

- THOMPSON, M. C., M. BARUAH and E. R. CARR (2011): Seeing REDD+ as a project of environmental governance. *Environmental Science & Policy* **14**, 100–110.
- UNEP-WCMC (2007): Reducing Emissions from Deforestation: A Key Opportunity for Attaining Multiple Benefits. UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge (UK), 16p.
- VATN, A. and A. ANGELSEN (2009): Options for a national REDD+ architecture. *In*: ANGELSEN, A. with BROCKHAUS, M., KANNINEN, M., SILLS, E., SUNDERLIN, W. D. and WERTZ-KANOUNNIKOFF, S. (eds.): Realising REDD+ national strategy and policy options. CIFOR, Bogor (Indonesia), 57–74 p.
- WERTZ-KANOUNNIKOFF, S. and M. KONGPHAN-APIRAK (2009): Emerging REDD+ – a preliminary survey of demonstration and readiness activities. CIFOR, Bogor (Indonesia), 44 p.
- WIJEWARDANA, D. (2008): Criteria and indicators for sustainable forest management: The road travelled and the way ahead, *Ecological Indicators* **8**, 115–122

Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten

Technische Universität München, Fachgebiet für Ökoklimatologie

(Mit 7 Abbildungen und 1 Tabelle)

CHRISTIAN ZANG^{1,2,4}, ANDREAS ROTHE², WENDELIN WEIS³ und HANS PRETZSCH⁴

(Angenommen Mai 2011)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Trockenstress; Dendroökologie; Fichte; Kiefer; Tanne; Douglasie; Buche; Eiche.

Drought-stress; dendroecology; spruce; pine; fir; douglas-fir; beech; oak.

1. EINFÜHRUNG

Ansteigende Konzentrationen von Treibhausgasen in unserer Atmosphäre sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die wesentliche Ursache des gegenwärtigen Anstiegs der globalen Oberflächentemperatur. Dieser beläuft sich auf etwa 0,5 °C seit 1970 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATIC CHANGE (IPCC), 2007). Auch konservative Szenarien legen einen weiteren Anstieg der Temperaturen nahe, in Verbindung mit der Zunahme extremer Witterungsereignisse, wie etwa Trockenperioden (SALINGER, 2005; SCHÄR et al., 2004; STERL et al., 2008). In regionaler Projektion bedeutet das für Deutschland insbesondere

re höhere Sommertemperaturen, sowie gebietsweise niedrigere Niederschlagssummen in den Sommermonaten (JACOB et al., 2008).

Einen Vorgeschmack auf künftige Extremereignisse bot der „Jahrhundertsommer“ im Jahr 2003. Dieses Trockenjahr, das im Untersuchungsgebiet mit einer großflächigen Erschöpfung der Bodenwasservorräte – und damit verbundenen erheblichen Transpirationseinschränkungen der Waldbäume – einherging (RASPE et al., 2004), kann nach aktuellen Modellsimulationen als ein Prototyp für kommende Extrema gelten (BENISTON, 2004; SCHÄR und JENDRITZKY, 2004).

Neben der direkten Schädigung der Waldbäume durch verminderte Vitalität bis hin zum Absterben kam es auch zu erheblichen Sekundärschäden insbesondere durch rindenbrütende Borkenkäfer (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 2004). Der damit verbundene starke Anstieg der Zwangseinschläge in den Folgejahren sowie die trockenheitsbedingten Zuwachsverluste bedeuteten einen erheblichen finanziellen Schaden für die forstliche Praxis (BORCHERT, 2004).

Mit der prognostizierten Zunahme sommerlicher Trockenheit stellt sich die Frage nach der Zukunftseignung der heimischen Baumarten. Eine Reihe existierender Studien beschäftigt sich bereits mit dieser Problematik, dabei gewinnen biogeografische Ansätze wie vor allem Klimahüllen (KÖLLING, 2007) an Popularität. Hier dienen mittlere Klimabedingungen (meist Jahresmitteltem-

¹) Technische Universität München, Fachgebiet für Ökoklimatologie, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

²) Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät für Wald und Forstwirtschaft, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 3, D-85354 Freising.

³) Technische Universität München, Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

⁴) Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.

peratur und Jahresniederschlagssumme) in Verbindung mit der potentiellen oder aktuellen Verbreitung der jeweiligen Baumart zur Ableitung von Klimahüllen, die dann zur Beurteilung ihrer Anbaueignung herangezogen werden. Direkt für die Baumphysiologie haben jedoch auch Extrema, wie etwa Trockensommer, eine große Bedeutung (BOLTE et al., 2008).

Eine Vielzahl von Studien legt für die prognostizierten Klimabedingungen eine besondere Gefährdung der Fichte nahe (KÖLLING et al., 2009A, 2009B; LEITGEB und ENGLISCH, 2006; PROFFT et al., 2007), die als montane und subalpine Art weit außerhalb ihrer natürlichen Verbreitung angebaut wurde (SCHMIDT-VOGT, 1988). Eine aus praktischer Sicht zentrale Frage ist damit die nach der Grenze des Fichtenanbaus unter künftigen Klimabedingungen, und die nach möglichen Ersatzbaumarten. So eindeutig die Aufforderung zu einem Umbau von Fichtenreinbeständen in risikoärmere Mischbestände ist (z.B. KÖLLING et al., 2009B, 2009A; ROTHE und BORCHERT, 2003), so wenig sichere Aussagen zur Eignung der möglichen Ersatzbaumarten existieren. Die Buche etwa wird im Hinblick auf ihre Trockentoleranz kontrovers diskutiert (vergleiche RENNENBERG et al. (2004); HANKE (2005) aber auch AMMER et al. (2005)). Auch die Kiefer, die lange als unproblematische Baumart im Hinblick auf Trockenstress gewürdigt wurde (z.B. COTTA, 1849), stellt sich in einigen aktuellen Studien als anfällig gegenüber Trockenstress-induzierter Mortalität heraus (REBETEZ und DOBBERTIN, 2004; BIGLER et al., 2006; PICHLER und OBERHUBER, 2007).

Die teilweise widersprüchlichen Aussagen der unterschiedlichen Studien sind nicht zuletzt den unterschiedlichen methodischen Ansätzen geschuldet. Auf der einen Seite stehen sehr detaillierte Untersuchungen der physiologischen Vorgänge an wenigen Bäumen (oftmals Jungpflanzen). Damit einher geht das bekannte Problem der im Vergleich zum natürlichen System stark reduzierten Anzahl der Einflussfaktoren beim kontrollierten Experiment, das eine Übertragung der Ergebnisse auf Ökosystemskala erschwert (DIAMOND, 1983). Auf der anderen Seite stehen großflächige Ansätzen mit vielen tausenden – aber im Gegenzug oftmals mit nur einem Parameter (wie etwa Vorkommen/Nichtvorkommen) belegten – Datenpunkten.

Der Ansatz dieser Studie nimmt gewissermaßen eine Zwischenstellung zwischen den beiden o.g. Extremen ein. Der Grundgedanke dabei ist die Gewinnung einer breiten, nach einer einheitlichen Methode erfassten Datenbasis auf der Grundlage von Jahrringdaten. Bäume speichern in den Jahrringen Informationen über ihre Reaktionen auf Umweltbedingungen in der Vergangenheit. Besonders auf klimatisch limitierten Standorten zeigen die Jahrringbreiten einen engen Bezug zu den klimatischen Randbedingungen: auf trockenen Standorten bieten Jahrringe ein Archiv der Dürreereignisse, in kalten Regionen zeigen schmalere Jahrringe kältere Bedingungen während der Vegetationsperiode an (FRITTS, 1971). Umgekehrt können die Jahrringe damit auch als Archiv für die Reaktion eines Baumes auf die Umweltbedingungen interpretiert werden: als integrierender Proxy für die ökophysiologischen Prozesse, die

die Allokation von Kohlenstoff hin zum Sprosswachstum steuern (DOBBERTIN, 2005; SPIECKER, 2002).

Es existiert bereits eine Reihe von Studien, in denen Jahrring-Netzwerke zur Beurteilung der Klima-Sensitivität verschiedener Baumarten in verschiedenen Regionen der Erde herangezogen werden (z.B. HUANG et al., 2010; HOFGAARD et al., 1999; MIYAMOTO et al., 2010; BÜNTGEN et al., 2007). Ausgehend von der bereits erfolgreichen Anwendung von Beziehungen zwischen Klima und Baumwachstum zur Ableitung von Gefährdungspotentialen, geht der Ansatz dieser Studie noch einen Schritt weiter, und berücksichtigt neben den lokalen Klimabedingungen auch die Variationen in der Wasserverfügbarkeit, die durch den lokalen Standort hervorgerufen werden.

Im Folgenden werden folgende Fragen untersucht:

1. Wie unterscheiden sich die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Tanne, Buche und Eiche, sowie die Douglasie als mögliche Ersatzbaumart für die Fichte, im Hinblick auf Zuwachseinbrüche im Zusammenhang mit extremen Trockenereignissen?
2. Lassen sich für die einzelnen Arten klimatische oder standörtliche Muster des Zuwachseinbruches ableiten, die zur Ausscheidung von Schwellenwerten für die Anbaueignung geeignet sind?
3. Wie unterscheiden sich die einzelnen Baumarten im Hinblick auf ihre langfristige Limitierung durch klimatische Einflussfaktoren, vor allem durch Sommertemperatur und -niederschlag, und den Bodenwasserhaushalt?

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Jahrringdaten

Der verwendete Datensatz besteht aus 143 Jahrringchronologien von insgesamt 39 Waldstandorten in Bayern, 5 Standorten in Baden-Württemberg und 3 Standorten in Vorarlberg. Dafür wurden für jede Chronologie an je 12 bis 15 vitalen herrschenden Bäumen der Arten Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*, (Mirbel) Franco), Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus robur* L.) zwei Bohrkerne im 90° Winkel mit einem Zuwachsbohrer nach Preßler (Suunto, Finnland bzw. Mora Coretax, Haglöfs, Schweden) entnommen. Die Bohrkerne wurden mit einem Stemmeisen geglättet und die Jahrringbreiten mit dem System Lintab (Rinntech, Heidelberg) auf 1/100 mm genau gemessen. Die Synchronizität der Zuwachskurven eines Kollektivs wurde zunächst visuell am Bildschirm und anschließend statistisch mit dem Programm COFECHA (HOLMES, 1983; GRISSINO-MAYER, 2001) überprüft. Zur weiteren Auswertung wurden dann die sicher synchronisierten Einzelradien von je 10 Bäumen pro Kollektiv verwendet.

2.2 Standardisierung der Jahrringzeitreihen

Vor der Bildung von Bestandeschronologien wurden die Einzelserien zunächst trendbereinigt, um Signalanteile nichtklimatischen Ursprungs zu entfernen (FRITTS, 1976). Die Trendbereinigung erfolgte durch Anpassung kubischer Splines mit Frequenzschwellen von 50% bei

2/3 der Kurvenlängen (COOK und PETERS, 1981). Nach Division der gemessenen Jahrringbreiten durch den Erwartungswert bleibt ein einheitsloser Jahrringbreitenindex (*ring-width index*: RWI) übrig.

