

# **AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DAS TROCKENSTRESSRISIKO VON BUCHEN- WÄLDERN AM BEISPIEL HESSISCHER BZE- UND INTENSIVMONITORING-STANDORTE**

Markus Wagner, Johannes Suttmöller, Julia Rudolph, Jan Hansen, Johannes Eichhorn,  
Stefan Fleck, Birte Scheler, Henning Meesenburg, Inge Dammann, Jan Evers, Uwe Paar,  
Jürgen Nagel, Hermann Spellmann

*Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen*

## **1 EINLEITUNG**

Das Gebiet Hessens liegt im Zentrum des europäischen Buchenvorkommens. Mit einem Anteil von 31% ist die Rotbuche die häufigste Baumart in hessischen Wäldern. Ihr Flächenanteil hat sich in den letzten 20 Jahren durch gezielte waldbauliche Maßnahmen erhöht. Für die Forstwirtschaft sind neben der Boden pflegenden Wirkung dieser Baumart, ihre Naturnähe, ihr Naturverjüngungspotenzial, die vielfältigen Optionen in der Mischung mit anderen Baumarten sowie die Holznutzung von großer Bedeutung. Der für die Zukunft erwartete steigende Bedarf an erneuerbaren Energieträgern erfordert eine zunehmende Nutzung der Baumart Buche.

Die Buche zeichnet sich durch eine hohe Konkurrenzkraft auf vielen unterschiedlichen Standorten aus. Ihre Verbreitung wird vor allem durch die Bodenwasserverfügbarkeit begrenzt (RENNENBERG et al. 2004). Im Zuge des Klimawandels werden eine geringere Wasserverfügbarkeit bereits zu Beginn der Vegetationsperiode sowie die Häufung von Trockenperioden während der Sommermonate erwartet (SUTMÖLLER et al. 2008). Beide Faktoren können die Buche in ihrer Vitalität und Produktivität beeinträchtigen.

Um Ursache und Wirkung von Trockenstress bei Buchen genauer zu verstehen und das zukünftige Risikopotential besser abschätzen zu können, wurden klimatisch-hydrologische Trockenheitsindikatoren für den Zeitraum 1961-2006 verschiedenen Wachstumsindikatoren der Buche gegenübergestellt. Über eine Auswertung von Jahren mit extremer Witterung sollten Grenzwerte bzw. -bereiche für Trockenstress hessischer Buchenwälder abgeleitet werden. Untersucht wurden hierfür 55 flächenrepräsentative Buchenstandorte der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) sowie die Buchen-Intensivmonitoringflächen des Level-II-Programms (Abb. 1) in Hessen. Letztere ermöglichen eine exaktere, standort-spezifischere Betrachtung, da nur von diesen Flächen direkte mehrjährige Klimamessreihen einschließlich der für die Kalibrierung und Validierung des Wasserhaushaltsmodells wichtigen Größen vorhanden sind. Zusätzlich existieren für 7 Flächen Zeitreihen von Jahrringanalysen und für vier Flächen mehrjährige, zeitlich hoch auflösende Umfangmessung zur Erfassung des Stammzuwachses. Als Fallbeispiel werden erste

Ergebnisse einer Detailanalyse von der nordhessischen Intensivmonitoringfläche Zierenberg genauer vorgestellt.



**Abb 1:** Lage der Buchen-Intensivmonitoring- (Level II) und Buchen-BZE II-Flächen in Hessen.

## 2 METHODEN UND MODELLE

### 2.1 METEOROLOGISCHE DATEN, BESTANDESPARAMETER UND WASSERHAUSHALTSSIMULATION

Für die Modellierung des Wasserhaushalts an den Untersuchungsstandorten wurde das deterministische, modular arbeitende Modell WaSiM-ETH (SCHULLA 2012) verwendet. Die potentielle Evapotranspiration wird im Modell nach der Methode von Penman-Monteith (MONTEITH 1965) berechnet. Die Berechnung der Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone erfolgt auf Grundlage der Richards-Gleichung (RICHARDS 1931) in eindimensionaler, vertikaler Form (SCHULLA 2012). Die Parametrisierung der verwendeten pF-Kurven erfolgte nach VAN GENUCHTEN (1980), die Ableitung der van Genuchten-Parameter in Anlehnung an WESSOLEK et al. (2009).

Für den meteorologischen Antrieb von WaSiM-ETH wurden in erster Linie Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, ergänzt durch eigene Messwerte von den Intensivmonitoringflächen ab Mitte der 1990er Jahre. Eine Regionalisierung der meteorologischen Daten erfolgte über eine in das Modell integrierte Interpolation mittels inverser Distanzgewichtung (IDW), z.T. ergänzt durch eine höhenabhängige Regression (Niederschlag, Lufttemperatur). Die meteorologischen Zeitreihen der Intensivmonitoringflächen wurden unter Verwendung von DWD-Daten mittels eines multiplen, linearen Regressionsansatzes lückenersetzt und ergänzt. Basierend auf den meteorologischen Daten erfolgt im Modell eine standort- und jahresspezifische Berechnung des Beginns (nach MENZEL 1997) und Endes (nach VON WILPERT 1990) der Vegetationsperiode.

Die für die Berechnung der Verdunstungsprozesse in WaSiM-ETH benötigten vegetationsspezifischen Parameter Blattflächenindex (LAI), Übershirmungsgrad und Bestandeshöhe wurden mittels des positionsabhängigen Einzelbaumwuchsmodells WaldPlaner (HANSEN 2006, 2012) für jeden Untersuchungsstandort in 5-jähriger Auflösung ab 1960 errechnet und als dynamische Eingangsgrößen in das Wasserhaushaltsmodell integriert. Modellparameter zur Bodenphysik basieren auf Bodenprofilaufnahmen, welche im Rahmen der Bodenzustandserhebung bzw. von Bodeninventuren des Intensivmonitoringprogramms erfolgten.

Als Kalibrierperiode für das hydrologische Modell diente der Zeitraum 1996 (für einige Flächen ab 1998) bis 2005. Von allen Intensivmonitoringflächen wurde die gemessene Jahressumme des Niederschlags mit den über das hydrologische Modell regionalisierten Werten der DWD-Stationen verglichen. Als zweite Kalibriergröße wurde die sich aus der Differenz der gemessenen Freiland- und Bestandesniederschläge ergebende Interzeption verwendet.

## **2.2 JAHRRINGANALYSEN UND DENDROMETERMESSUNGEN ZUR ERFASSUNG DES ZUWACHSVERLAUFS VON BUCHENSTÄMMEN**

Das jährliche Durchmesserwachstum von Bäumen lässt sich auch ohne regelmäßige Messungen rekonstruieren, wenn man den Bäumen Bohrkerne entnimmt und die Jahrringbreiten vermisst (Dendrochronologie). Im Rahmen einer bundesweiten Studie (vgl. BECK 2010) wurden an den 7 hessischen Buchen-Intensivmonitoringflächen Zierenberg, Kellerwald, Homberg, Kirchhain, Hünfeld, Weilburg und Spessart (s. Abb. 1) Bohrkerne für Zeitreihenanalysen der jährlichen Wachstumsraten der Bäume untersucht (EICHORN et al. 2008). Die Jahrringchronologien enden im Jahr 2006 und reichen je nach Bestandesalter bis zu 142 Jahre zurück. An jeder Intensivmonitoringfläche wurden mindestens 20 herrschende und vorherrschende Bäume in Brusthöhe mit je 2 Bohrkernen beprobt (genaue Methodenbeschreibung in BECK 2010).

