBEITSKREISES STANDORTSKARTIERUNG (2003) ergibt im Mittel der Jahre 1995 - 2005, dass die Stickstoff-Gehalte der Buchenblätter im Bereich hoher Werte

liegen. Nach 2003 ergibt sich entgegen der Annahme von RENNENBERG (2004), der für 1-jährige Buchenkeimlinge unter kontrollierten Bedingungen eine reduzierte N-Aufnahme bei reduzierter Wasserverfügbarkeit beschreibt, kein Abfall der N-Gehalte in den Buchenblättern. Für die Kalium-, Calcium- und Magnesium-Versorgung werden überwiegend Werte im mittleren bis sehr hohen Bereich festgestellt, lediglich auf versauerten, basenarmen Standorten werden in Blättern Defizite in den Calcium- und Magnesium-Gehalten beobachtet. Die Phosphor-Versorgung der Blätter ist auf der Mehrzahl der Flächen unzureichend. Die Stickstoffquotienten - bewertet nach BURG (1985, 1990) zitiert nach BÜTTNER et al. (1993) - belegen, dass aufgrund einer standortsübergreifenden Stickstoff-Eutrophierung vielfach disharmonische Ernährungssituationen vorliegen.

Für eine Bewertung der Resilienzeigenschaften ist darüber hinaus eine quantitative Darstellung biotischer Faktoren wie Insekten und Pilze notwendig. Seit Beginn der Waldzustandserhebung werden Insekten und Pilze an der Buche erfasst, bislang ist deren Einfluss auf die Buchenvitalität in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt jedoch eher gering. ROSKAMS (2006) führte im europaweiten Level I- und Level II-System ein, für Probestämme die beobachteten biotischen und abiotischen Schäden gliedert nach dem betroffenen Baumteil, Ausmaß der Symptome und der Schadensursache zu dokumentieren.

4 Übersicht Hauptergebnisse

Tabelle 2: Übersicht der Indikatoren von Resilienzeigenschaften der Buche nach dem warmen, trockenen Jahr 2003. Werte der Jahre 2003 bis 2006 (2007) in Relation zum Mittel der Jahre 1998 - 2002.

Indikator	2003	2004	2005	2006	2007
	% Relation vom Mittel 1998-2002	% Relation vom Mittel 1998-2002	% Relation vom Mittel 1998-2002	% Relation vom Mittel 1998-2002	% Relation vom Mittel 1998-2002
Wachstum					
Radialzuwachs					
Level-II - Flächen in Hessen	107	57	84	84	-
Höhentriebentwicklung					
Level-II- Flächen in Hessen	102	70	55	95	44
Frucht- bildung					
Fruchtanhang					
Übersichtserhebung in Hessen, Niedersachsen u. Sachsen-Anhalt, Buche > 60 Jahre	10*	80*	0*	55*	35*
Biomasse der Fruchtkompartimente					
Streufallmessungen Level-II- Flächen in Hessen	43	255	42	96	-
Belaubung					
mittl. Oberkronenverlichtung					
Übersichtserhebung in Hessen, Niedersachsen u. Sachsen-Anhalt, Buche > 60 Jahre	91	126	103	107	106
Bestandes-Blatt-Biomasse					
Streufallmessungen Level-II- Flächen in Hessen	97	108	88	92	-
Mortalität					
Annuelle Mortalität	2003/2004:	2004/2005:	2005/2006:	2006/2007:	
Übersichtserhebung in Hessen, Niedersachsen u. Sachsen-Anhalt, Buche > 60 Jahre	0,1*	0,1*	0*	0,1*	-

* Prozent der Stichprobenbäume je Jahr (Jahreswerte)

Tabelle 3: Oberirdische Nettoprimärproduktion (in t Biomasse ha⁻¹ a⁻¹) im Jahr 2004 im Vergleich zum Mittel der Jahre 1998 bis 2002, sieben Level II-Flächen in Hessen

Bildung oberirdischer Biomasse	Mittel 1998 - 2002	2004	
	Biomasse t ha ⁻¹ a ⁻¹	Biomasse t ha ⁻¹ a ⁻¹	% vom Mittel 1998 - 2002
Derbholz, Äste Annahme: 12 m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹	6,7	3,3	49
Blätter	3,3	3,6	108
Fruchtkompartimente	1,8	4,6	255
Summe	11,8	11,5	97