Ein zweiter Schritt umfasst die autoregressive Modellierung jeder Einzelserie, um jahrringübergreifende Auswirkungen von Signalen zu entfernen. Dazu wurde das Jahrringwachstum als AR(n)-Prozess aufgefasst (DITTMAR und ELLING, 1999), und die autoregressive Komponente mit einem autoregressiven Modell entfernt. Die Ordnung des Modells n wurde dabei mit Hilfe von Akaikes Informationskriterium festgelegt (VENABLES und RIPLEY, 2002), und betrug in der Regel 1 oder 2.

Zur Mittelung der Einzelserien wurde anschließend das Verfahren des beidseitig-gewichteten robusten Mittels (MOSTELLER und TUKEY, 1977) verwendet, das Ausreißer relativ zu ihrer Lage abgewichtet. Die so erhaltenen RWI-Chronologien sind stationär und varianzhomogen. Weiterhin erfüllen sie mit der Entfernung der autoregressiven Komponente nun die Anforderungen der OLS-Regression, wonach die einzelnen Beobachtungen (hier: Jahre), statistisch unabhängig voneinander sein sollten.

2.3 Instrumentelle Klimadaten

Klimadaten wurden in monatlicher und täglicher Auflösung vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen, im Umfang von insgesamt 64 Stationszeitreihen (davon 29 Klimastationen und 35 Niederschlagsstationen). Nach der Methode der inversen Distanzgewichtung wurden für jeden der 39 Waldstandorte Klimazeitreihen von umliegenden Klima- und Niederschlagsstationen interpoliert (SHEPARD, 1968). Für die hydrologische Modellierung wurden die Parameter Temperatur (Tagesminimum, Tagesmaximum), Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck und Niederschlagsmenge verwendet, für die dendroklimatologische Auswertung im klassischen Sinne die Parameter Temperatur (Monatsmittel) und Niederschlag (Monatssumme) (FRITTS, 1976).

2.4 Modellierung des Wasserhaushaltes

Der Wasserhaushalt an den Standorten wurde mit dem hydrologischen Modell Brook90-LWF modelliert; dabei handelt es sich um eine Modifikation des Modells Brook90 (FEDERER et al., 2003) durch HAMMEL und KENNEL (2001). Brook90 ist ein eindimensionales physikalisches Prozessmodell zur Beschreibung des vertikalen Wasseraustausches in der Bodenzone. Die abgebildeten Prozesse sind einerseits die Verdunstung als potentielle Evapotranspiration nach SHUTTLEWORTH und WALLACE (1985) und andererseits die Bodenwasserbewegung als Richards-Modell (JURY et al., 1991).

Wesentliche Änderungen des Originalmodells durch HAMMEL und KENNEL (2001) umfassen die Verwendung der Mualem-van Genuchten Parametrisierung der hydraulischen Funktionen (VAN GENUCHTEN, 1980), eine angepasste Zeitschrittsteuerung bei den Änderungsraten der hydraulischen Variablen und die Einführung einer zeitlich dynamischen Feinwurzelverteilung. Da im vorliegenden Ansatz nur einschichtige, truppweise gemischte Bestände homogener Altersstruktur ausge-

wählt wurden, wurde der Wasserhaushalt der Mischbestände als arithmetisches Mittel hypothetischer Reinbestände der angetroffenen Arten berechnet (HAMMEL und KENNEL, 2001).

2.5 Statistische Auswertung

2.5.1 Zuwachseinbruch im Zusammenhang mit Trockenjahren

Der Einfluss extremer Trockenheit auf den Radialzuwachs wurde anhand dreier *a priori* ausgewählter Trockenjahre untersucht: 1947, 1976 und 2003 (UTSCHIG et al., 2004; KAHLE, 1994). Um den kurzfristigen Zuwachseinbruch in den Trockenjahren und den längerfristigen Einbruch nach den Trockenjahren zu quantifizieren, wurden 2 Maße berechnet: kurzfristiger Einbruch (EK), und langfristiger Einbruch (EL), die jeweils aus RWI-Verhältnissen berechnet wurden. EK ist dabei als der Quotient zwischen dem Wachstum in einer fünfjährigen Referenzperiode unmittelbar vor den Trockenjahren und dem Zuwachs in den Trockenjahren definiert (FEKEDULEGN et al., 2003). EL berechnet sich dagegen als Quotient zwischen der gleichen fünfjährigen Referenzperiode und dem Wachstum in den Trockenjahren mit den beiden unmittelbar folgenden Jahren (cf. FEKEDULEGN et al., 2003). Damit beschreibt EL auch die Erholung des Kollektivs. In beiden Fällen wurde die drei o.g. Trockenjahre zur Berechnung des Zuwachseinbruches zusammengefasst. Ein Zuwachseinbruch in Prozent gegenüber den Referenzperioden kann dementsprechend über $(1/EK)*100$ bzw. $(1/EL)*100$ angegeben werden.

Der Zusammenhang zwischen Großklima (mittlerer Niederschlag in der Vegetationszeit, Mai bis August) und Einbruch im Radialzuwachs wurde mit generalisierten additiven Modellen analysiert (GAM; HASTIE und TIBSHIRANI, 1986). Bei GAM wird der Regressand gegen eine oder mehrere Funktionen (z.B. Glättungsfunktionen) eines oder mehrerer Prädiktoren regressiert. Hier wurden penalisierte *regression splines* verwendet, wobei die Anzahl der Freiheitsgrade durch generalisierte Kreuz-Validierung festgelegt wurde (WAHBA, 1975).

2.5.2 Klima-Wachstums-Beziehungen

Die Abhängigkeit des Baumwachstums von monatlichen Klimaparametern wurde mit *response functions* (FRITTS et al., 1971) ermittelt. Dabei werden Klimadaten in monatlicher Auflösung in einem multiplen Regressionsverfahren in Beziehung zu den jährlichen Zuwachsdaten gesetzt. Da Klimavariablen in der Regel ein hohes Maß an Multikollinearität aufweisen (CROPPER, 1984), führt eine einfache multiple Regression zu ungenauen und nicht robusten Schätzungen der Regressionskoeffizienten und zu einer unsicheren Ablehnung nicht-signifikanter Variablen.

Response functions führen daher die Regression der Zuwachszeitreihen auf die Hauptkomponenten der Klimavariablen aus, die per Definition orthogonale Vektoren, also statistisch unabhängig sind. Die durch OLS-Regression ermittelten Koeffizienten der *response functions* werden anschliessend in den ursprünglichen Parameterraum zurückgeführt. Da klassische Signifikanzmaße (z.B. t-Test) bei diesem Verfahren zu einer

Überschätzung der Signifikanz führen können (GUIOT, 1991), wird die Signifikanz der Parameter mittels *bootstrapping* abgeschätzt (EFRON und TIBSHIRANI, 1986). Ein Koeffizient wurde demnach als signifikant bei $\alpha = 0,05$ eingeschätzt, wenn der absolute Median von 1000 *bootstrap*-Wiederholungen größer war als die Hälfte der Differenz zwischen der 97,5%-Quantilgrenze und der 2,5%-Quantilgrenze (GUIOT, 1991).

Als Parameter der *response functions* wurden Monatswerte von Temperatur und Niederschlag vom Juni des Vorjahres bis zum September des aktuellen Jahres verwendet. Durch die Anwendung der *response functions* auf den kompletten Datensatz entsteht damit eine komplexe Ergebnismatrix (32 Parameter * 143 Chronologien). Zur erleichterten Interpretation der Resultate wird diese Ergebnismatrix einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen (HUANG et al., 2010). Diese Vorgehensweise erlaubt die einfache Identifikation der wesentlichen Quellen der Varianz innerhalb der Klima-Wachstums-Beziehungen. Zur Erleichterung der Interpretation der PCA werden die wichtigen Faktorenladungen auf den PCA-Achsen durch den *equilibrium circle* (LEGENDRE und LEGENDRE, 1998) von den weniger bedeutenden Faktorenladungen getrennt. Der *equilibrium*

circle ist ein Kreis mit Radius p/d (mit p gesamten und d reduzierten Dimensionen im Ordinationsraum), der in das Koordinatensystem eines Ordinationsgraphen eingezeichnet wird. Alle (auf ihre Standardabweichung normierten) Faktoren, die im Ordinationsgraphen außerhalb dieses Kreises zu liegen kommen, tragen mehr zur Bildung des dargestellten Ordinationsraums bei als dies bei einer gleichförmigen Verteilung der Faktoren auf alle Achsen des Ordinationsraumes der Fall wäre.

2.5.3 Zusammenhang zwischen Transpirationseinschränkung und Wachstum

Als Kenngröße des Wasserhaushaltes wird die Transpirationseinschränkung als Verhältnis zwischen potentieller und aktueller Transpiration berechnet. Dabei gibt ein Verhältnis größer 1 an, dass zum gegebenen Zeitpunkt den Bäumen weniger Wasser zur Verfügung stand, als aufgrund der klimatischen Rahmenbedingungen hätte verdunsten können. Der allgemeine Zusammenhang zwischen RWI und sommerlicher Transpirationseinschränkung wird mit linearen Regressionsmodellen untersucht (OLS-Regression).

Alle Berechnungen wurden mit R 2.10.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) durchgeführt. Die Bildung der

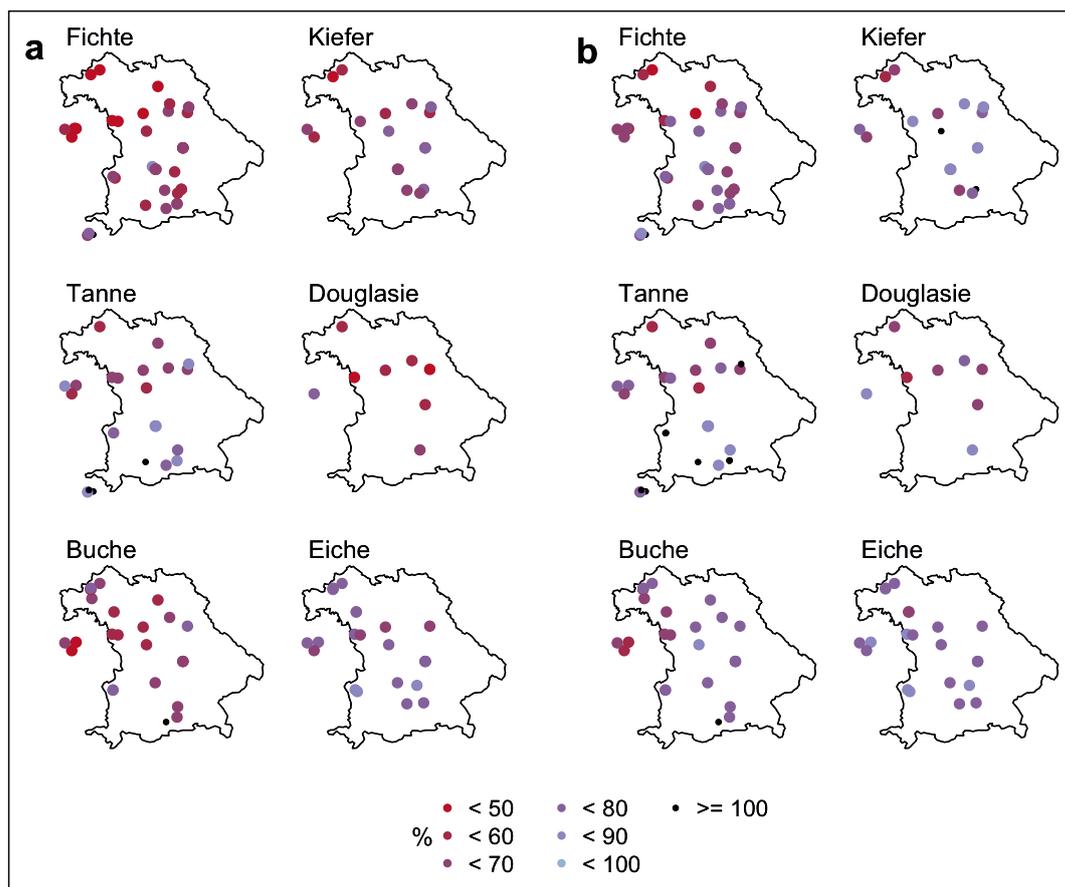


Abb. 1

Kartendarstellung des kurzfristigen (EK, Abb. 1a) und langfristigen (EL, Abb. 1b) Zuwachseinbruches nach Trockenjahren. Dargestellt ist der prozentuale Durchmesserzuwachs im Trockenjahr bzw. im Trockenjahr und den beiden Folgejahren im Vergleich zu Durchschnittsbedingungen.