Neben den sich aus den Jahrringanalysen ergebenden Zeitreihen des jährlichen Durchmesserzuwachses existieren für vier Intensivmonitoringflächen – Zierenberg, Homberg, Kirchhain und Weilburg – seit 1997 zeitlich hoch auflösende Umfangmessungen. Diese werden mittels Dendrometern des Typs „D4 Dial-Dendro UMS-electronic“

(UMS 2005) an jeweils 6 herrschenden und vorherrschenden Bäumen - mit Höhen zwischen 28 m und 38 m - in einer Stammhöhe von 130 cm und 500 cm in 30-Minuten-Intervallen erfasst. Durchgängige Datenreihen liegen aufgrund der sensiblen Messtechnik und der äußeren Witterungseinflüsse nicht immer vor. Verläufe des Zuwachses innerhalb eines Jahres oder zwischen aufeinander folgenden Jahren lassen sich jedoch auch hinreichend aus einer identischen Teilauswahl der Dendrometerzeitreihen beurteilen, welche innerhalb des Betrachtungszeitraums lückenlos vorliegen. In der vorliegenden Studie kommen für die Fläche in Zierenberg - zu einem Mittelwert aggregiert - insgesamt fünf Messreihen von vier verschiedenen Bäumen zur Anwendung. Registriert wird von den Dendrometern die Veränderung des Stammumfangs in Millimetern seit dem letzten Zurückstellen des Messseils auf 0. Um eine Maskierung des tatsächlichen Zuwachses durch tageszeitabhängige Quellungs- und Schrumpfungprozesse zu vermeiden, wurde der Tageszuwachs aus der Differenz der Messwertmaxima des Tages und Vortages berechnet (vgl. LISTING 2011). Mit Hilfe dieser Daten lassen sich Veränderungen im Zuwachs innerhalb der Vegetationsperiode identifizieren und dadurch klimatisch-hydrologischen Trockenstressindikatoren auch hinsichtlich der Definition von Grenzwerten besser zuordnen. Generell kommt dem Durchmesserzuwachs hierbei eine besondere Bedeutung als Indikator zu, da Wassermangel in erster Linie durch einen Rückgang dieser Wachstumskomponente zum Ausdruck kommt (WILSON & HOWARD 1968).

### **2.3 ERSTELLEN KOMBINIERTER KLIMATISCH-HYDROLOGISCHER INDIKATOREN ZUR ERKLÄRUNG VON WACHSTUMSSCHWANKUNGEN DER BUCHE**

Wachstumsmuster der Buchen werden durch eine Vielzahl von Faktoren gesteuert, zu welchen neben verschiedenen klimatisch-hydrologischen Parametern beispielsweise auch Nährstoffverfügbarkeit, Fruktifikationszyklen, Sturmereignisse, Schädlingsbefall oder forstwirtschaftliche Maßnahmen wie Durchforstungen zählen. Um die Bedeutung der verschiedenen in diesem Projekt betrachteten klimatisch-hydrologischen Trockenstressfaktoren für das Wachstum von Buchen besser beurteilen zu können, bietet sich neben einer Einzelparameterbetrachtung das Erstellen von kombinierten Indizes an, welche durch ein multiples lineares Regressionsmodell aus den Einzelfaktoren gebildet werden. Wachstum geht dabei als abhängige Variable, die das Wachstum beeinflussenden klimatisch-hydrologischen Faktoren als Prädiktoren in das Modell ein. Dabei gehen nicht mehr als drei erklärende Variablen in das Modell ein, um eine Überanpassung zu vermeiden. Hierdurch wird ein Vergleich des Erklärungspotentials verschiedener Einflussfaktoren möglich, aber auch eine Einschätzung der Unabhängigkeit der verschiedenen Einflussgrößen untereinander. Werden diese kombinierten Indizes durch weitere, nicht die Trockenheit charakterisierende Einflussgrößen ergänzt, lassen sich Vitalitäts- und Wachstumsschwankungen besser erklären und die tatsächliche Bedeutung des Faktors Trockenstress in Relation zu anderen Faktoren genauer beurteilen.

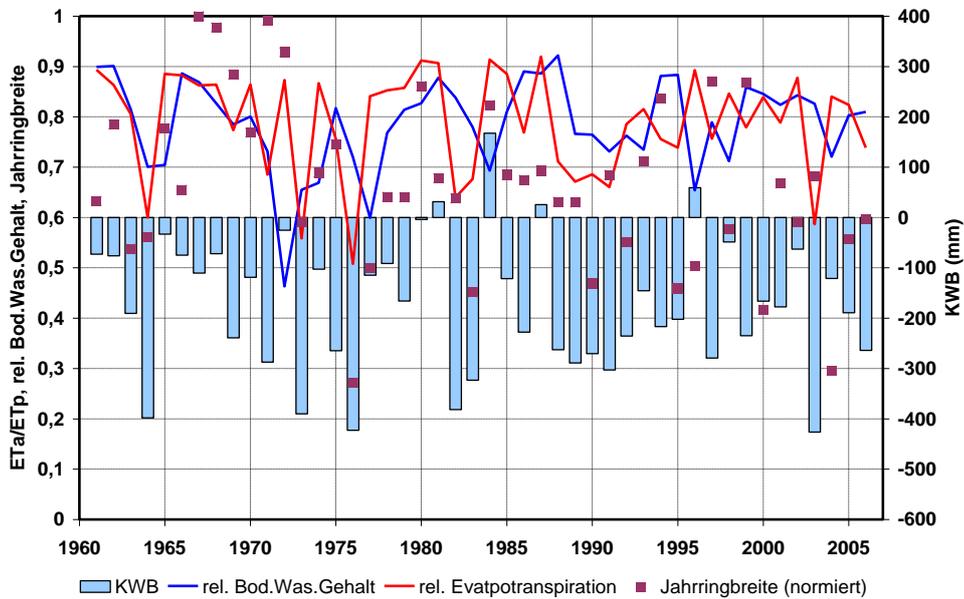
Als klimatisch-hydrologische Trockenstressindikatoren kommen dabei neben den direkten klimatischen Parametern Temperatur und Niederschlag verschiedene aus den Klima- und Standortverhältnissen abgeleitete Faktoren zum Einsatz:

- maximal verfügbare Bodenwasser entspricht dabei der nFK; Angaben beziehen sich in der Regel auf die Durchwurzelungstiefe oder den obersten Meter des Bodenkörpers
- Klimatische Wasserbilanz (KWB): Differenz aus Niederschlag und potentieller Verdunstung (Evapotranspiration); Maß für die potenzielle, niederschlagsbezogene Wasserverfügbarkeit
- Klimatische Wasserbilanz + nutzbare Feldkapazität (KWB+nFK): Ergänzung der niederschlagsbezogenen Wasserverfügbarkeit um die potenzielle Bodenwasserverfügbarkeit; bei Annahme der Aufsättigung des Bodens auf Feldkapazität zu Beginn der Vegetationsperiode erhöht sich während dieser die Wasserverfügbarkeit um den Betrag der nFK (SPELLMANN et al. 2007)
- Potenzielle Evapotranspiration (ETp): bei uneingeschränkter Wasserverfügbarkeit potenziell mögliche Verdunstungsmenge
- Reale Evapotranspiration (ETa): aufgrund der Umgebungsbedingungen resultierende, tatsächliche Verdunstungsmenge
- Relative Evapotranspiration (ETa/ETp): Anteil der realen an der potenziell möglichen Evapotranspiration
- Relativer Bodenwassergehalt: Anteil der realen an der potentiell möglichen Bodenwassermenge
- Relativer Gehalt pflanzenverfügbaren Bodenwassers (GRANIER et al. 1999): Anteil des aktuellen am maximal möglichen pflanzenverfügbaren Bodenwasser; das maximal verfügbare Bodenwasser entspricht dabei der nFK; Angaben beziehen sich in der Regel auf die Durchwurzelungstiefe oder den obersten Meter des Bodenkörpers.