5 Bewertung Resilienzeigenschaften, Vitalität und Risiko der Buche

Die Buche wird von BACKES u. LEUSCHNER (2000) zitiert in RENNENBERG et al. (2004) als vergleichsweise trockenheitssensitive Baumart bewertet, für die zu erwarten ist, dass sie in ihrer physiologischen Konkurrenzkraft durch längere Trockenphasen besonders negativ beeinflusst wird. Wie kann aber das tatsächliche Risiko der Buche gegenüber Jahren mit extremer Witterung zahlenmäßig erfasst und bewertet werden? Dazu wird der außerordentlich trocken-heiße Sommer 2003 als Beispiel herangezogen und Reaktionsmuster der Buche auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings untersucht. Um die Reaktionsmuster zu veranschaulichen, wird auf das Vitalitätsdreieck von GEHRIG (2004) mit seinen Kriterien Langlebigkeit, biologischer Funktion und Stresstoleranz Bezug genommen. Für jedes der Kriterien werden Indikatoren genutzt, die in den Zeitreihen des forstlichen Umweltmonitorings vorliegen. So wird für die „Langlebigkeit“ die annuelle Mortalität von Probestämmen verwendet, für die „biologische Funktion“ insbesondere die Indikatoren Durchmesser- und Höhenzuwachs, Fruktifikation, Belaubung der Oberkrone sowie Blattbiomasse ermittelt. Eine Integration der sektoralen Betrachtung erfolgt mit der Bewertung der Zuordnung von assimiliertem Kohlenstoff in verschiedene Baumkompartimente. Aus dem zeitlichen Ablauf der Reaktionen wird auf Eigenschaften der Stresstoleranz der Buche geschlossen.

Langlebigkeit: Die annuelle Mortalität der Buche liegt im Mittel für Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt (Buche über 60 Jahre) in den Jahren nach 2003 unverändert bei lediglich 0,1 % (s. Tab. 2). Auf Länderebene betragen die Mortalitätsraten in Einzeljahren bis 0,3 % (Sachsen-Anhalt 2003/2004, Hessen 2004/2005, Niedersachsen 2006/2007). Gegenwärtig ist die Buche in dem für größere Regionen flächenrepräsentativen Level I-Beobachtungsnetz die Hauptbaumart mit der niedrigsten jährlichen Absterberate. Wie die Mortalitätsrate und

Schäden an Buchen durch mehrfach wiederholte Trockenheitsjahre beeinflusst werden, ist jedoch nicht abzusehen (vgl. RENNENBERG et al. 2004, MANTHEY et al. 2007).

Bereits heute wird auf einzelnen, für Trockenheit besonders disponierten Standorten in extremen Perioden vorzeitiger Blattabfall und das Absterben alter Buchen beobachtet (MEIER u. LEUSCHNER 2007, BREDÁ et al. 2006). LEUSCHNER u. HERTEL (2003) haben mit zunehmendem Trockenstress eine reduzierte Feinwurzelmasse festgestellt. Dies kann auf trockenheitsdisponierten Standorten negative Auswirkungen auf die Vitalität der Buche haben.

Funktion: Die Höhentriebe erreichen im Jahr 2004 nur 70 % der Triebhöhen des Zeitraums 1998 - 2002. Die Wuchsdepression setzt sich auch 2005 deutlich fort. Die nach dem Jahr 2006 erneut sehr niedrige Höhenentwicklung 2007 deutet darauf hin, dass bei einer Häufung warm-trockener Jahre mit einer länger anhaltenden Begrenzung der Höhenwuchsleistung zu rechnen ist. Daraus können sich Folgerungen für Wachstumsverläufe, aber auch für die Konkurrenzkraft der Buche gegenüber Baumarten wie Eiche, Hainbuche oder Linde ergeben. Bei anhaltendem Wasserstress wird ein Zurücksetzen von Buchenkronen und spätere Sekundärkronenbildung beobachtet.

Der Radialzuwachs zeigt 2004, also ein Jahr nach 2003 eine Reduktion auf 57 % des Mittels 1998 - 2002, erholt sich jedoch im Gegensatz zur Entwicklung der Höhentriebe bereits im darauf folgenden Jahr weitgehend. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der Erwartung von FELBERMEIER (1994), dass die Buche auf Trockenstress 1-2 Jahre mit verringertem Jahrringzuwachs reagiert, um danach wieder zum ursprünglichen Wachstumsniveau zurückzufinden.