Map view of short-term growth impact of drought events (EK, Fig. 1, panel a) and long-term impact (EL, Fig. 1, panel b). Shown is the percental increment growth in drought years (EK) and drought and consecutive years (EL), respectively, in comparison to average years.

Jahrringchronologien erfolgte mit dem Paket **dplR** (BUNN, 2008), die *response functions* wurden mit dem Paket **bootRes** (ZANG, 2009) berechnet. Für die Anpassung der generalisierten additiven Modelle wurde das Paket **mgcv** eingesetzt (WOOD und AUGUSTIN, 2002).

3. ERGEBNISSE

3.1 Zuwachseinbruch im Zusammenhang mit Trockenjahren

3.1.1 Kurzfristiger Zuwachseinbruch

Bei 132 der 143 untersuchten Populationen ist ein Einbruch im Radialzuwachs in Verbindung mit den Trockenjahren 1947, 1976 und 2003 feststellbar (siehe Abb. 1a). Die stärksten relativen Zuwachseinbrüche sind bei Fichten in Nordbayern und in Nordost-Baden-Württemberg, d.h. also in den eher trockenen Bereichen des Untersuchungsgebietes zu finden.

Für Fichte, Tanne und Buche nimmt der Zuwachseinbruch im Untersuchungsgebiet signifikant ($\alpha < 0,05$) mit höheren Niederschlägen ab. Dabei deutet sich für Fichte und Tanne ein Schwellenwert von ca. 500 mm Vegetationszeitniederschlag an (siehe Abb. 2a). Bei geringeren Niederschlägen haben Fichte und Tanne besonders stark reagiert. Im Vergleich von Fichte und Tanne reagiert die Tanne deutlich schwächer. Ab 500 mm Niederschlag in

der Vegetationszeit übersteht die Tanne selbst extreme Trockenjahre ohne nennenswerten Zuwachsrückgang. Hervorzuheben ist insbesondere auch die geringe Reaktion der Eiche, deren Wachstum kaum auf Trockenjahre anspricht.

3.1.2 Langfristiger Zuwachseinbruch

Bezieht man jeweils die beiden Jahre nach den Trockenjahren mit ein und berücksichtigt damit auch die Erholungsfähigkeit der Baumarten, zeigen noch 127 der 143 untersuchten Populationen einen mehrjährigen Zuwachseinbruch in Verbindung mit den Trockenjahren 1947, 1976 und 2003 (Abb. 1b). Dabei bestätigt sich das bereits beobachtete Bild: die Fichte reagiert am stärksten, insbesondere wiederum in Nordbayern, wogegen Eiche auch längerfristig kaum reagiert, und nur auf wenigen Standorten deutliche mehrjährige Zuwachsrückgänge zeigt. Auffallend ist weiterhin die rasche Erholung der Tanne, vor Allem in Südbayern, wo auf einigen Standorten keine langfristigen Zuwachseinbrüche feststellbar waren. Auch die Kiefer kann sich auf den meisten Standorten rasch erholen und weist oft nur geringe längerfristige Zuwachsverluste auf. Die Buche erholt sich ähnlich schnell wie die Eiche, scheint aber auf tief gelegenen Keuperstandorten in 200 m Höhe langsam an ihre Grenzen zu stoßen und weist im

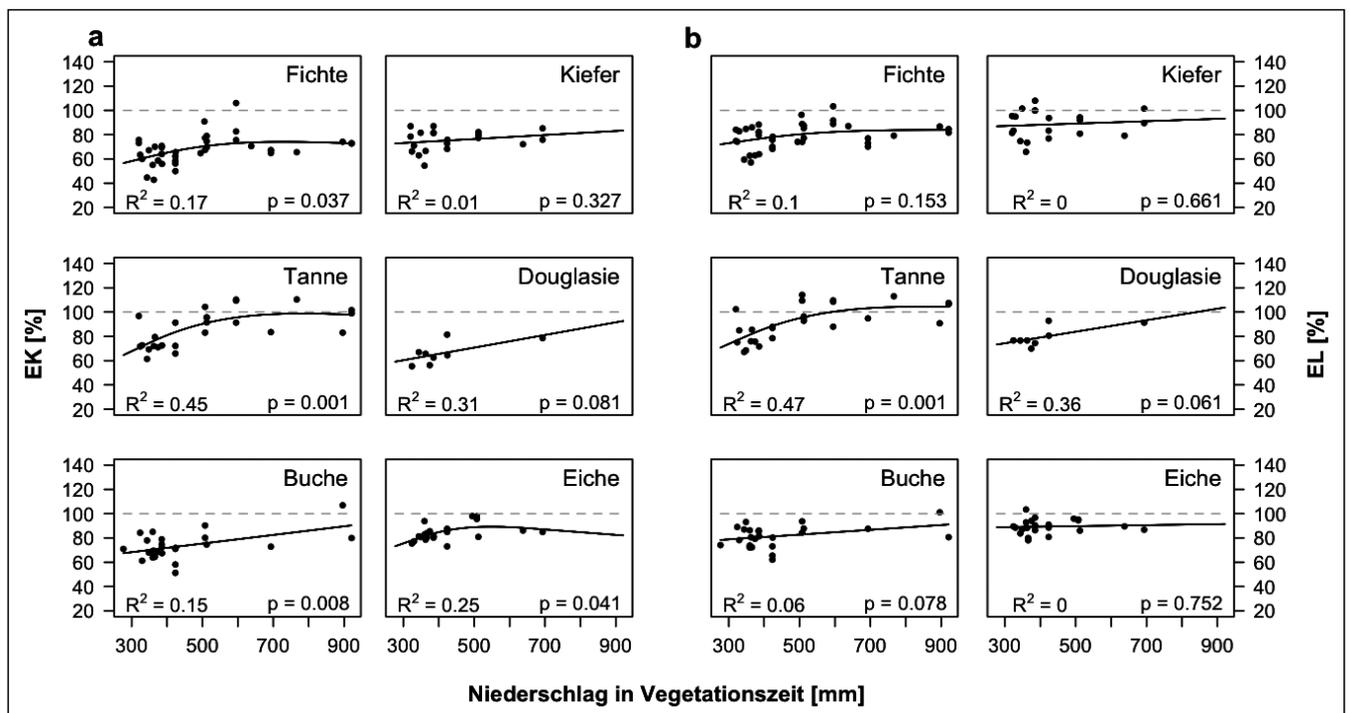


Abb. 2

Korrelation zwischen mittlerer Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (April bis September) und kurzfristigem (EK, linke Seite) bzw. langfristigem Zuwachseinbruch im Zusammenhang mit Trockenjahren (EL, rechte Seite).

Die Regressionslinien stehen für generalisierte additive Modelle, für die jeweils Bestimmtheitsmaß und Modellsignifikanz angegeben sind. Die gestrichelten horizontalen Linien stehen für EK = 100% bzw. EL = 100%, was keiner Veränderung des Durchmesserzuwachses in Verbindung mit Trockenjahren entspricht.

Correlation between precipitation during vegetation period (May through September) and short-term (EK, left panel), and long-term growth impact of drought events (EL, right panel). The regression lines represent generalized additive models, whose coefficients of determination and overall significances are given below the lines. The dashed horizontal line stand for an EK or EL of 100%, representing no growth decrease associated with severe summer drought.

Gegensatz zur Eiche dort auch längerfristig deutliche Zuwachsrückgänge auf. Die Douglasie reagiert auf vergleichbaren Standorten etwas schwächer auf die Trockenjahre als die Fichte. Der Zusammenhang zwischen Zuwachseinbruch und Großklima ist insgesamt schwächer ausgeprägt und nur noch bei Tanne signifikant ($\alpha < 0,05$) (Abb. 2b).

3.1.3 Variabilität im Zuwachseinbruch

Auf Einzelbaumebene zeigt sich eine bemerkenswerte Variabilität in der Zuwachsreaktion auf Trockenstress

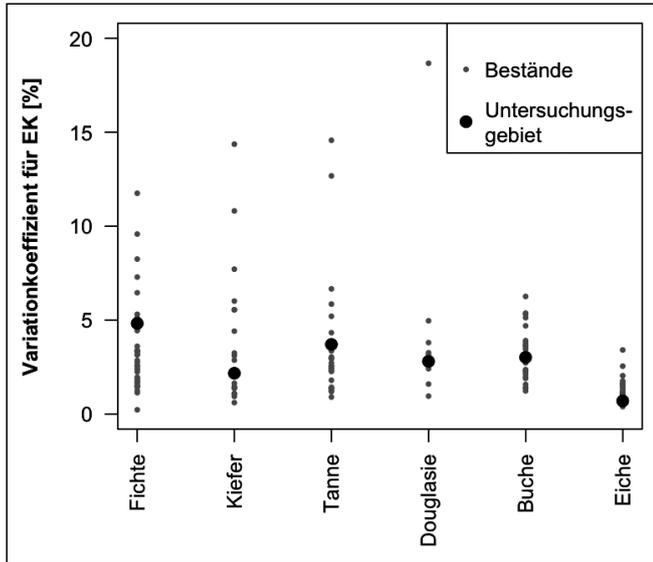


Abb. 3

Vergleich der Variationskoeffizienten für den kurzfristigen Zuwachseinbruch im Zusammenhang mit Trockenjahren (EK) auf Bestandesebene (Einzelbäume) und Untersuchungsgebietsebene (Populationen).

Comparison of the coefficients of variation for the short-term drought impact on tree growth (EK) on stand (small grey dots) and investigation area (large black dots) level.