### **3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION: WACHSTUMS- VERHALTEN DER BUCHE BEI WITTERUNGS- EXTREMEN**

In Abb. 2 ist für die Intensivmonitoringfläche Zierenberg der Verlauf der Jahrringbreite verschiedenen klimatisch-hydrologischen Faktoren für den Zeitraum 1961-2006 gegenübergestellt. Dargestellt sind die KWB und die relative Evapotranspiration während der Vegetationsperiode sowie der rel. Bodenwassergehalt am 1. April. Extremjahre mit dem geringsten Zuwachs in diesem Zeitraum (unter 50 % des Maximums) sind 1976, 1983, 1990, 1995, 2000 und 2004, wobei die Jahre 1976 und 2004 die mit Abstand niedrigsten Jahrringbreiten aufweisen. Für die Jahre 1976, 1983 und 1990 weisen die klimatisch-hydrologischen Indikatoren, insbesondere bei kombinierter Betrachtung, auf verhältnismäßig trockene Bedingungen hin und bestätigen so eine mögliche trockenstressbedingte Verminderung des Durchmesserwachstums der Buchen. Bei der

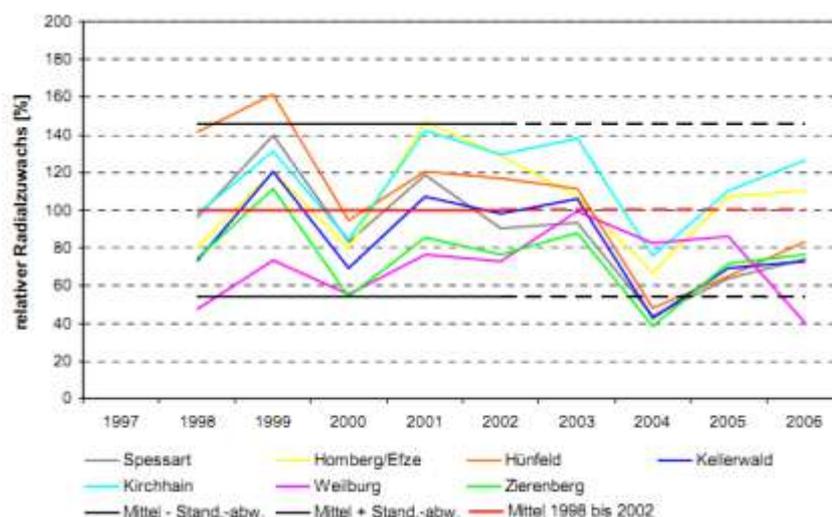
KWB ist zu beobachten, dass diese nicht nur in den Jahren mit verringertem Zuwachs, sondern oft bereits im Jahr zuvor ein deutliches Defizit aufweist.



**Abb. 2:** Klimatische Wasserbilanz (KWB, Vegetationsperiode), relativer Bodenwassergehalt (1. April), relative Evapotranspiration ( $ET_a/ET_p$ , Vegetationsperiode) und Jahrringbreite (normiert) der Buche an der Intensivmonitoringfläche Zierenberg 1961-2006.

Bei den jüngsten zuwachsschwachen Jahren 1995, 2000 und 2004 ist ein klarer Zusammenhang mit den klimatisch-hydrologischen Trockenstressindikatoren nicht zu erkennen. Besonders auffällig ist dabei das Jahr 2004. Obwohl der Zuwachs der zweitniedrigste während des gesamten Untersuchungszeitraums war, lassen die klimatisch-hydrologischen Indikatoren eine gute Wasserversorgung erkennen. Gleichzeitig weisen die KWB und die relative Evapotranspiration jedoch das Vorjahr 2003 als extremes Trockenjahr aus, ohne dass dies mit einer geringen Zuwachsleistung der Buchen einhergeht.

Ein Vergleich mit den Jahrringanalysen der anderen hessischen Buchen-Intensivmonitoringflächen zeigt, dass ein normaler Zuwachs 2003 gefolgt von einem deutlichen Wachstumseinbruch 2004 nicht nur in Zierenberg, sondern auch an fast allen anderen Standorten zu verzeichnen war (Abb. 3, EICHHORN et al. 2008). Reaktionsmuster der Vitalitätsindikatoren Blattverlust und Triebblängenwachstum lassen Stressreaktionen an den hessischen Buchen-Intensivmonitoringflächen und Buchen-BZE II-Standorten ebenfalls nicht 2003, sondern erst 2004 erkennen, wobei diese sich sogar über mehrere Folgejahre fortsetzen (EICHHORN et al. 2008).



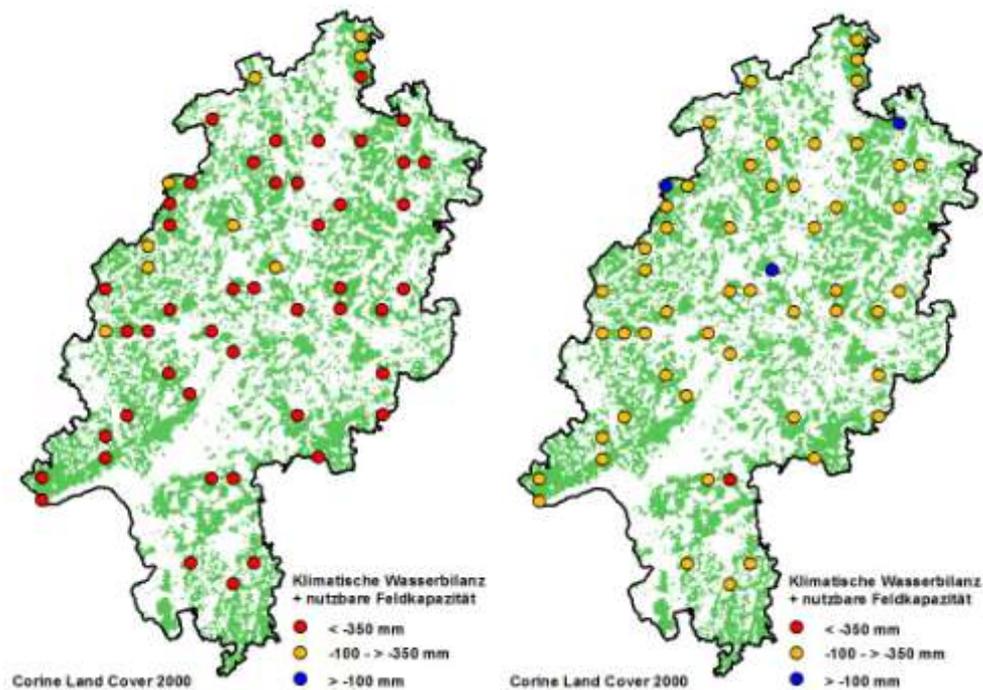
**Abb. 3:** Relativer Radialzuwachs der Buchen an hessischen Intensivmonitoringflächen für die Jahre 1998 bis 2006 (EICHORN et al. 2008).