Der für die Level II-Flächen hergeleitete mittlere Zuwachs an Biomasse für Derbholz und Äste von etwa $12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wird im Jahr 2004 ca. um 50 % reduziert im Vergleich zum Mittel von 1998 bis 2002, erholt sich danach wieder, erreicht jedoch nicht ganz das Ausgangsniveau. Mit diesem Sachverhalt geht eine forstbetrieblich relevante deutliche Verringerung des Holzertrages einher. Dagegen ist 2004 mit 255 % des Mittels der Jahre 1998 bis 2002 die im Beobachtungszeitraum umfangreichste Mehrproduktion an Früchten, Knospen und Fruchtschalen festzustellen. Bemerkenswert ist, dass die Verlagerung in die Früchte mit einer in etwa gleich bleibenden Biomasse in Blättern einhergeht. Im Vergleich zur Referenzperiode 1998 bis 2002 ist die oberirdische Nettoprimärproduktion 2004 insgesamt nur um etwa 3 % verringert (ohne Berücksichtigung der Wurzelsysteme) (s. Tab. 3).

Stresstoleranz: Nach dem außerordentlich warm-trockenen, aber in seiner Charakteristik singulären Jahr 2003 ergeben sich für die Buche kein großräumig feststellbares Ansteigen der Mortalität und keine wesentliche Reduktion der gesamten oberirdischen Biomasseproduktion. Im Hinblick auf die Zuordnung des assimilierten Kohlenstoffs ist jedoch eine drastische Verlagerung von Stamm- in Fruchtbiomasse festzustellen. Dies ist gleichzusetzen mit einem völligen Um-

steuern der Baumstrategie von Raumeroberung und baumindividueller Stabilität hin zur Mast für die Arterhaltung. Deutliche Reduktionen der Höhen- und der Durchmesserentwicklung sind nachweisbar. Damit wird die Produktion von Holz als nachwachsendem Rohstoff mit aller ökologischen und ökonomischen Konsequenz eingeschränkt. Dem steht jedoch die Sicherung der Art durch Fruchtbildung und natürliche Verjüngung gegenüber.

Wichtig für die Bewertung der Stresstoleranz ist es, die Zeitdauer der Reaktionen auf eine Störung zu beschreiben. Einige Indikatoren lassen ein rasches Zurückschwingen in den Normbereich erkennen. So hat die Zunahme der Verlichtung von Oberkronen im Anschluss an das warm-trockene Jahr 2003 in Hessen und Sachsen-Anhalt 2004 ein sprunghaftes Erscheinungsbild. Ab 2005 entsprechen die Verlichtungswerte wieder dem Mittel der Jahre 1998 - 2002. Die durch die extremen Witterungsereignisse ausgelöste starke Änderung der Oberkronenbelaubung erreicht nach vergleichsweise wenigen Jahren wieder das Niveau der - allerdings gegenüber 1984 erhöhten - Vergleichsjahre. Ähnliches trifft für die Durchmesserentwicklung zu, dagegen zeichnet sich bei den Höhentrieben eine länger wirksame Beeinträchtigung ab. Auch die in Folge einer Reihe von warmen Jahren und guter Stickstoffverfügbarkeit deutlich zunehmende Häufigkeit von Mastjahren bei der Buche ist als Indiz für längerfristig wirksame Veränderungen bauminterner Kreisläufe und Regelkreise zu interpretieren.

Ein Organismus ist nach GEHRIG (2004) vital, wenn er unter den herrschenden Umweltbedingungen die zur Verfügung stehende Energie in dem Dreieck aus Langlebigkeit, biologische Funktion und Stresstoleranz optimal einsetzt. Die Ergebnisse zu diesen Kriterien können nach 2003 nicht als Hinweis auf eine schwerwiegende Einschränkung der Vitalität der Buche gewertet werden. Vielmehr zeigt das deutliche Umsteuern der Kohlenstoff-Allokation der Buche eine aktive Anpassung an geänderte Umweltbedingungen und damit ein hohes Maß an Stresstoleranz. Auf Grund dieser besonderen Anpassungsfähigkeit ist im Einklang mit der Bewertung von LEUSCHNER (1998) und HERTEL et al. (2004) das generelle Bild einer ausgesprochen trockenheitsempfindlichen Baumart Buche zu revidieren. Inwieweit eine unmittelbare Abfolge mehrerer Extremjahre wie 2003 zu Grenzen der Anpassungsfähigkeit der Buche führen wird, bleibt offen.

Literatur

- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003): Forstliche Standortaufnahme, IHW-Verlag, 352 S.
- BACKES, K. u. LEUSCHNER, C. (2000): Leaf water relations of competitive *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* trees during 4 years differing in soil drought. Can. J. Forest Res. 30, 335-346
- BMVEL (2004): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Zu den Bundeswaldinventur-Erhebungen 2001 bis 2002 und 1986 bis 1988. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), 87 S.