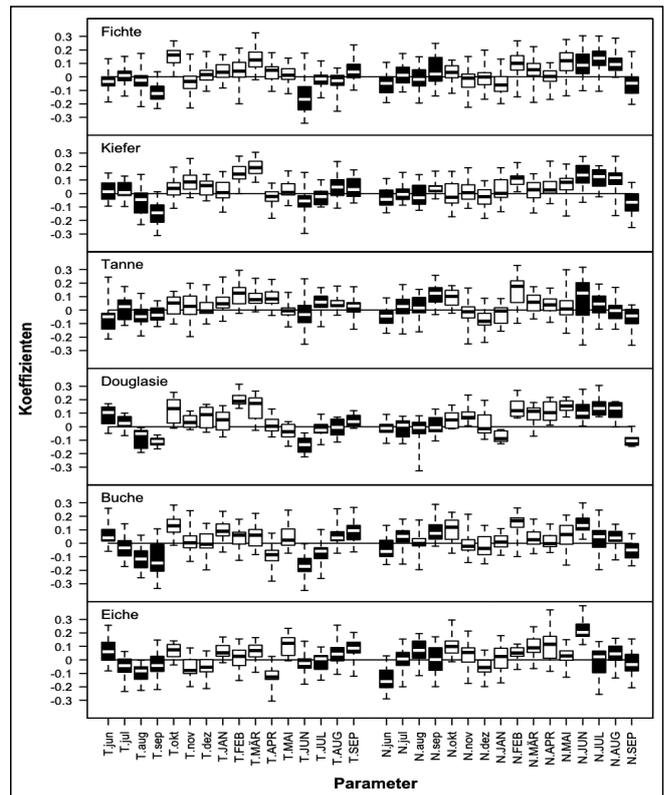


Abb. 4

Boxplots der Regressions-Koeffizienten für die response functions aller Standorte und Arten: Temperaturmittel vom Juni des Vorjahres bis zum September des aktuellen Jahres (linke Seite) und Niederschlagssummen vom Juni des Vorjahres bis zum September des aktuellen Jahres (rechte Seite). Schwarze Boxen stehen dabei für die Sommermonate, Monatsnamen in Großbuchstaben stehen für das aktuelle Jahr, kleingeschriebene Monatsnamen für das vergangene Jahr.

Box plots of the response function coefficients for all species and sites. Black boxes represent summer months, all caps month names stand for the current year, lower-case month names stand for the previous year.

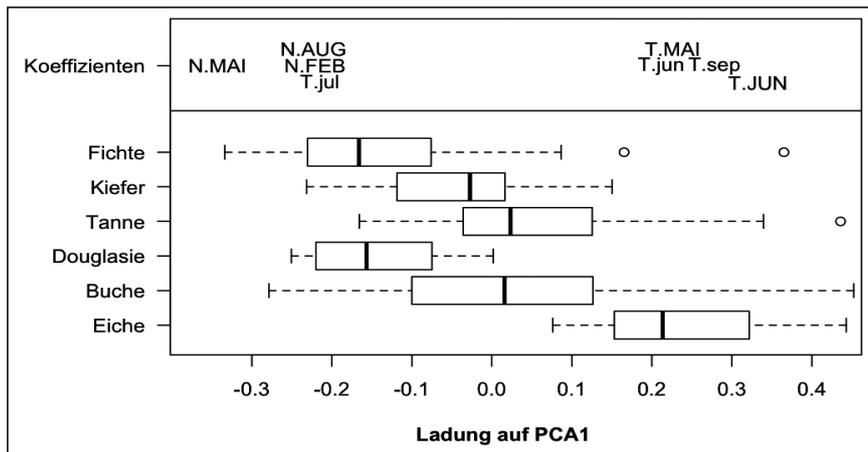


Abb. 5

Darstellung der ersten Achse einer PCA der Regressions-Koeffizienten aus den response functions in Form der Achsenladungen der Parameter (oberer Teil) und der Kollektive (unterer Teil). Im oberen Teil sind nur Parameter außerhalb des equilibrium circle dargestellt.

Representation of the first axis of a PCA of the response coefficients, in terms of coefficients (upper part) and species loadings (lower part). In the upper part, only coefficients outside the equilibrium circle for PCA1 are shown.

bei allen untersuchten Arten: Der Variationskoeffizient von EK für Einzelbäume liegt bei vielen Kollektiven höher als der Variationskoeffizient für EK auf Ebene des gesamten Untersuchungsgebiets (siehe Abb. 3). Damit variieren die Zuwachsreaktionen der Bäume einzelner Bestände auf Trockenstress stärker als die mittleren Reaktionen aller Bestände des Untersuchungsgebiets. Bei den Nadelbäumen Fichte, Kiefer, Tanne und Douglasie finden sich dabei einige Einzelbestände mit sehr deutlicher innerer Differenzierung der Zuwachsreaktion. Die Eiche weist auf Untersuchungsgebietsebene die geringste Variabilität der Zuwachsreaktion im Zusammenhang mit Trockenstress auf, diese ist jedoch auf Bestandesebene überwiegend größer.

Bei keiner der untersuchten Arten lässt sich ein Zusammenhang zwischen Variabilität der Zuwachsreaktion auf Bestandesebene und Klimafaktoren herstellen.

3.2 Langfristige Klima-Wachstums-Beziehungen

Die Klima-Wachstums-Beziehungen zeigen ein differenziertes Bild innerhalb der Arten (siehe Abb. 4). Dabei sind die Sommerniederschläge bei allen Arten auf den meisten Standorten mit deutlichen positiven Korrelationen mit dem Zuwachs belegt, vor allem Juni-Niederschläge sind demnach häufig wachstumsbestimmend. Für die Temperatur lässt sich in den meisten Fällen eine Wachstumslimitierung durch hohe Sommertemperaturen erkennen, auch hier ist der aktuelle Juni wiederum mit den deutlichsten negativen Korrelationen belegt. Damit sind die Baumarten auf einem Großteil der untersuchten Standorte sensitiv gegenüber warmen, trockenen Sommern. Aus dieser Darstellung der Koeffizienten der *response functions* lässt sich bereits ein Artenunterschied ableiten, vor allem zwischen Fichte, Douglasie und Buche mit stärkerer Limitierung durch hohe Sommertemperaturen und Eiche mit einem sehr indifferenten Verhalten gegenüber hohen Sommertemperaturen. Auch zeigen die Nadelhölzer eine generell längere Phase der Limitierung durch aktuelle Sommerniederschläge (Juni bis August, oder Juni bis Juli), während Eiche und Buche nur im Juni deutliche Korrelationen mit den Sommerniederschlägen zeigen.

Ein verdichtetes Bild dieser Differenzierung zeigt die PCA der Koeffizienten aus den Klima-Wachstums-Modellen (*response functions*). Die erste Achse der PCA zeigt eine hohe positive Ladung von hohen Sommertemperaturen sowie eine hohe negative Ladung von Sommerniederschlägen (siehe Abb. 5, oberer Teil) und kann damit als ein Maß für „Sommertrockenheit“ interpretiert werden.

Die PCA zeigt eine sehr gute Trennung der Arten nach dem Aspekt Sommertrockenheit (siehe Abb. 5 unterer Teil). Fichte reagiert zusammen mit Douglasie am stärksten, wogegen sich Eiche vergleichsweise indifferent verhält. Dies spricht für eine deutliche Differenzierung der Arten hinsichtlich der Ansprüche an ausreichende Niederschläge und günstige Temperaturen im Sommer.

In der räumlichen Darstellung (siehe Abb. 6) ergibt sich für die Fichte eine Wachstumslimitierung durch hohe Sommertemperaturen vor allem in den trockenwarmen Bereichen des Untersuchungsgebietes, die weit-

gehend mit kritischen Bereichen aus der Darstellung des Zuwachseinbruches im Zusammenhang mit Trockenjahren zusammenfallen (siehe Abb. 1). Dieser regionale Schwerpunkt in den Keuperlandschaften und im Oberpfälzer Becken ist für alle untersuchten Baumarten markant.

3.3 Beziehungen zwischen Wasserhaushalt und Wachstum

Die Bereiche mit der deutlichsten Limitierung des Wachstums durch ein sommerliches Transpirationsdefizit finden sich für die Fichte und Kiefer im Bereich Ost-

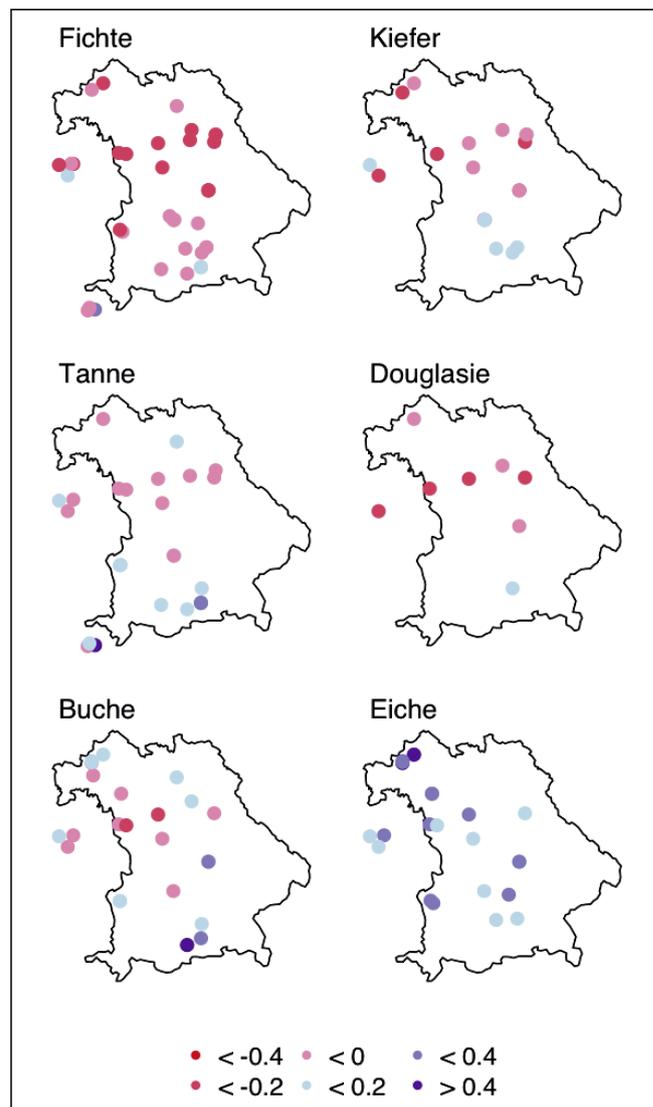


Abb. 6

Räumliche Darstellung der Achsenladungen der Kollektive auf der ersten Achse einer PCA der Regressions-Koeffizienten aus den *response functions*. Ein negativerer Wert (rote Farben) steht dabei für eine starke Korrespondenz zur ersten Achse der PCA, die stark mit dem Aspekt „Sommertrockenheit“ assoziiert ist.

Map view of the population loadings on the first axis of a PCA of the response coefficients. A more reddish color stands for a stronger correspondence between a population and the first axis representing the feature “summer drought”.

Tab. 1

Korrelation der Parameter kurzfristiger Zuwachseinbruch in Verbindung mit Trockenjahren (EK), langfristiger Zuwachseinbruch (EL), Kollektiv-Ladung auf der ersten Achse einer PCA der Korrelations-Koeffizienten aus den response functions (PCA1) und Zuwachslimitierung durch sommerliche Transpirationseinschränkung.

Correlation of the parameters short-term growth decrease in dry years (EK), long-term growth decrease (EL), population loading on the first axis of a PCA with the response coefficients (PCA1) and growth limitation by transpiration deficit in summer (TE).

	EK	EL	PCA1
EL	0,83		
PCA1	-0,66	-0,53	
TE	0,62	0,39	-0,63

im Bezug auf die Bewertung der Baumarten als auch der räumlichen Muster. Die Korrelation der einzelnen Maße untereinander spiegeln diese Übereinstimmungen gut wider (siehe Tab. 1). Sehr gut korrelieren der kurzfristige Einbruch EK und der langfristige Einbruch EL, am wenigsten stimmen die Muster für EL und die langfristigen Korrelationen des Zuwachses mit der Transpirationseinschränkung überein.