Ähnlich wie die Vitalitäts- und Wachstumsreaktionen finden auch die für Zierenberg beschriebenen klimatisch-hydrologischen Verhältnisse der Jahre 2003 und 2004 auf den hessischen Buchen-BZE II-Standorten ihre Bestätigung. Die KWB+nFK (Abb. 4) als Maß für die Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode weist für das Jahr 2003 auf über 80 % der Standorte ein sehr starkes Defizit von unter -350 mm auf. Lediglich in den nordwestlichen Landesteilen weisen einige Standorte ein im langjährigen Vergleich als durchschnittlich einzustufendes Defizit von -100 bis > -350 mm auf. 2004 hingegen liegen bei über 90 % der Standorte die Werte zwischen -100 und > -350 mm, an drei Standorten werden sogar Werte von über -100 mm erreicht und nur ein Standort in Südhessen weist ein Defizit von unter -350 mm auf.

## BZE II Hessen Buche

Vegetationsperiode 2003

Vegetationsperiode 2004



**Abb. 4:** Trockenstressindikator KWB+nFK (Klimatische Wasserbilanz + nutzbare Feldkapazität) während der Vegetationsperioden 2003 und 2004 an hessischen Buchen-BZE II-Standorten.

Der Indikator relative Evapotranspiration bestätigt diese Verhältnisse (Tab. 1). Während der Vegetationsperiode 2003 liegen die Werte mehrheitlich bei unter 60 %. Im Jahr 2004 hingegen wird diese Grenze nur an 3 % der Standorte unterschritten und in 64 % der Fälle werden sogar Werte oberhalb von 80 % erreicht, welche im Vorjahr gar nicht auftreten. Dabei zeigt sich, ausgeprägter als bei der KWB+nFK, ein Nord-Süd-Gefälle mit den trockeneren Verhältnissen im Süden des Landes.

Ein abweichendes Bild ergibt sich dagegen hinsichtlich des relativen Bodenwassergehaltes am 1. April (Tab. 2). Während 2003 bei nur 11 % der Standorte Werte von unter 80 % erreicht werden, gilt dies 2004 für die Hälfte aller Standorte. Insbesondere in Südhessen könnte diese unvollständige Füllung des Bodenwasserspeichers angesichts der generell trockeneren Verhältnisse und der bereits Anfang April einsetzenden Vegetationsperiode zu einer Reduktion des Wachstums beitragen. Allerdings ist zu beachten, dass hier nur der aktuelle Zustand eines einzelnen Tages wiedergegeben ist und dem relativen Bodenwassergehalt im Vorfeld bzw. zu Beginn der Vegetationsperiode

angesichts der relativ hohen Niederschläge während der Vegetationsperiode 2004 eine eher untergeordnete Rolle zukommt. Richtet man den Blick wieder auf das Fallbeispiel der in Nordhessen liegenden Intensivmonitoringfläche Zierenberg, so ist hier zu Beginn der Vegetationsperiode 2004 kein geringerer relativer Bodenwassergehalt als 2003 festzustellen und trotzdem ist der Zuwachs der Buchen im Vergleich zum Vorjahr deutlich reduziert.

**Tab. 1:** Häufigkeitsverteilung verschiedener Größenklassen des Trockenstressindikators relative Evapotranspiration an Buchen-BZE II-Standorten in Hessen in den Vegetationsperioden der Jahre 2003 und 2004.

mittl. rel. Evapotranspiration (%)	Häufigkeit an Buchen-BZE II-Standorten Hessen	
	Vegetationsperiode 2003	Vegetationsperiode 2004
< 40	-	-
40 – < 60	55 %	3 %
60 – < 80	45 %	33 %
>= 80	-	64 %

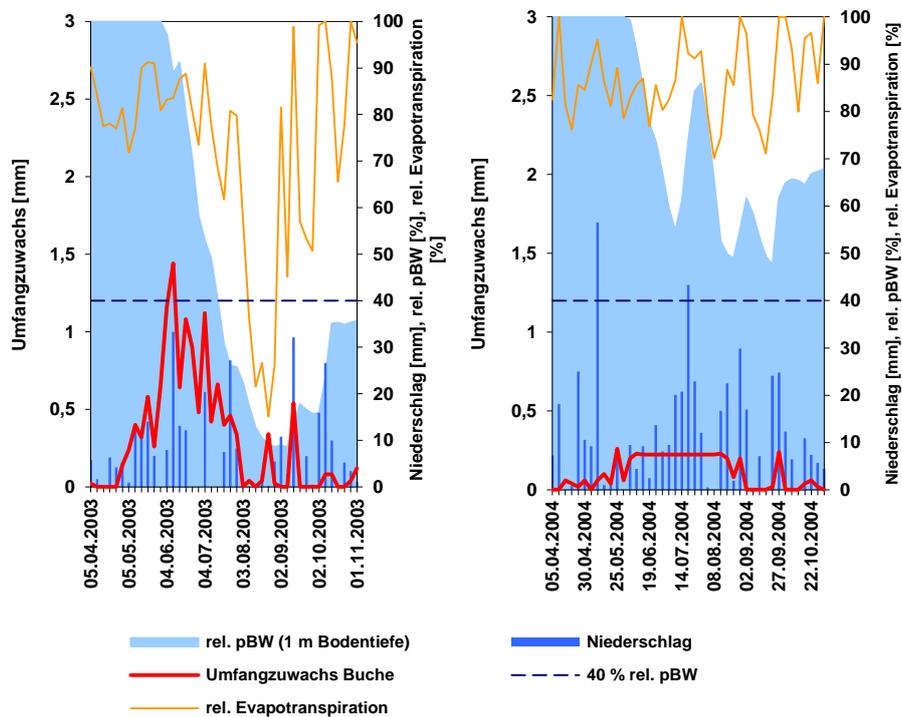
**Tab. 2:** Häufigkeitsverteilung verschiedener Größenklassen des Trockenstressindikators relativer Bodenwassergehalt an Buchen-BZE II-Standorten in Hessen am 1. April der Jahre 2003 und 2004.

rel. Bodenwassergehalt (%)	Häufigkeit an Buchen-BZE II-Standorten Hessen	
	1. April 2003	1. April 2004
< 50	-	2 %
50 – < 70	4 %	28 %
70 – < 80	7 %	20 %
80 – < 90	20 %	25 %
>= 90	69 %	25 %

Übereinstimmend bestätigen die Daten der BZE II-Standorte und der Intensivmonitoringflächen somit sehr trockene klimatisch-hydrologische Bedingungen 2003 und durchschnittlich feuchte Verhältnisse 2004, während im Gegensatz dazu die Wachstums- und Vitalitätsindikatoren nicht im Trockenjahr 2003, sondern erst 2004 und später sichtbare Stressreaktionen aufweisen.