- BORCHERS, K. (1954): Zur Technik der Buchennaturverjüngung in Niedersachsen, Forst- und Holzwirt, 416-421
- BREDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A. u. 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
- BRUMME, R. (1999): Hierarchical control on nitrous emission in forest ecosystems. *Global Biochemical Cycles*, Vol 13, 1137-1148
- BÜTTNER, G.; HARTMANN, G. u. THOMAS, F. (1993): Vorzeitige Vergilbung und Nährstoffgehalte des Buchenlaubes in Südniedersachsen. *Forst u. Holz* 48, 627-630
- BURG, J. van den (1985): Foliar analysis for determination of tree nutrient status – a compilation of literature data. Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bosen Landschapsbouw „De Dorschkamp“, Wageningen, Rapport Nr. 414
- BURG, J. van den (1990): Foliar analysis for determination of tree nutrient status – a compilation of literature data. 2. Literature 1985 – 1989 „De Dorschkamp“, Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen, Rapport Nr. 591
- BURSCHEL, P. (1966): Untersuchungen in Buchenmastjahren. *Forstw. Cbl.* 85, 204-219
- CROPP, R. u. GABRIC, A. (2002): Ecosystem adaptation: Do ecosystems maximize resilience? *Ecology* 83, 2019-2026
- DAMMANN, I.; SCHRÖCK, H.W. u. HERRMANN, T. (2000): Ansätze zur integrierten Auswertung von Kronenzustandsdaten im Rahmen des Level-II-Programms. *Forstarchiv* 71, 59-64
- DOBBERTIN, M. u. DE VRIES, W. (2008): Interactions between climate change and forest ecosystems. In: FISCHER, R. (Report ed.): *Forest ecosystems in a changing environment: Identifying future monitoring and research needs*. Cost Workshop Istanbul, Turkey. COST www.cost.esf.org. 8-11
- EICHHORN, J. (1995): Stickstoffsättigung und ihre Auswirkungen auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg (Habilitationsschrift), Ber. d. Forsch. Zentrums Waldökosysteme, Reihe A. Göttingen, 186 S.
- EICHHORN, J.; SZEPESI, A.; FERRETTI, M.; DURRANT, D. u. ROSKAMS, P. (1999/updated: 2006): ICP Forests Manual Part II Visual Assessment of Crown Condition, UNECE ICP Forests. 69 S.
- EICHHORN, J. u. PAAR, U. (2008): Klimaänderung und Waldentwicklung in Hessen. Hess. Forstverein Jahrestagung 2006. *Mitt. d. Hess. Forstvereins.* (im Druck)
- EICHHORN, J. u. SZEPESI, A. (2008): Tree reactions to environmental changes. In: FISCHER, R. (Report ed.): *Forest ecosystems in a changing environment: Identifying future monitoring and research needs*. Cost Workshop Istanbul, Turkey. COST www.cost.esf.org. 12-13
- ELLENBERG, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Ulmer Verlag Stuttgart, 1095 S.
- FELBERMEIER, B. (1994): Die klimatische Belastbarkeit der Buche, *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 113, 152-174
- GAUGER, T.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; ERISMAN, J.W.; VERMEULEN, A.T.; DRAAIJERS, G.P.J.; BLEEKER, A. u. NAGEL, H.D. (2002): Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with Critical Loads and Critical Levels. Part 1: Deposition Loads 1990 - 1999, Final Report 299 42 210, Institut für Navigation der Universität Stuttgart und Umweltbundesamt, 207 S.
- GEHRIG, M. (2004): Methoden zur Vitalitätsbeurteilung von Bäumen. Vergleichende Untersuchungen mit visuellen, nadelanalytischen und bioelektrischen Verfahren. Diss. ETH Zürich Nr. 15341, 255 S.
- GIVNISH, T.J. (1988): Adaptation to sun and shade: A whole-plant perspective. *Aust. J. Plant Physiol.*, 15, 63-92
- GRUBER, F. (2004): Über die Vitalität der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) In: Schriftenreihe Dendrologie, Baumpflege und Waldbotanik aus dem Inst. F. Forstbotanik u. Baumphysiologie der Georg-August-Universität Göttingen. 215 S.