4. DISKUSSION

4.1 Vergleich der untersuchten Arten im Hinblick auf ihre Trockentoleranz

Fichte

Die Fichte zeigt von allen untersuchten Baumarten die deutlichsten Zuwachseinbrüche im Zusammenhang mit Trockenstress – sowohl kurzfristig als auch langfristig. Bei den langfristigen Beziehungen zwischen Klima und Wachstum zeigt die Fichte von allen Arten die deutlichste Abhängigkeit ihres Wachstums von ausreichenden Sommerniederschlägen und moderaten Sommertemperaturen. Dies bestätigt die Einordnung der Fichte als dürr empfindliche Baumart durch Klimahüllen (v.a. KÖLLING, 2007), Simulationsstudien (z.B. PRETZSCH und DURSKEY, 2002), ökophysiologische Studien (z.B. COCHARD, 1992) und gutachterliche Einwertungen (z.B. NIINEMETS und VALLADARES, 2006). Die hohe Empfindlichkeit der Fichte gegenüber hohen Juni-Temperaturen erklärt sich dadurch, dass große Teile des radialen Zuwachses gewöhnlich im Juni stattfinden (DESLAURIERS et al., 2003). Die auch hier beobachtete Präkonditionierung des Wachstums durch hohe Spätsommertemperaturen im Vorjahr wird von manchen Autoren auf vermehrte Zapfenbildung im Zusammenhang mit trockenen Verhältnissen zurückgeführt, die dann zu einer reduzierten Allokation von Kohlenstoff in das Sprosswachstum führen (z.B. CHALUPKA et al., 1975; ANDREASSEN et al., 2006). Allerdings konnten SEIFERT und MÜLLER-STARCK (2009) keinen solchen Zusammenhang zwischen vermehrter Zapfenbildung und reduziertem Zuwachs bei bayerischen Fichten nachweisen. Damit ist die wahrscheinlichste Erklärung für den negativen Einfluss hoher Sommertemperaturen im Vorjahr auf das Wachstum im aktuellen Jahr die Nachwirkung von Sommer-

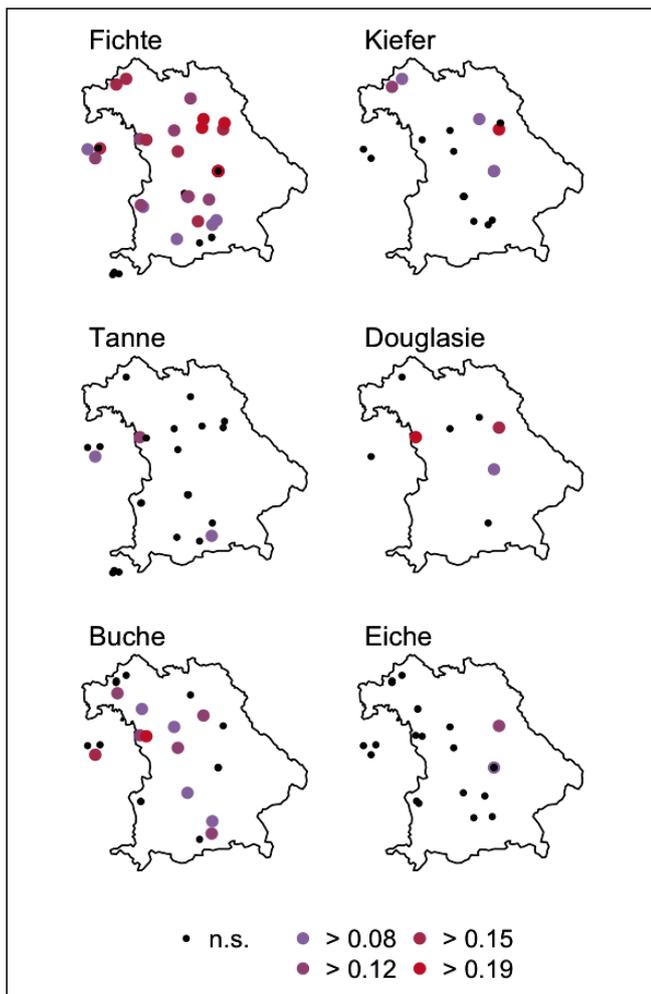


Abb. 7

Räumliche Darstellung der erklärten Varianz (R^2) im Jahrringwachstum durch das sommerliche Transpirationsdefizit. Nicht signifikante Zusammenhänge ($\alpha > 0,05$) sind durch die kleineren schwarzen Punkte gekennzeichnet.

Map view of the explained variance (R^2) in tree-ring growth by transpiration deficit. The smaller black points indicate correlations insignificant at a significance level of $\alpha > 0,05$.

mittelfrankens (Fichte) und der Oberpfalz (Fichte und Kiefer, siehe Abb. 7). Tanne und Eiche zeigen nur sehr schwache langfristige Korrelationen zwischen Transpirationsdefizit und Zuwachs, die über weite Bereiche auch nicht signifikant sind (bei $\alpha < 0,05$). Buche und Douglasie zeigen die stärksten Korrelationen im westlichen Keuper, aber jeweils nur mit wenigen Populationen. Von allen untersuchten Arten zeigt die Fichte die stärksten und anteilmäßig bedeutsamsten Zusammenhänge zwischen Wachstum und Standortswasserhaushalt.

3.4 Vergleich der unterschiedlichen Auswertungsansätze

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertungen (Einbruch und Erholung im Zusammenhang mit Trockenjahren, langfristige Klima-Wachstums-Beziehungen und Korrelationen zwischen Wachstum und Standortswasserhaushalt) zeigen deutliche Ähnlichkeiten sowohl

trockenheit. Auch die vergleichsweise flache Durchwurzelung der Fichte in Verbindung mit einer eingeschränkten Regulationsmöglichkeit der Stomataöffnung tragen zur Trockenempfindlichkeit der Fichte bei.

Kiefer

Die Kiefer muss nach dem Klimahüllenmodell als kritische Baumart eingestuft werden (KÖLLING, 2007), und nach ihrer natürlichen Verbreitung ist sie ebenfalls nicht als Baumart für wärmere und trockenere Klimate geeignet (WALENTOWSKI et al., 2007). Dahingegen wird die Kiefer in dendroökologischen Studien auch als trockenstress-tolerante Baumart eingestuft (OBERHUBER et al., 1998; BOURIAUD und POPA, 2009). Die vorliegenden Ergebnisse führen zu einer besseren Einstufung der Kiefer im Vergleich zur Fichte: Die Kiefer zeigt geringere Zuwachseinbrüche in Verbindung mit trockenen Sommern, und auch eine deutlich bessere Erholung als die Fichte. Auch über längere Zeiträume ist das Wachstum der Kiefer schwächer durch Sommertrockenheit limitiert, wie die Ergebnisse der *response functions* und die geringe Korrelation zwischen Wachstum der Kiefer und sommerlicher Transpirationseinschränkung zeigen. Eine mögliche physiologische Erklärung für diese Unterschiede zur Fichte liegt in der Fähigkeit der Kiefer, durch Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit eine stärkere Kontrolle über ihre Transpiration auszuüben, wodurch gefährliche weitläufige Embolien verhindert werden können (COCHARD, 1992; COCHARD et al., 2004; IRVINE et al., 1998). Weiterhin ist die Kiefer bei anhaltender Sommertrockenheit gegenüber der Fichte im Vorteil, da ihr Wachstum früher im Jahr einsetzt und früher wieder aufhört (PICHLER und OBERHUBER, 2007). Damit ist die Kiefer im (Spät-)sommer weniger durch Trockenheit limitiert als die Fichte.

Tanne

Die Tanne zeigt weitaus geringere Zuwachseinbrüche im Zusammenhang mit Trockenjahren als die Fichte, sowie eine raschere Erholung. Und von den untersuchten Nadelhölzern zeigt sie die geringste Wachstumseinschränkung durch Sommertrockenheit. Dieses Bild steht in Übereinstimmung mit dem von ELLING et al. (2009) gezeichneten Bild einer prinzipiell trockenstress-toleranten Tanne. Das beobachtete Tannensterben im Nachhall des Trockenjahrs 1976 muss wohl einer Vorschädigung der betroffenen Tanne durch den Luftschadstoff SO₂ zugeschrieben werden (ELLING und DITTMAR, 2008). Der Trockensommer 2003 war aufgrund einer drastisch reduzierten SO₂-Belastung dementsprechend bei vielen Tannen nur mit minimalen Zuwachseinbrüchen verbunden (ELLING et al., 2009). Die geringere Anfälligkeit der Tanne gegenüber trockenen Sommern im Vergleich zur Fichte deckt sich mit weiteren dendroökologischen Untersuchungen (BOURIAUD und POPA, 2009; BECKER, 1989; DESPLANQUE et al., 1999), sowie den Klimahüllen (KÖLLING, 2007). Als wesentliche Gründe für die geringere Anfälligkeit der Tanne gegenüber sommerlichem Trockenstress können ihr tiefreichendes Pfahlwurzelsystem angeführt werden (ELLING et al., 2009), das ihr eine effizientere Ausschöpfung der Bodenwasservorräte ermöglicht, sowie eine bessere Nutzung der Frühjahrsnieder-

schläge (BECKER, 1989; DESPLANQUE et al., 1999; BOURIAUD und POPA, 2009).

Douglasie

Die Douglasie weist in der vorliegenden Studie ein ganz ähnliches dendroklimatisches Profil auf wie die Fichte, mit deutlichen Zuwachslimitierungen durch hohe Sommertemperaturen und geringe Sommerniederschläge. Die teilweise starken Zuwachseinbrüche im Zusammenhang mit Extremjahren gehen jedoch vom insgesamt höchsten Zuwachsniveau der untersuchten Baumarten aus, und die Erholung verlief selbst auf Standorten mit massiven Einbrüchen schneller als auf vielen Fichtenstandorten.

Die beobachteten Klima-Wachstums-Beziehungen bestätigen KÖLLING (2008), wonach die Douglasie von einer verlängerten Vegetationsperiode in Bayern profitieren könnte, sie aber wahrscheinlich nicht für die wärmeren Regionen (wie die Keuperstandorte) geeignet sein wird, da dort bereits unter heutigem Klima die Anbaubedingungen ungünstig sind.

Da keine Daten zu den jeweiligen Provenienzen zur Verfügung standen, sollten die Ergebnisse für die Douglasie nur mit besonderer Vorsicht interpretiert werden. Im Gegensatz zu den untersuchten heimischen Arten war die genetische Diversifizierung der Douglasie nicht so deutlich durch Eiszeiten unterbrochen und verlangsamt (HALLIDAY und BROWN, 1943). Damit existiert bei der Douglasie ein stärkerer Zusammenhang zwischen Genotyp und Wuchsbedingungen am Ursprungsort des Saatgutes; dieser könnte sich z.B. in Form unterschiedlicher Trockentoleranz niederschlagen (HERMANN und LAVENDER, 1968; MARTINEZ MEIER et al., 2008), was in dendroökologischen Studien auch bestätigt wurde (CHEN et al., 2010). Weiterhin konnten im Rahmen dieser Untersuchung deutlich weniger Bestände untersucht werden als bei den anderen Baumarten, so dass die hier erzielten Ergebnisse keine abschließende Beurteilung dieser Baumart zulassen.