Erklärungen für diesen scheinbaren Widerspruch liefert eine zeitlich höher aufgelöste Betrachtung des Durchmesserwachstums der Buchen im Vergleich mit verschiedenen klimatisch-hydrologischen Indikatoren. Für die Intensivmonitoringfläche Zierenberg ist in Abbildung 5 dieser Vergleich für die Monate April bis Oktober der Jahre 2003 und 2004 in 5-tägiger Auflösung dargestellt. Dem mittleren absoluten Umfangzuwachs der Buche sind die Niederschlagssumme, der relative Anteil pflanzenverfügbaren Bodenwassers (bis 1 m Bodentiefe) sowie die relative Evapotranspiration gegenübergestellt. Die Angaben zu Umfangzuwachs und Niederschlag beruhen dabei auf Messwerten, die übrigen Parameter

auf Ergebnissen der Wasserhaushaltsmodellierung. Zur Orientierung ist der Wert von 40 % pflanzenverfügbaren Bodenwassers markiert. Nach Untersuchungen von GRANIER et al. (1999) für Eiche und Fichte kommt es bei Unterschreitung dieses Grenzwertes zur Einschränkung der Transpiration infolge des Schließens der Stomata. Für die Buche wird eine entsprechende Stomataregulation als sehr sensibel und effektiv beschrieben (BACKES 1996). ANDERS et al. (2002) haben u. a. für die Buche bei Unterschreiten des relativen pflanzenverfügbaren Wassergehaltes von 60 % eine Verlangsamung des Durchmesserwachstums und bei Unterschreiten eines Wertes von 40 % ein Erliegen des Wachstums festgestellt.



**Abb. 5:** Niederschlag, rel. Gehalt pflanzenverfügbaren Bodenwassers (rel. pBW) und rel. Evapotranspiration als Kriterien der Wasserversorgung sowie der Umfangzuwachs von Buchen für die Intensivmonitoringfläche Zierenberg 2003 und 2004 (jeweils April bis Oktober, Pentadenmittelwerte und -summen).

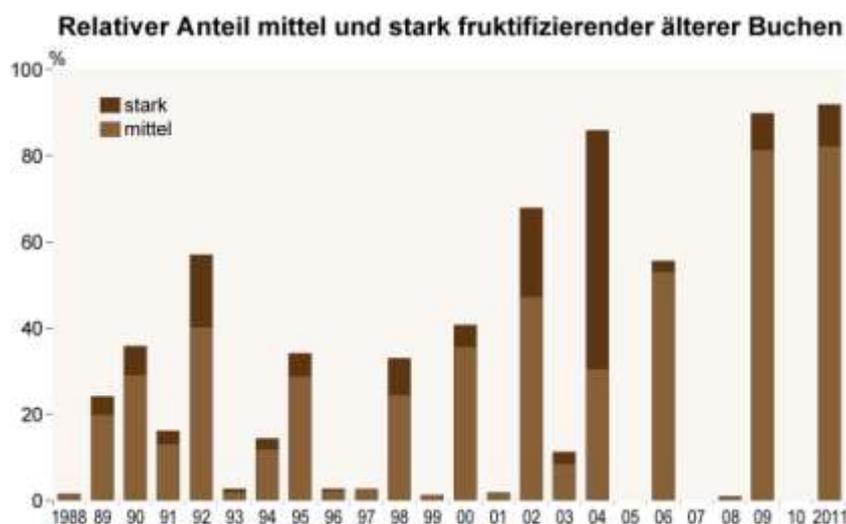
Die Vegetationsperiode 2003 weist mit 2124 Gradtagen (Kd) die höchste Temperatursumme (Summe der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur) und mit 250 mm die zweitniedrigste Niederschlagssumme zwischen 1990 und 2009 auf, was zu einer starken Austrocknung des Bodens mit einem durchschnittlichen relativen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt von nur 49 % führte. Die Gründe für ein Ausbleiben eines deutlichen Zuwachseinbruchs zeigen sich bei genauerer Betrachtung der Vegetationsperiode. Bis Ende Juli ergeben sich im Vergleich zu 2004 deutlich höhere Zuwächse. Ein Wachstumseinbruch ist erstmals um den 20. Juli deutlich zu erkennen, obwohl von Mitte Juni bis Mitte Juli nur

wenig Niederschlag zu verzeichnen ist. Erst nachdem der relative pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt unter einen Wert von etwa 40 % fällt, treten Wachstumsunterbrechungen auf. Wachstum erfolgt von da an nur noch vorübergehend und in direkter Verbindung mit Niederschlagsereignissen. Die relative Evapotranspiration fällt genau in solchen Phasen der Wachstumsunterbrechung auf unter 60 % und eignet sich daher ebenfalls gut als Indikator für Wassermangel.

Das Umfangwachstum bei Buchen erfolgt üblicherweise zu einem großen Teil in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode bis Ende Juli. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Wasserverfügbarkeit jedoch ausreichend und der Zuwachs konnte dadurch 2003 ein normales Niveau mit einem überdurchschnittlich hohen Maximalzuwachs (Wachstumskulmination) erreichen. Nach Beobachtungen von LISTING (2011) an hessischen Buchenwaldstandorten wird die Wachstumskulmination im Mittel bereits in der ersten Juniwoche erreicht und dessen Ausmaß stellt neben der Wuchsdauer eine wichtige Einflussgröße für den Gesamtjahreszuwachs dar. Dagegen wird aufgrund der deutlich geringeren Zuwachsleistung in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode 2004 in diesem Jahr nur etwa ein Drittel des Stammumfangzuwachses des Vorjahres erreicht, obwohl bei einer deutlich höheren Niederschlagssumme der relative pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt und die relative Evapotranspiration zu keinem Zeitpunkt ein als kritisch angenommenes Niveau unterschreiten. Ein mögliches Absterben der Feinwurzeln (LEUSCHNER & HERTEL 2003) oder eine Schädigung der Pflanzengefäße infolge des Wasserdefizits im Spätsommer 2003 könnte eventuell zu einem reduzierten Wachstum im Jahr 2004 beigetragen haben. Eine statistische Analyse für die Jahre 1962-2006 ergab jedoch keinerlei Zusammenhang zwischen Wachstumseinbrüchen und Trockenphasen im Spätsommer der Vorjahre.

Abgesehen von möglichen Trockenstressreaktionen ist jedoch die starke Fruktifikation der Buchen im Jahr 2004 als bedeutende Ursache für den deutlichen Umfangzuwachsrückgang zu nennen. Bei einer im Vergleich zum Vorjahr unveränderten Photosyntheseleistung verschob sich die Allokation der Photosyntheseprodukte wesentlich vom Holzzuwachs hin zu den Fruchtkompartimenten (vgl. EICHHORN et al. 2008).

Ein Vergleich der Jahre 1988 bis 2011 für die hessischen Buchen-BZE II-Standorte (Abb. 6, PAAR et al. 2011a) lässt dabei das Jahr 2004 als besonders extremes Mastjahr erkennen. So zeigt sich nicht nur bei ca. 90 % aller älteren Buchen eine mindestens mittelstark ausgeprägte Fruktifikation, wie sie auch in 2009 und 2011 zu beobachten ist, sondern bei über der Hälfte der älteren Buchen ist sogar eine starke Fruktifikation zu verzeichnen. Auffällig ist darüber hinaus, dass auch in den Jahren 1995 und 2000, für welche aus der Jahrringanalyse der Intensivmonitoringfläche Zierenberg ein sehr geringes Umfangwachstum hervorgeht, mit über 30 und ca. 40 % verhältnismäßig viele ältere Buchen mittel bis stark fruktifizierten. Nach PAAR et al. (2011b) sind aufgrund der Eckernanzahl gemäß der Definition von BURSCHEL et al. (1964) sowohl die Jahre 1995 und 2000, als auch das Jahr 2004 auf hessischen Intensivmonitoringflächen als Vollmastjahre einzustufen.