- HERTEL, D.; CONERS, H.; MUHS, A.; SCHIPKA, F. u. STROBEL, J. (2004): Zur Trockenheitsgrenze der Buche in Mittel- und Osteuropa: Eine ökosystemare Transektstudie an Buchen-Altbeständen. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Sonderheft 2, 28-37
- HORN, M.; WERNICKE, I. u. ZIESING H.-J. (2007): CO₂ Emissionen in Deutschland 2007. Energiewirtschaftliche Tagesfragen. WASO Verlags- und Versicherungsservice GmbH
- IPCC (2007): 4. Sachstandsbericht (AR 4) des IPCC (2007) über Klimaänderungen. Synthesebericht. www.ipcc-wg1.ucar.edu, 52 S.
- LEUSCHNER, C. (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 10, 5-18
- 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
- LEUSCHNER, C.; MEIER, I. u. HERTEL, D. (2006): On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. Ann. For. Sci 63, 355-368
- MANTHEY, M.; LEUSCHNER, C. u. HÄRDLE, W. (2007): Buchenwälder und Klimawandel. Natur und Landschaft 82, 441-445
- MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J. u. RADEMACHER, P. (1995): Long term trends in Deposition and Seepage Output in Northwest German Forest Ecosystems. Water, Air and Soil Pollution 85: 611-616
- MEESENBURG, H.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; SCHULZE, A.; RADEMACHER, P.; MINDRUP, M.; KÖNIG, N.; FORTMANN, H.; EBERL, C. u. MEIWES, K.J. (2002): Forstliches Umweltmonitoring als Entscheidungshilfe für die Forstwirtschaft und Umweltpolitik. Forst und Holz 57, 707-712
- MEIER, I.C. u. LEUSCHNER, C. (2007): The belowground drought response of European beech: fine root biomass and production in 14 mature stands across a precipitation gradient. Submitted
- MITSCHERLICH, G. (1978) Wald, Wachstum und Umwelt, 1. Band. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt pp. 144
- NOAA (2008): www.noaa.gov. National Oceanic and Atmospheric Administration, USA
- OTTO, H.J. (1994): Waldökologie. Ulmer Verlag Stuttgart, 391 S.
- PAAR, U.; KIRCHHOFF, A.; WESTPHAL, J. u. EICHORN, J. (2000): Fruktifikation der Buche in Hessen. AFZ-DerWald 25, 1362-1363
- RENNENBERG, H.; SEILER, W.; MATYSSEK, R.; GESSLER, A. u. KREUZWIESER, J. (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa. Allgem. Forst- u. Jagdzeitung 175, 210-224
- ROHMEDER, E. (1967): Beziehungen zwischen Frucht- bzw. Samenerzeugung und Holzerzeugung der Waldbäume. AFZ, 33-39
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Ulmer Verlag, 164 S.
- ROLOFF, A. (2005): Phänomene der Anpassung und Optimierung bei Bäumen. AFZ-DerWald, 641-645
- ROSKAMS, P. (2006): Assessments of Damage Causes. In: EICHHORN, J.; SZEPESI, A.; FERRETTI, M.; DURRANT, D. u. ROSKAMS, P. (2006): Manual on Methods and Criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. ICP Forests. www.icp-forests.org.
- SCHULZE, E.D.; BECK, E. u. MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2002): Pflanzenökologie. Spektrum Akad. Verlag, 846 S.
- SCHWAPPACH, A. (1895): Die Samenproduktion der wichtigsten Waldbäume in Preußen. Zeitschr. Forst- und Jagdwesen, 147-174
- SCHWERTFEGER, F. (1970): Die Waldkrankheiten. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 509 S.

- SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J. u. MEESENBERG, H. (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Der Wald* 62, 1246-1249
- ULRICH, B.; MAYER, R. u. KHANNA, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schriften Forstl. Fakult. Göttingen*. 256 S.
- UN/ECE u. EC (2000): Forest Condition in Europe. Results. 2000 Technical Report, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Geneva and Brussels, 86 S.
- WACHTER, H. (1964): Über die Beziehung zwischen Witterung und Buchenmastjahren. *Forstarchiv* 35, 69-78
- WALKER, B (1995): Conserving Biological Diversity through Ecosystem Resilience. *Conservation Biology* 9, 747-752
- WALKER, B.; KINZIG, A. u. LANGRIDGE, J. (1999): Plant attribute diversity, resilience, and ecosystem function: The nature and significance of dominant and minor species. *Ecosystems* 2, 95-113
- ZIESING, H.-J. (2007): Nach wie vor weltweit steigende CO₂-Emissionen. *Energiewirtschaft. Tagesfragen* 57. Jg. Heft 9, 58-68
- ZIESING, H.-J. (2008): CO₂-Emissionen in Deutschland 2007: Milde Temperaturen und hohe Energiepreise lassen Emission sinken. *Energiewirtschaft. Tagesfragen* 58. Jg. Heft 4, 2-8

Korrespondierender Autor:

Prof. Dr. Johannes Eichhorn
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen
E-Mail: Johannes.Eichhorn@nw-fva.de
URL: www.nw-fva.de

Inge Dammann
Dr. Egbert Schönfelder
Mascha Albrecht
Dr. Uwe Paar
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Dr. Wolfgang Beck
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)