Buche

Im Hinblick auf die kontrovers diskutierte Eignung der Buche als Baumart der Zukunft (vergleiche RENNENBERG et al. (2004) und die Erwiderung von AMMER et al. (2005)) zeigt die Streuung der möglichen Reaktionen der Buche in der vorliegende Studie, dass die Eignung oder Nichteignung einer Baumart nicht anhand weniger Kollektive diskutiert werden sollte. Im Untersuchungsgebiet zeigt die Buche eine deutlichere Limitierung des Zuwachses durch sommerliche Trockenheit als die Eiche, und auch der Zuwachseinbruch in Verbindung mit Extremjahren ist deutlicher ausgeprägt. Die Erholung nach Extremjahren verläuft jedoch gut, so dass die Buche auch bei der langfristigen Erholung besser abschneidet als die Fichte.

Eine signifikante Limitierung des Durchmesserzuwachses bei Buchen auf kollinen Standorten durch niedrige Sommerniederschläge und hohe Sommertemperaturen wurde auch von DITTMAR et al. (2003) gefunden.

Besonders deutlich sind die Unterschiede zur Eiche auf Standorten, die bereits heute Weinbauklima aufwei-

sen (Nordwesten des Untersuchungsgebietes). Dort sind die Zuwachseinbrüche in Verbindung mit Trockenjahren besonders ausgeprägt und deuten eine mögliche Trockengrenze der Buche an.

Hervorzuheben ist weiterhin, dass die Kollektive mit den deutlichsten Zuwachseinbrüchen in Verbindung mit Trockenjahren nicht notwendigerweise die mit den stärksten Klima-Wachstums-Kopplungen sind. Das liefert weitere Hinweise darauf, dass unter Trockenheit unterschiedliche Mechanismen das Wachstum der Buche steuern, vor allem physiologischer Trockenstress im Gegensatz zu physiologischen Reaktionen auf erhöhte troposphärische Ozon-Konzentrationen (LÖW et al., 2006).

Eiche

Von allen untersuchten Baumarten zeigt die Eiche die größte Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Trockensommern. Die Zuwachseinbrüche in Extremjahren sind generell sehr niedrig und nur von kurzer Dauer. Dieser Befund steht im Kontrast zu länger anhaltenden Zuwachsendepressionen im Zusammenhang mit Trockenheit, die für verschiedene Eichenarten beschrieben wurden (JACOBI und TAINTER, 1998; JENKINS und PALLARDY, 1995; LEBLANC und FOSTER, 1992). Hierbei könnten aber auch biotische Schaderreger eine Rolle spielen, die bei der Eiche eine große Rolle spielen (z. B. Waldzustandsbericht 2010). Die Beziehungen zwischen Zuwachs und Sommertrockenheit bzw. sommerlicher Transpirationseinschränkungen sind nur schwach. FRIEDRICHS et al. (2008) fanden ebenfalls nur schwache Zusammenhänge zwischen Sommertemperaturen und Radialzuwachs bei der Eiche im zentralen Westdeutschland. Damit kann insgesamt von einer verhältnismäßig geringen Limitierung des Wachstums der Eiche von trockenen und warmen Sommern ausgegangen werden, und die schnelle Erholung nach Extremjahren legt eine besondere Anbaueignung bei erhöhter Frequenz extremer Trockensommer unter künftigen Klimabedingungen nahe.

Der Unterschied zur Buche kann durch eine unterschiedliche Strategie bei Trockenstress erklärt werden: die Eiche hält länger eine höhere Blattleitfähigkeit und photosynthetische Kapazität aufrecht (BACKES und LEUSCHNER, 2000), während die Buche bereits früher ihre Stomata schließt und die Photosynthese einschränkt, und damit Embolien aus dem Weg geht, für die sie eine gewisse Anfälligkeit zeigt (COCHARD et al., 2005). Die Buche besitzt zudem ein vergleichsweise flachgründiges Wurzelsystem (LEBOURGEOIS et al., 2005), was ihr im Vergleich zur Eiche zu einem Nachteil im Hinblick auf die Wasserversorgung unter trockenen Bedingungen gereicht.

Im Gegensatz zu Untersuchungen auf fünf Versuchsfeldern von Sachsen-Anhalt bis Südpolen (SCHRÖDER et al., 2009) reagierten die von uns untersuchten Eichen deutlich schwächer als Kiefer, insbesondere im Hinblick auf die Wachstums-Limitierung durch Sommerniederschläge. Dies könnte auch damit zusammenhängen, dass in der vorliegenden Untersuchung überwiegend Stieleiche untersucht wurde, wogegen es sich in o.g. Studie vorwiegend um Traubeneiche handelt. Nach der bisheri-

ger Einschätzung (NIINEMETS und VALLADARES, 2006) wird die Stieleiche etwas trockenresistenter beurteilt als Traubeneiche.

4.2 Variabilität in der Zuwachsreaktion

Obwohl nach unseren Ergebnissen räumlich differenzierte Aussagen über die Anbaueignung der untersuchten Arten im Untersuchungsgebiet getroffen werden können – wie etwa eine deutliche Gefährdung der Fichte in Mittelfranken und Oberpfalz – muss doch die starke Variabilität in der Reaktion auf Trockenheit hervorgehoben werden, die die Ableitung klarer, klimatischer oder standörtlicher Schwellenwerte erschwert. Die Variabilität auf Bestandesebene korreliert nicht mit den Standortbedingungen, so dass nicht von einem kausalen Zusammenhang der Art „mehr Umweltstress im Mittel – mehr Freiheitsgrade in der Reaktion auf Extrema“ ausgegangen werden kann. Eine mögliche Quelle dieser Variabilität kann in der kleinstandörtlichen Variation im Bodenwasserhaushalt liegen, die durch das hydrologische Modell Brook90-LWF nicht abgebildet werden kann. Weiterhin kann aber auch die genetische Vielfalt der Populationen ungeachtet der klimatischen und standörtlichen Rahmenbedingungen eine wichtige Rolle spielen. Bei der Douglasie etwa wird die generelle Trockenanfälligkeit stark über den Genotyp gesteuert (MARTINEZ MEIER et al., 2008), und auch bei der Buche gibt es je nach Herkunft grundlegende Unterschiede im Hinblick auf trockenheitsrelevante Parameter, wie etwa das Verhältnis zwischen Spross- und Wurzelbiomasse (TOGNETTI et al., 1995). Solche genotypische Variationen und phänotypische Auswirkungen sind typisch für Arten mit einem großen natürlichen geographischen Areal (ROSE et al., 2009). Unterschiedliche Herkünfte könnten daher ein Grundrauschen im vorgestellten Datensatz erklären, das zu schwachen Beziehungen zwischen der Reaktion einer Art auf Trockenstress und den Eigenschaften der jeweiligen Standorte führt.

Aber auch auf Einzelbaumebene können genetische Diversität oder eine räumlich oder zeitlich inhomogene Verteilung von Ressourcen zu einer erhöhten Variabilität in der Reaktion auf Trockenstress führen. In jeder Population gibt es Individuen mit besserer oder schlechterer Anpassungsfähigkeit, was sich mit unterschiedlich brauchbaren gespeicherten Informationen – die letzten Endes die Umwelterfahrungen der Vorgänger widerspiegeln (LEVINS, 1968) – in der DNS der Individuen erklären lässt (STETTLER und BRADSHAW, 1994). Die große Variabilität des Einzelbaumzuwachses deckt sich auch mit Insoenzymuntersuchungen, bei denen ebenfalls auf Bestandesebene große Variabilitäten gefunden wurden (MÜLLER-STARCK et al., 2003, 2004). Außerdem können sehr kleinräumig wirksame Störungen wie etwa Freistellungen durch Windwurf oder Durchforstung zu Änderungen im Wuchsverhalten einzelner Individuen führen, die dann die Klimakomponente im Zuwachssignal überprägen (JUMP et al., 2006).

Die Variabilität sowohl auf Bestandes-, als auch auf Einzelbaumebene führt im positiven Extrem dazu, dass einzelne Populationen oder einzelne Individuen einer Population Trockenjahre fast unbeschadet überstehen

können. Die Kompromisse, die mit dem einen oder anderen Genotyp einhergehen sind aber nicht umfassend abschätzbar. STHULTZ et al. (2009) zeigten etwa, dass die Resistenz gegenüber Schädlingen eines Genotyps mit seiner vergrößerten Anfälligkeit gegenüber Trockenstress einhergehen kann. Eine einseitige Selektion forstlichen Saatguts im Hinblick auf bestimmte Zieleigenschaften kann somit – unter veränderten Regimes die wir heute noch nicht gut genug vorhersagen können – fatale Folgen haben. Diese Erkenntnis bekräftigt die Forderung nach einem forstlichen Wirtschaften, das auch den Erhalt einer genetischen Vielfalt als Schlüsselpotential für die Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen zum Ziel hat (SCHABERG et al., 2008).

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das forstwirtschaftliche Handeln der Zukunft wird Risiken und Unsicherheiten abwägen und in die langfristige Planung integrieren müssen (NITSCHKE und INNES, 2008). Die Verallgemeinerung von einzelnen Fallstudien ist aufgrund der großen Variabilität der Baumreaktion nur beschränkt möglich. Fundierte Empfehlungen für die forstliche Praxis müssen deshalb auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen sowie einer breiten Datenbasis basieren. Die vorliegende Studie will hierzu einen Beitrag leisten, indem sie das Ausmaß und die Variabilität der Zuwachsreaktion wichtiger Wirtschaftsbaumarten auf sommerliche Trockenheit auf der Basis eines breiten, einheitlich erhobenen Datensatzes untersucht.

Die Fichte reagiert von allen untersuchten Baumarten am stärksten auf sommerliche Trockenheit. Dies bestätigt die Bemühungen, Fichtenbestände angesichts des prognostizierten Klimawandels in stabilere Mischbestände umzuwandeln (z.B. KÖLLING et al., 2009A). Die deutliche Abhängigkeit ihrer Reaktion von den großklimatischen Rahmenbedingungen und die Tatsache, dass die Fichte auf geeigneten Standorten auch extreme Trockenjahre ohne größere Schäden überstehen kann zeigen, dass diese Baumart auf geeigneten Standorten auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen kann. Wirtschaftlich interessante Ersatzbaumarten für die Fichte sind Tanne und Douglasie, die auf vielen Standorten eine größere Trockentoleranz aufweisen. Auch die Laubbäume Buche und Eiche sind bei den prognostizierten Klimabedingungen deutlich günstiger zu beurteilen als Fichte, wobei Eiche von allen untersuchten Baumarten die geringste Reaktion auf sommerlichen Trockenstress zeigte.

Besonders hervorzuheben ist die enorme Bandbreite der Reaktion auf Einzelbaumbene. Die große Variabilität innerhalb der Populationen deutet darauf hin, dass sich Baumarten in einem gewissen Maß auch an veränderte Umweltbedingungen anpassen können. Dies bestätigt das bisherige Vorgehen der Forstpraxis, den Waldumbau nicht als kurzfristige Radikalmaßnahme sondern mit einem mittelfristigen Zeithorizont zu betreiben.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Klimawandels wird die Zunahme von Frequenz und Intensität extremer Witterungsereignisse

prognostiziert. Derartige Extremereignisse wie z.B. Trockensommer haben auch erhebliche Auswirkungen auf die zukünftige Anbaueignung der heimischen Baumarten. Ziel der vorliegenden Studie ist deshalb, mittels Jahrringuntersuchungen die Reaktion von Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Buche und Eiche auf Trockenheit zu analysieren um daraus Empfehlungen für die forstliche Praxis abzuleiten.