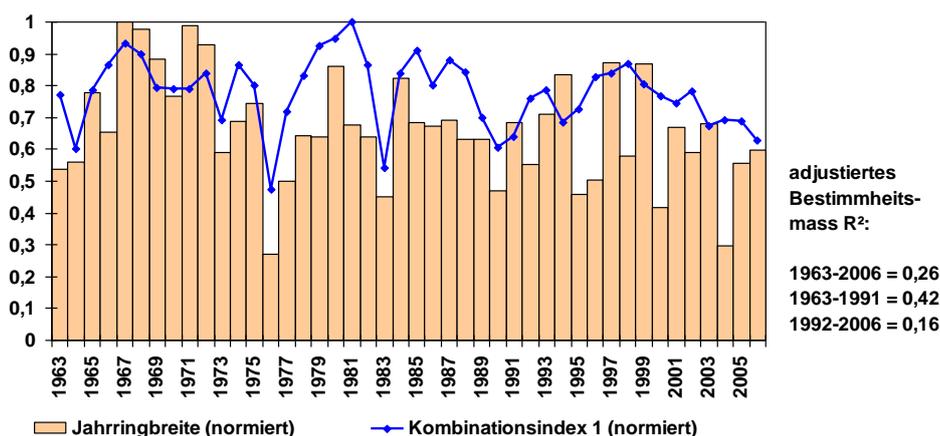


**Abb. 6:** Relativer Anteil mittel und stark fruktifizierender älterer Buchen an hessischen BZE II-Standorten zwischen 1988 und 2011 (aus PAAR et al. 2011a).

Das Fallbeispiel Zierenberg macht deutlich, dass sich klimatisch-hydrologische Indikatoren für Trockenheit über einen Vergleich mit Zeitreihen des Umfangzuwachses nicht ohne weiteres in ihrer Wirksamkeit als Trockenstressindikatoren definieren und quantifizieren lassen. In der Regel besteht ein komplexes Wirkungsgeflecht sich wechselseitig beeinflussender Faktoren, welches auch z.B. die Fruktifikation bzw. die diese beeinflussenden Witterungsbedingungen mit einschließt, obwohl diese allenfalls bedingt mit der Wasserverfügbarkeit in Verbindung stehen. Dennoch ist die Einbeziehung letzterer wichtig, um eine Einschätzung der Bedeutsamkeit trockenstressrelevanter klimatisch-hydrologischer Indikatoren auf das Wuchsverhalten und die Wachstumsleistung zu ermöglichen. Daher werden zur weiteren Auswertung kombinierte Indizes verwendet, welche mittels multipler linearer Regression aus drei klimatisch-hydrologischen Faktoren zusammengesetzt sind. In Übereinstimmung mit den Beobachtungen von ZWEIFEL et al. (2009) zeigt sich, dass Analysen auf einer zeitlich höher aufgelösten Betrachtungsebene oft stärkere Zusammenhänge zu jährlichen Zuwachsbeträgen erkennen lassen als solche, die auf aggregierten Jahreswerten beruhen. Gleichzeitig wirken sich mehrere relativ trockene Jahre in Folge oft stärker auf Vitalität und Wachstum der Bäume aus als einzelne Extremjahre, weshalb auch die Aggregation bestimmter Faktoren zu mehrjährigen Mittelwerten oder Summen sinnvoll ist. Außerdem können die Reaktionen der Bäume auf Stressbedingungen zeitlich verzögert und über mehrere Jahre andauernd auftreten (UTSCHIG et al. 2004; EICHHORN et al. 2008), weshalb auch die Einbeziehung klimatisch-hydrologischer Indikatoren der Vorjahre Berücksichtigung finden muss. Auf Basis dieser grundlegenden Überlegungen und der Beobachtungen an den Intensivmonitoringflächen wurden verschiedene Indikatoren und Indikatorkombinationen verglichen. Für das Fallbeispiel Zierenberg erwies sich dabei der Kombinationsindex 1 mit folgenden klimatisch-hydrologischen Indikatoren zur Erklärung der Variabilität der Jahrringbreite für den Zeitraum 1963 bis 2006 als gut geeignet (Abb. 7):

- Faktor „Trockentage Fröhsommer“:  $\sum$  Tage zwischen April und Juli mit Gehalt pflanzenverfügbaren Bodenwassers unter 40 % und ohne Niederschlag
- Faktor „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“:  $\sum$  KWB der Vegetationsperiode des aktuellen und des Vorjahres
- Faktor „Temp.-Summe Vorvorjahr“:  $\sum$  der Tagesmitteltemperaturen der Vegetationsperiode zwei Jahre zuvor.

Der Faktor „Trockentage Fröhsommer“ leitet sich aus der Beobachtung ab, dass das Wachstum bei Gehalten pflanzenverfügbaren Bodenwassers unter 40 % bei gleichzeitig fehlenden Niederschlägen stark eingeschränkt ist oder zum Stillstand kommt. Dabei ist die Anzahl der Tage zwischen April und Juli ausschlaggebend, da bei Buchen in diesem Zeitraum ein Großteil des jährlichen Durchmesserzuwachses erfolgt. Der Faktor „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“ kennzeichnet in Ergänzung zur Bodenwasserverfügbarkeit das aus dem Niederschlag der Vegetationsperiode stammende pflanzenverfügbare Wasser. Dabei wird neben dem aktuellen auch das Vorjahr betrachtet, da eine Periode mehrerer aufeinander folgender Jahre mit geringer Wasserzufuhr das Wachstum stärker beeinflusst als ein Einzeljahr.

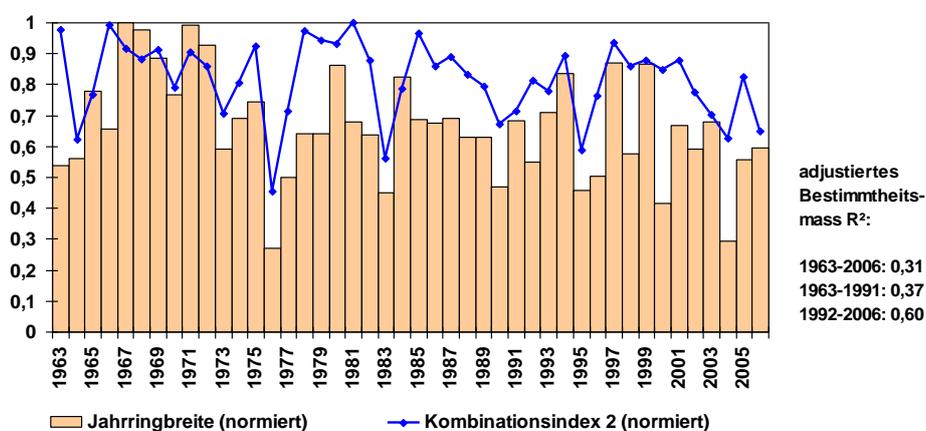


**Abb. 7:** Zeitreihe der Jahrringbreite und des aus drei hydrologisch-klimatischen Indikatoren erstellten Kombinationsindex 1 für die Intensivmonitoringfläche Zierenberg 1963 bis 2006. Der Kombinationsindex setzt sich aus den Faktoren „Trockentage Fröhsommer“, „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“ und „Temp.-Summe Vorvorjahr“ zusammen.

Der Faktor „Temp.-Summe Vorvorjahr“ geht in den Index nicht nur als Trockenstressindikator ein, sondern berücksichtigt die Auswirkungen der Fruktifikation auf das Zuwachsverhalten der Buchen. Die Verwendung der Temperatursumme der Vegetationsperiode zwei Jahre zuvor leitet sich aus Befunden von GRUBER (2003) ab, wonach das Auftreten der Fruktifikation bereits ein bis zwei Jahre zuvor festgelegt wird und hohe Temperaturen dabei eine wichtige Rolle spielen. Auf einen entsprechenden Kausalzusammenhang wird bereits in früheren Arbeiten von MATTHEWS (1955) und WACHTER (1964) hingewiesen.