Als Datengrundlage dienen Jahrringserien von über 1400 Bäumen von 48 Waldstandorten in ganz Bayern und angrenzenden Gebieten. Der Zusammenhang zwischen Wachstum und Standortfaktoren wurde mit verschiedenen statistischen Verfahren analysiert. Neben einfachen deskriptiven Verfahren wie Jahrringbreite oder Sensitivität wurden komplexe Klima-Wachstums-Beziehungen und Weiserjahr-Analysen durchgeführt und die klimatische Limitierung des Baumwachstums in Abhängigkeit von Baumart, Großklima und Standort analysiert. Für alle Standorte wurde der Bodenwasserhaushalt modelliert, um neben klimatischen Größen auch den Einfluss des Bodens mit zu berücksichtigen.

Von den untersuchten Baumarten reagierte die Fichte am stärksten auf Trockenheit. Der Zuwachsrückgang war am stärksten in den wärmeren und trockeneren Gebiete in Nordbayern (*Abbildung 1*). Die Eiche zeigt eine standortsübergreifende Überlegenheit gegenüber allen anderen untersuchten Baumarten in Bezug auf Trockentoleranz. Tanne, Kiefer, Douglasie und Buche reagierten schwächer als Fichte aber stärker als Eiche.

Überraschend ist die hohe Variabilität der Reaktion auf Trockenheit sowohl auf Bestandes- als auch auf Einzelbaumbene (*Abbildung 3*), die ein hohes Anpassungspotential der Populationen im Rahmen ihrer genetischen Diversität nahe legt. Diese große Variabilität des Zuwachses erschwert die Ableitung klarer klimatischer Schwellenwerte (vergleiche *Abbildung 2*) und erklärt auch, warum Bäume einer Art unter ähnlichen Standortbedingungen sehr unterschiedlich reagieren können. Empfehlungen für die zukünftige Anbaueignung der Baumarten sind somit nur auf einer breiten Datenbasis sinnvoll.

7. ABSTRACT

Title of the paper: *Tree suitability under climate change conditions: susceptibility of major forest tree species from tree-rings widths.*

The predicted increase in frequency and intensity of climatic extremes, like drought episodes, imposes a challenge on the choice of commercial forest trees under climate change conditions. The present study aims at quantifying the impact of summer drought on growth of spruce, pine, silver fir, beech and oak as the main forest tree species in Southern Germany, and includes Douglas fir as a possible alternative for spruce.

Series of tree-ring widths from more than 1400 trees from 48 sites all over Bavaria and adjacent states are employed for growth/climate modeling and pointer year analysis to derive predications about the climatic limitation of tree growth subject to species, regional climate and site quality. Response functions relating tree growth

to climatic variables in monthly resolution have been applied. The obtained parameters were subject to principal component analysis to derive a more condensed representation of climatic constraints on tree growth. Soil water balance modeling was applied to refine the connections between regional climate and growth reactions to drought in terms of site quality. A modification of Brook90 (Brook90-LWF) has been employed for water balance modeling. Pointer years were chosen *a priori* according to documented drought years and used to calculate short- and long-term impact of drought on tree-growth.

For all species under investigation, critical areas for tree growth could be identified. Generally, the warmer and drier northern part of the investigation area is more unfavorable, with spruce generally being more affected than other species in terms of short- and long-term impact of summer drought on tree-growth (Figure 1). Furthermore, in a condensed view of dendroclimatic forcings, spruce depicts the strongest connection to the aspect “summer drought” throughout the investigation area, whereas oak shows the weakest connection (Figure 5). As a main result, oak is superior to all other species under investigation regarding drought tolerance throughout the investigation area. But also silver fir could replace the most critical spruce on a wide range of sites.

Furthermore, the surprisingly high variability in reaction to drought observed on regional and stand level (Figure 3) implies a high adaptive potential of the populations within the possibilities of their inherent genetic diversity, hampering the derivation of clear climatic or site-related thresholds (compare Figure 2).

8. DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Forschungsprojekts „Baumarteneignung bei verstärkter Trockenheit in Folge des Klimawandels“, gefördert über das Kuratorium der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF, Kennziffer E45, Laufzeit 2006–2009. Weiterhin gebührt den Hilfskräften WENYI JIN und LINGYUN MA ein besonderer Dank für die Unterstützung bei den Laborarbeiten. Die Autoren danken zwei anonymen Gutachtern für wertvolle Hinweise.

9. LITERATUR

- AMMER, C., L. ALBRECHT, H. BORCHERT, F. BROSINGER, C. DITMAR, W. ELLING, J. EWALD, B. FELBERMEIER, H. VON GILSA, J. HUSS, G. KENK, C. KÖLLING, U. KOHNLE, P. MEYER, R. MOSANDL, H. U. MOOSMAYER, S. PALMER, A. REIF, K. E. REHFUESS und B. STIMM (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von RENNENBERG et al. (2004). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **176**: 60–67.
- ANDREASSEN, K., S. SOLBERG, O. TVEITO und S. LYSTAD (2006): Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management* **222**: 211–221.
- BACKES, K. und C. LEUSCHNER (2000): Leaf water relations of competitive *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* trees during 4 years differing in soil drought. *Canadian Journal of Forest Research* **30**: 335–346.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2004): Waldzustandsbericht 2004. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München.
- BECKER, M. (1989): The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research* **19**: 1110–1117.
- BENISTON, M. (2004): The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters* **31**: 2022–2026.
- BIGLER, C., O. U. BRÄKER, H. BUGMANN, M. DOBBERTIN und A. RIGLING (2006): Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* **9**: 330–343.
- BOLTE, A., P. IBISCH, A. MENZEL und A. ROTHE (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. *AFZ-Der Wald* **63**: 800–803.
- BOURIAUD, O. und I. POPA (2009): Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees-Structure and Function* **23**: 95–106.
- BORCHERT, H. (2004): Ökonomische Folgen des Trockenjahres 2003 und Kosten des Waldumbaus. *LWF-Aktuell* **43**: 31–32.
- BROSINGER, F. und S. TRETTER (2007): Waldbau im Zeichen des Klimawandels. *LWF aktuell* **60**: 21–23.
- BUNN, A. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* **26**: 115–124.
- BÜNTGEN, U., D. C. FRANK, R. J. KACZKA, A. VERSTEGE, T. ZWIJACZ-KOZICA und J. ESPER (2007): Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology* **27**: 689–702.
- CHALUPKA, W., M. GIERTYCH und Z. KROLIKOWSKI (1975): The effect of cone crops on growth in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Arboretum Kornickie* **20**: 201–212.
- CHEN, P., C. WELSH und A. HAMANN (2010): Geographic variation in growth response of Douglas-fir to inter-annual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology* **16**: 3374–3385.
- COCHARD, H. (1992): Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology* **11**: 73–83.
- COCHARD, H., S. COSTE, B. CHANSON, J. GUEHL und E. NICOLINI (2005): Hydraulic architecture correlates with bud organogenesis and primary shoot growth in beech (*Fagus sylvatica*). *Tree Physiology* **25**: 1545–1552.
- COCHARD, H., F. FROUX, S. MAYR und C. COUTAND (2004): Xylem wall collapse in water-stressed pine needles. *Plant Physiology* **134**: 401–408.
- COOK, E. R. und K. PETERS (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* **41**: 45–53.
- COTTA, H. (1849): Grundriss der Forstwissenschaft. Arnoldsche Buchhandlung, Dresden, Leipzig, 4. Auflage.
- CROPPER, J. P. (1984): Multicollinearity within selected western north American temperature and precipitation data sets. *Tree-Ring Bulletin* **44**: 29–37.

- DESLAURIERS, A., H. MORIN, C. URBINATI und M. CARRER (2003): Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). *Trees-Structure and Function* **17**: 477–484.
- DESPLANQUE, C., C. ROLLAND und F. H. SCHWEINGRUBER (1999): Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation. *Trees – Structure and Function* **13**: 218–227.
- DIAMOND, J. (1983): Ecology: Laboratory, field and natural experiments. *Nature* **304**: 586–587.
- DITTMAR, C. und W. ELLING (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **118**: 251–270.
- DITTMAR, C., W. ZECH und W. ELLING (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management* **173**: 63–78.
- DOBBERTIN, M. (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* **124**: 319–333.
- EFRON, B. und R. TIBSHIRANI (1986): Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical Science* **1**: 54–75.
- ELLING, W. und C. DITTMAR (2008): Die Weiß-Tanne im Meinungswandel. *AFZ-Der Wald* **5**: 234–238.
- ELLING, W., C. DITTMAR, K. PFAFFELMOSER und T. RÖTZER (2009): Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *Forest Ecology and Management* **257**: 1175–1187.
- FEDERER, C. A., C. VÖROÖSMARTY und B. FEKETE (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *Journal of Hydrometeorology* **4**: 1276–1290.
- FEKEDULEGN, D., R. R. HICKS und J. J. COLBERT (2003): Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. *Forest Ecology and Management* **117**: 409–425.
- FRITTS, H. C. (1971): Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research* **1**: 419–449.
- FRITTS, H. C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Elsevier, New York.
- FRITTS, H. C., T. J. BLASING, B. HAYDEN und J. E. KUTZBACH (1971): Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology* **10**: 845–864.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* **44**: 892–898.
- GRISSINO-MAYER, H. D. (2001): Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Bulletin* **57**: 205–221.
- GUIOT, J. (1991): The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin* **51**: 39–41.
- HALLIDAY, W. E. C. und A. W. A. BROWN (1943): The distribution of some important forest trees in Canada. *Ecology* **24**: 353–373.
- HAMMEL, K. und M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München, Band 185. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München und Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, München.
- HANKE, G. (2005): Klimawandel-Herausforderung aus waldökologischer und waldbaulicher Sicht. *LÖBF-Mitteilungen* **2**: 25–28.
- HASTIE, T. und R. TIBSHIRANI (1986): Generalized additive models. *Statistical Science* **1**: 297–310.
- HERMANN, R. K. und D. P. LAVENDER (1968): Early growth of Douglas fir from various altitudes and aspects in Soutern Oregon. *Silvae Genetica* **25**: 143–151.
- HOFGAARD, A., J. C. TARDIF und Y. BERGERON (1999): Dendroclimatic response of *Picea mariana* and *Pinus banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* **29**: 1346.
- HOLMES, R. L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* **43**: 69–78.
- HUANG, J., J. C. TARDIF, Y. BERGERON, B. DENNELER, F. BERNINGER und M. P. GIRARDIN (2010): Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology* **16**: 711–731.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATIC CHANGE (IPCC) (2007): Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. URL http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf.
- IRVINE, J., M. PERKS, F. MAGNANI und J. GRACE (1998): The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance. *Tree Physiology* **18**: 393.
- JACOB, D., H. GÖTTEL, S. KOTLARSKI, P. LORENZ und K. SIECK (2008): Klima-Auswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Fachbibliothek Umwelt.
- JACOBI, J. C. und F. H. TAINTER (1988): Dendroclimatic examination of white oak along an environmental gradient in the piedmont of South Carolina. *Castanea* **53**: 252–262.
- JENKINS, M. A. und S. G. PALLARDY (1995): The influence of drought on red oak group species growth and mortality in the Missouri Ozarks. *Canadian Journal of Forest Research* **25**: 1119–1127.
- JUMP, A. S., J. M. HUNT und J. PEÑUELAS (2006): Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* **12**: 2163–2174.
- JURY, W. A., W. R. GARDNER und W. GARDNER (1991): *Soil Physics*. John Wiley & Sons, New York, 5. Auflage.
- KAHLE, H. P. (1994): Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Variation von klimatischen Elementen des Wasserhaushalts und dem Radialzuwachs von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) aus Hochlagen des Südschwarzwalds. Doktorarbeit, Universität Freiburg.
- KÖLLING, C. (2007): Klimahüllen von 27 Waldbaumarten. *AFZ-Der Wald* **62**: 1242–1245.
- KÖLLING, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. *LWF Wissen* **59**: 12–21.

- KÖLLING, C., T. KNOKE, P. SCHALL und C. AMMER (2009a): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* **80**: 42–54.
- KÖLLING, C., L. ZIMMERMANN und H. BORCHERT (2009b): Von der Kleinen Eiszeit zur Großen Heißezeit. *LWF aktuell* **69**: 58–63.
- LEBLANC, D. C. und J. R. FOSTER (1992): Predicting effects of global warming on growth and mortality of upland oak species in the midwestern United States: a physiologically based dendroecological approach. *Canadian Journal of Forest Research* **22**: 1739–1752.
- LEBOURGEOIS, F., N. BRÉDA, E. ULRICH und A. GRANIER (2005): Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees-Structure and Function* **19**: 385–401.
- LEGENDRE P. und L. LEGENDRE (1998): *Numerical ecology*. Elsevier Science Ltd.
- LEITGEB, E. und M. ENGLISCH (2006): Klimawandel – Standortliche Rahmenbedingungen für die Forstwirtschaft. *BWF-Praxisinformation* **10**: 9–11.
- LEVINS, R. (1968): *Evolution in changing environments: some theoretical explorations*. Princeton University Press.
- LÖW, M., K. HERBINGER, A. J. NUNN, K. H. HÄBERLE, M. LEUCHNER, C. HEERDT, H. WERNER, P. WIPFLER, H. PRETZSCH, M. TAUSZ und R. MATYSSEK (2006): Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica*). *Trees* **20**: 539–548.
- MARTINEZ MEIER, A. G., L. SANCHEZ, G. D. SALDA, M. J. M. PASTORINO, J. Y. GAUTRY, L. A. GALLO und P. ROZENBERG (2008): Genetic control of the tree-ring response of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) to the 2003 drought and heat-wave in France. *Annals of Forest Science*, **65**: 102p1–102p8.
- MIYAMOTO, Y., H. P. GRIESBAUER und D. S. GREEN (2010): Growth responses of three coexisting conifer species to climate across wide geographic and climate ranges in Yukon and British Columbia. *Forest Ecology and Management* **259**: 514–523.
- MOSTELLER, F. und J. W. TUKEY (1977): *Data analysis and regression*. Addison-Wesley, Reading.
- MÜLLER-STARCK, G., P. BARADAT und F. BERGMANN (1992): Genetic variation within European tree species. *New Forests* **6**: 23–47.
- MÜLLER-STARCK, G., S. HERZOG und H. H. HATTEMER (1993): Intra- and interpopulational genetic variation in juvenile populations of *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* Liebl. *Annals of Forest Science* **50**: 233–244.
- NINEMETS, Ü. und F. VALLADARES (2006): Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs* **76**: 521–547.
- NITSCHKE, C. R. und J. INNES (2008): Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework. *Forest Ecology and Management* **256**: 313–327.
- OBERHUBER, W., M. STUMBÖCK und W. KOFLER (1998): Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees-Structure and Function* **13**: 19–27.
- PICHLER, P. und W. OBERHUBER (2007): Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management* **242**: 688–699.
- PRETZSCH, H. und J. DURSKY (2002): Growth reaction of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) to possible climatic changes in Germany. A sensitivity study. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **121**: 145–154.
- PROFFT, I., M. SEILER und W. ARENHÖVEL (2007): Die Zukunft der Fichte in Thüringen vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forst und Holz* **62**: 19–25.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- RASPE, S., W. GRIMMEISEN und B. SCHULTZE (2004): Der Sommer 2003 grub dem Wald das Wasser ab. *LWF-aktuell* **43**: 4–6.
- REBETZ, M. und M. DOBBERTIN (2004): Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology* **79**: 1–9.
- RENNENBERG, H., W. SEILER, R. MATYSSEK, A. GESSLER und J. KREUZWIESER (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **175**: 210–224.
- ROSE, L., C. LEUSCHNER, B. KÖCKEMANN und H. BUSCHMANN (2009): Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? *European Journal of Forest Research* **128**: 335–343.
- ROTHE, A. und H. BORCHERT (2003): Der Wald für morgen – Eine Naturalbilanz über 25 Jahre naturnahe Forstwirtschaft im Bayerischen Staatswald. *Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* **39**: 1–82.
- SALINGER, M. (2005): Climate variability and change: past, present and future – An overview. *Climatic Change* **70**: 9–29.
- SCHABERG, P. G., D. DEHAYES, G. J. HAWLEY und S. E. NIJENSOHN (2008): Anthropogenic alterations of genetic diversity within tree populations: Implications for forest ecosystem resilience. *Forest Ecology and Management* **256**: 855–862.
- SCHÄR, C. und G. JENDRITZKY (2004): Climate change: hot news from summer 2003. *Nature* **432**: 559–60.
- SCHÄR, C., P. L. VIDALE, D. LÜTHI, C. FREI, C. HÄBERLI, M. A. LINIGER und C. APPENZELLER (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**: 332–6.
- SCHMIDT-VOGT, H. (1988): *Die Fichte*. Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- SCHRÖDER, J., S. LÖFFLER, A. MICHEL und R. KÄTZEL (2009): Genetische Differenzierung, Zuwachsentwicklung und Witterungseinfluss in Mischbeständen von Traubeneiche und Kiefer. *Forst und Holz* **64**: 18–24.
- SEIFERT, T. und G. MÜLLER-STARCK (2009): Impacts of fructification on biomass production and correlated genetic effects in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *European Journal of Forest Research* **128**: 155–169.
- SHEPARD, D. (1968): A two dimensional interpolation function for regularly spaced data. *In: Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*.
- SHUTTLEWORTH, W. J. und J. S. WALLACE (1985): Evaporation from sparse crops – An energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **111**: 839–855.

- SPIECKER, H. (2002): Tree rings and forest management in Europe. *Dendrochronologia* **20**: 191–202.
- STERL, A., C. SEVERIJNS, H. DIJKSTRA, W. HAZELEGER, G. J. V. OLDENBORGH, M. V. D. BROEKE, G. BURGERS, B. V. D. HURK, P. J. V. LEEUWEN und P. V. VELTHOVEN (2008): When can we expect extremely high surface temperatures? *Geophysical Research Letters* **35**: 5–10.
- STETTLER, R. F. und H. D. BRADSHAW (1994): The choice of genetic material for mechanistic studies of adaptation in forest trees. *Tree Physiology*, **14**: 781–796.
- STHULTZ, C. M., C. A. GEHRING und T. G. WHITHAM (2009): Deadly combination of genes and drought: increased mortality of herbivore-resistant trees in a foundation species. *Global Change Biology* **15**: 1949–1961.
- TOGNETTI, R., J. JOHNSON und M. MICHELOZZI (1995): The response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from two Italian populations to drought and recovery. *Trees-Structure and Function* **9**: 348–354.
- UTSCHIG, H., M. BACHMANN und H. PRETZSCH (2004): Das Trockenjahr 1976 bescherte langjährige Zuwachseinbrüche. *LWF aktuell* **43**: 17–18.
- VENABLES, W. N. und B. D. RIPLEY (2002): *Modern Applied Statistics with S*. Springer, New York.
- WAHBA, G. (1975): Smoothing noisy data with spline functions. *Numerische Mathematik* **24**: 383–393.
- WALENTOWSKI, H., C. KÖLLING und J. EWALD (2007): Die Waldkiefer – bereit für den Klimawandel? *LWF Wissen* **57**: 36–46.
- WOOD, S. und N. AUGUSTIN (2002): GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological Modelling* **157**: 157–177.
- ZANG, C. (2009): bootRes: Bootstrapped Response and Correlation Functions. R package version 0.2, URL <http://cran.r-project.org/web/packages/bootRes/>.

Nachruf

Dr. KARL-FRIEDRICH WENTZEL zum Gedenken

Am 17. Juni 2011 verstarb der Nestor der westdeutschen Rauchschadensforschung und engagierte Pionier der Bekämpfung immissionsbedingter Waldschäden, Herr Ltd. Forstdirektor i.R. Dr. KARL-FRIEDRICH WENTZEL, in Wiesbaden. KARL-FRIEDRICH WENTZEL wurde 1918 in Rostock geboren. Nach Kriegszeit und Abschluss seines Studiums begann er seine forstliche Tätigkeit 1952 als forstlicher Wirtschaftsberater in der Landwirtschaftskammer Rheinland. Nach seiner Promotion war er von 1957 bis 1965 an der nordrheinwestfälischen Landesstelle für Immissions- und Bodennutzungsschutz in Bochum und Essen tätig. Die damalige Erfassung der Rauchschäden an den Wäldern des Ruhrgebiets war prägend für sein weiteres forstliches Berufsleben. Er wollte sich mit den von ihm dort festgestellten Schäden nicht abfinden und schlug schon früh eine drastische Reduktion der Schwefeldioxidbelastungen vor. Seine mit viel Zivilcourage vorgetragenen Bedenken stießen allerdings in der Zeit des Wirtschaftswunders zunächst auf wenig Zustimmung. Er war seiner Zeit weit voraus.

1965 wurde Dr. WENTZEL als Referatsleiter für Landespflege und Naturschutz in das Hessische Ministerium

für Landwirtschaft und Forsten berufen. Er war damit einer der ersten Forstleute, die eigenständig in diesem Bereich tätig waren. Schließlich übernahm Herr Dr. WENTZEL die Leitung der ökologischen Abteilung an der Hessischen Landesanstalt für Umwelt. Die Arbeit von Dr. WENTZEL ist in ca. 80 Veröffentlichungen in Zeitschriften und Büchern dokumentiert und fand auch im internationalen Raum große Anerkennung. Selbst nach Ende seiner Dienstzeit brachte sich Dr. WENTZEL mit ganzer Kraft in die Diskussion der immissionsbedingten Waldschäden ein. Sein letztes Buch mit dem Titel „Was bleibt vom Waldsterben? Bilanz und Denkanstöße zur Neubewertung der derzeitigen Reaktion der Wälder auf Luftschadstoffe“ erschien 2001 in der Schriftenreihe des Instituts für Forstpolitik der Universität Freiburg.

Im Jahr 1982 wurde Dr. KARL-FRIEDRICH WENTZEL anlässlich des Deutschen Naturschutztages in Kassel mit dem Bundesverdienstkreuz am Bande ausgezeichnet. 1984 wurde Dr. WENTZEL in der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg mit dem Wilhelm-Leopold-Pfeil-Preis ausgezeichnet.

K.-R. VOLZ