Angesichts zahlreicher weiterer Faktoren, welche das Zuwachsverhalten beeinflussen können, liefert der zur Anwendung kommende kombinierte Index bei einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,26 ein gutes Erklärungspotential für die Durchmesserzuwachsschwankungen während der vergangenen 44 Jahre am Standort Zierenberg. Dabei werden insbesondere die Jahre mit sehr geringen Zuwächsen von weniger als 60 % des im betrachteten Zeitraum maximalen Zuwachses, wie 1964, 1976, 1983 oder 1990, gut durch den kombinierten Index repräsentiert. Der Faktor „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“ ist dabei separat betrachtet der besterklärende Teilindex, aber die „Temp.-Summe Vorvorjahr“ als Indikator für Fruktifikation trägt zu einer deutlichen Steigerung der erklärten Varianz des kombinierten Index bei. Die Jahre stark verminderten Zuwachses nach 1990 werden jedoch, ähnlich wie bei den separat dargestellten klimatisch-hydrologischen Einzelindikatoren in Abbildung 2, trotz der Hinzunahme eines die Fruktifikation charakterisierenden Indikators durch den kombinierten Index nicht gut beschrieben. Beispielhaft hierfür steht das Jahr 2004, für welches der Durchmesserzuwachsrückgang maßgeblich der starken Fruktifikation zuzuschreiben ist, was sich jedoch in keiner Weise im Verlauf des Kombinationsindex widerspiegelt. Betrachtet man die ersten 29 Jahre 1963-1991 und die letzten 15 Jahre 1992-2006 getrennt voneinander, so bestätigt sich die gute Eignung des verwendeten Index für die erste Periode, für welche ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0,42 erreicht wird, während die erklärte Varianz für die letzten 15 Jahre mit 0,16 deutlich geringer ist.

Etwa seit Ende der 1980er Jahre hat sich das Fruktifikationsverhalten der Buche deutlich gewandelt. Traten Mastjahre zwischen 1839 und 1987 im Mittel alle 4,7 Jahre auf, hat sich diese Frequenz in den letzten Jahren stark erhöht und man kann nahezu einen zweijährigen Mastjahrrhythmus feststellen (PAAR et al. 2011b, Abb. 6). Parallel zu dem geänderten Fruktifikationsverhalten ist es in den vergangenen Jahren zu einem deutlichen Anstieg der Lufttemperatur während der Vegetationszeiten gekommen. Da die Lufttemperatur eine wichtige Steuergröße für das Auftreten der Fruktifikation ist, könnte dies möglicherweise zu einer Veränderung des Steuerungsverhaltens bei der Fruchtbildung geführt haben. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse für den leicht abgewandelten Kombinationsindex 2 dargestellt, der diesen Überlegungen Rechnung trägt. Anstelle des Faktors „Temp.-Summe Vorvorjahr“ wird hier der Faktor „warme Tage Vorjahr“ verwendet, welcher die Summe der Tage der Vegetationsperiode des Vorjahrs mit einer Tagessmitteltemperatur der Luft von mehr als 20°C enthält.



**Abb. 8:** Zeitreihe der Jahringbreite und des aus drei hydrologisch-klimatischen Indikatoren erstellten Kombinationsindex 2 für die Intensivmonitoringfläche Zierenberg 1963 bis 2006. Der Kombinationsindex setzt sich aus den Faktoren „Trockentage Fröhsummer“, „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“ und „Warme Tage Vorjahr“ zusammen.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß für die Gesamtzeitreihe erhöht sich hierdurch auf 0,31 und neben den Wachstumseinbrüchen in den frühen Jahren werden nun auch die der späteren Jahre wie 1995 oder 2004 besser wiedergegeben. Betrachtet man auch für diesen Kombinationsindex die ersten 29 und die letzten 15 Jahre separat, so liefert er für die ersten drei Jahrzehnte ein etwas geringeres, aber ungefähr mit Kombinationsindex 1 vergleichbares Erklärungspotential, während sich dieses für die Jahre 1992-2006 mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,60 deutlich verbessert. Dabei tritt in den letzten 15 Jahren der Faktor „warme Tage Vorjahr“ als dominierender Faktor innerhalb des Kombinationsindex in Erscheinung und verdrängt die Trockenstressindikatoren „Trockentage Fröhsummer“ und „KWB VZ (Jahr+Vorjahr)“ hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Variabilität des Durchmesserzuwachses der Buchen. Die Zunahme der Mastjahre in den vergangenen Jahren könnte demnach das Zuwachsverhalten der Buchen so stark beeinflusst haben, dass trockenstressbedingte Wachstumsreaktionen vollständig überlagert werden und somit die Wirksamkeit des Durchmesserzuwachses als Trockenstressindikator in Relation zu früheren Jahrzehnten an Bedeutung verliert.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Um Ursache und Wirkung von Trockenstress bei Buchen genauer zu verstehen und das klimawandelbedingte zukünftige Risikopotential besser abschätzen zu können, wurden klimatisch-hydrologische Trockenheitsindikatoren für den Zeitraum 1961-2006 Wachstumsindikatoren der Buche gegenübergestellt. Untersucht wurden hierfür 55 Buchenstandorte der BZE II sowie 7 Buchen-Intensivmonitoringflächen in Hessen.

Am Beispiel der in Nordhessen liegenden Intensivmonitoringfläche Zierenberg lässt sich erkennen, dass Jahre mit geringem Durchmesserzuwachs z. T. gut mit den klimatisch-hydrologischen Trockenstressindikatoren übereinstimmen. Insbesondere seit Anfang der 1990er Jahre ist ein solcher Zusammenhang jedoch nicht mehr eindeutig abzuleiten. Ein Vergleich der Jahre 2003 und 2004 verdeutlicht dies. Alle klimatisch-hydrologischen Indikatoren sowohl an den Intensivmonitoringflächen, als auch an den BZE II-Standorten weisen das Jahr 2003 als extremes Trockenjahr aus, während 2004 durchschnittliche Verhältnisse herrschten. Sämtliche Vitalitäts- und Wachstumsindikatoren der Buchen zeigen hingegen nicht 2003, sondern 2004 extremen Stress an. An zeitlich hoch aufgelösten Zuwachsdaten für Zierenberg zeigt sich, dass ein deutlicher Zuwachsrückgang im Trockenjahr 2003 nicht eintrat, da wachstumsbegrenzende Trockenstressverhältnisse erst in der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode auftraten, als der Durchmesserzuwachs der Buchen zum überwiegenden Teil bereits erfolgt war. Die Ergebnisse für Zierenberg bestätigen dabei den in der Literatur zu findenden Grenzwert von 40 % des pflanzenverfügbaren Bodenwassers, bei dessen Unterschreiten ein Einstellen des Stammwachstums erfolgt. Bezüglich der relativen Evapotranspiration führt das Unterschreiten eines Schwellenwertes von 60 % zu einer Unterbrechung des Stammzuwachses. Das geringe Durchmesserwachstum der Buchen im Folgejahr 2004 ist nicht direkt auf Trockenstress zurückzuführen und resultiert im Wesentlichen aus der in diesem Jahr extrem stark ausgeprägten Fruktifikation.

Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge, welche das Wachstum der Buchen steuern, empfiehlt sich die Anwendung kombinierter klimatisch-hydrologischer Indizes zur Beurteilung des Trockenstressrisikos. Die bis zu drei enthaltenen Einzelindikatoren berücksichtigen dabei sowohl die auf der Ebene von Teilzeiträumen innerhalb der Vegetationsperiode, als auch über mehrere Jahre andauernd oder verzögert zu beobachtenden Wirkungszusammenhänge. Nach diesen Vorgaben wurde für Zierenberg ein Kombinationsindex vorgestellt, welcher für den Zeitraum 1963 bis 2006 mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,37 ein gutes Erklärungspotential für die Schwankungen der Jahrringbreite liefert. Als Faktoren gehen dabei die Frühsommertage mit Gehalten pflanzenverfügbaren Bodenwassers von unter 40 % bei gleichzeitig fehlendem Niederschlag, die Klimatische Wasserbilanz des Jahres und Vorjahres sowie die Tage des Vorsommers mit einer mittleren Lufttemperatur über 20°C ein. Die ersten beiden Faktoren kennzeichnen Trockenstressbedingungen. Der dritte Faktor kennzeichnet dagegen das ebenfalls den Zuwachs beeinflussende Auftreten starker Fruktifikation und erklärt insbesondere die mit Trockenstress kaum korrelierten Zuwachsschwankungen seit Anfang der 1990er Jahre. Die Zunahme der Häufigkeit von Mastjahren seit Anfang der 1990er Jahre führt dabei zur Überlagerung trockenstressbedingter mit fruktifikationsbedingten Wachstumsschwankungen.

## 5 LITERATUR

- ANDERS, S.; BECK, W.; BOLTE, A.; HOFMANN, G.; JENSEN, M.; KRAKAU, U.; MÜLLER, J. (2002): Ökologie und Vegetation der Wälder Norddeutschlands. Verlag Dr. Kessel, Oberwinter, 283 S.
- BACKES, K. (1996): Der Wasserhaushalt vier verschiedener Baumarten der Heide-Wald-Sukzession. Cuvillier Verlag, Göttingen, 134 S.
- BECK, W. (2010): Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland – waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. Deutsch. Verband Forstl. Forschungsanst., Sektion Ertragskunde: Beitr. z. Jahrestagung 2010, 56-65.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J.; KALBHENN, R. (1964): Die natürliche Verjüngung der Buche. Schriftenr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen 34, 1-186.
- EICHHORN, J.; DAMMANN, I.; SCHÖNFELDER, E.; ALBRECHT, M.; BECK, W.; PAAR, U. (2008): Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003. In: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beitr. NW-FVA 3, 109-134.
- GRANIER, A.; BRÉDA, N.; BIRON, P.; VILETTE, S. (1999): A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecol. Model. 116, 269-283.
- GRUBER, F. (2003): Steuerung und Vorhersage der Fruchtbildung bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) durch die Witterung. 6 Beiträge. Schriften Forstl. Fak. Uni Göttingen u. Nieders. Forstl. Ver. 136, Göttingen, 141 S.
- HANSEN, J.H. (2006): Der WaldPlaner – Ein System zur Entscheidungsunterstützung in einer nachhaltigen Forstwirtschaft. Deutsch. Verband Forstl. Forschungsanst. - Sektion Forstl. Biometrie u. Informatik, Trippstadt, 112-119.
- HANSEN, J.H. (2012): Modellbasierte Entscheidungsunterstützung für den Forstbetrieb. Optimierung kurzfristiger Nutzungsoptionen und mittelfristiger Strategien unter Verwendung metaheuristischer Verfahren und parallelen Rechnens. Cuvillier Verlag, Göttingen, 216 S.
- LEUSCHNER, C.; 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.
- LISTING, M. (2011): Kurzfristige Durchmesserchwankungen bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) und deren Beziehung zu Witterung und Bodenwasserhaushalt. Masterarbeit, Fakultät Forstwissensch. u. Waldökol. Georg-August-Univ. Göttingen, 84 S. (unveröff.).
- MENZEL, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen - Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. Forstl. Forsch.ber. München 164. Forstwissensch. Fakultät Univ. München u. Bayer. Landesanst. Wald u. Forstwirtschaft.

- MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205-224.
- PAAR, U.; DAMMANN, I.; WEYMAR, J.; WENDLAND, J.; EICHHORN, J. (2011a): Waldzustandsbericht 2011 für Hessen. NW-FVA (Hrsg.), 31 S.
- PAAR, U.; GUCKLAND, A.; DAMMANN, I.; ALBRECHT, M.; EICHHORN, J. (2011b): Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ/Wald* 66/6, 26-29.
- RENNENBERG, H.; SEILER, W.; MATYSSEK, R.; GESSLER, A.; KREUZWIESER, J. (2004): Die Buche (*Fagus silvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 175, 210-224.
- RICHARDS, L.A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1 (5), 318-333.
- SCHULLA, J. (2012, Zugriff am 12.12.2012): Model Description WaSiM. Technical Report. 300 S.  
[http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim\\_2012\\_en.pdf](http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2012_en.pdf).
- SPELLMANN, H.; SUTMÖLLER, J.; MEESENBURG, H. (2007): Risikovorsorge bei Fichte im Zeichen des Klimawandels – Vorläufige Empfehlungen d. NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Wald* 62, 1246-1249.
- SUTMÖLLER, J.; SPELLMANN, H.; FIEBIGER, C.; ALBERT, M. (2008): Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. In: *Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beitr. d. NW-FVA* 3, 135-158.
- UMS (UMS GmbH) (2005, Zugriff am 12.12.2012): D4 Datenblatt.  
[http://www.ums-muc.de/fileadmin/produkt\\_downloads/Pflanzenmesstechnik/-D4\\_Datenblatt.pdf](http://www.ums-muc.de/fileadmin/produkt_downloads/Pflanzenmesstechnik/-D4_Datenblatt.pdf).
- UTSCHIG, H.; BACHMANN, M.; PRETZSCH, H. (2004): Das Trockenjahr 1976 bescherte langjährige Zuwachseinbrüche. *LWF aktuell* 43, 17-18.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44/5, 892-898.
- Von Wilpert, K. (1990): Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit von Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. Diss., Inst. Bodenkde u. Waldernährungslehre Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg
- WESSOLEK, G.; KRAUPENJOHANN, M.; RENGER, M. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. In: *Bodenökologie und Bodengene*, Bd. 40, Selbstverlag TU Berlin, 80 S.
- WILSON, B.F.; HOWARD, R.A. (1968): A computer model for cambial activity. *For. Sci.* 14, 77-90.
- ZWEIFEL, R.; ETZOLD, S.; EUGSTER, W. (2009): Einfluss des Klimas auf Zuwachs - Validierung mit EC-Messungen. *Schlussber. V1.15*, 1-21.

## **DANKSAGUNG**

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf ersten Auswertungen im Rahmen des Projektes „Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit hessischer Buchenwälder an veränderte Klimabedingungen. Analyse der Auswirkungen klimawandelbedingter Erhöhung des Trockenstressrisikos auf die Vitalität und Leistungsfähigkeit von Buchenwäldern“, welches dankenswerter Weise im Rahmen des Projektverbundes INKLIM-A durch das Fachzentrum Klimawandel am Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie zwischen 2009 und 2014 finanziell gefördert wird. Wir danken Dr. W. Beck, Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde, für die Bereitstellung von Jahrringchronologien der Intensivmonitoring-Standorte.