

Einfluss der Witterung auf den Dickenzuwachs der exotischen *Thuja plicata* und der einheimischen *Picea abies* in Süddeutschland

(Mit 2 Abbildungen und 4 Tabellen)

REBECCA SCHLÜTER^{2,*}, MANUEL J. STEINBAUER², SABINE REMMELE¹ und GREGOR AAS²)

(Angenommen Dezember 2015)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Thuja plicata; *Picea abies*; Bohrkerne; Witterung; Witterungskorrelation.

Thuja plicata; *Picea abies*; increment cores; weather; weather correlation.

1. EINLEITUNG

Im Zuge des Klimawandels muss in Mitteleuropa mit einer Erwärmung und einer veränderten jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung sowie vermehrt mit Witterungsextremen gerechnet werden (CHRISTENSEN et al., 2007; IPCC, 2007; BUNDESKABINETT, 2011). Diese Änderungen beeinflussen den Wald besonders stark, da die lange Lebensdauer von Bäumen eine schnelle Anpassung erschwert (LORENZ et al., 2008; LINDNER et al., 2010). Es ist unklar, wie sehr die heimischen Baumarten durch den Klimawandel beeinträchtigt werden (SCHMIDT, 2004; BROISINGER und TRETTER, 2007; BIEMAYER, 2008; BACHMANN et al., 2009). Nach derzeitigem Kenntnisstand ist *Picea abies* (L.) KARST., die forstwirtschaftlich wichtigste Baumart in Mitteleuropa (POLLEY und KROIHER, 2006; BMEL, 2014), besonders vom Klimawandel betroffen und wird in vielen Regionen voraussichtlich waldbaulich an Bedeutung verlieren (KÖLLING und ZIMMERMANN, 2007; LORENZ et al., 2008; KÖLLING et al., 2009). Die Bedeutung nicht-heimischer Baumarten für den Aufbau stabiler Wälder wird zunehmend diskutiert (BACHMANN et al., 2009). Der Riesen-Lebensbaum, *Thuja plicata* DONN EX D. DON, bildet in seiner Heimat, dem pazifischen Nordwesten Nordamerikas, produktive Wälder (BAUCH, 1975; MINORE, 1990; EARLE, 2014). Uns ist keine Studie bekannt, die in Mitteleuropa den Einfluss des Klimas auf das Wachstum von *T. plicata* im Vergleich zu *P. abies* analysiert und so eine Abschätzung erlaubt, ob *Thuja* eine Alternative zur Fichte im Klimawandel darstellt. Das klimatisch heterogene, natürliche Areal von *T. plicata* (RUSSELL und KRAKOWSKI, 2010) lässt eine große Toleranz gegenüber variablen Klima-

und Witterungsbedingungen erwarten (SCHMIEDINGER et al., 2010). Deshalb nehmen wir an, dass *T. plicata* auf die zunehmende Variabilität von Klima und Witterung weniger sensibel reagiert als *P. abies*. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde in süddeutschen Beständen das Dickenwachstum beider Baumarten anhand von Bohrkerne analysiert und der Zusammenhang zwischen Wachstum und Witterungsparametern getestet.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchte Bestände und Probennahme

Untersucht wurden 177 Individuen (88 *Thuja plicata* und 89 *Picea abies*, Alter zwischen 35 und 57 Jahren) aus sechs Beständen mit beiden Baumarten an den drei Standorten Nordost-Schwarzwald (Bestände Gültlingen Exotenwald und Gültlingen Heimen), Mittlerer Schwarzwald (Bestände Bad Peterstal und Hausach) und Frankenwald (Bestände Rothenkirchen und Nordhalben) (Tab. 1). Bei keinem der untersuchten Bestände ist die genaue Herkunft des Saatgutes der Pflanzen bekannt.

Für die Bestimmung der Jahrringbreiten wurden zwischen April und Juni 2014 bei jedem Individuum zwei Bohrkerne (im rechten Winkel zur Hangrichtung und um 180° versetzt) auf einer Stammhöhe von ca. 130 cm (BHD) entnommen. Es wurden nur vorherrschende und herrschende Bäume (Kraft'sche Baumklassen 1 und 2, KRAMER, 1988) ohne sichtbare Schäden (Verletzungen etc.) ausgewählt. Im Bestand „Gültlingen Heimen“ wurden 13 Thujen bereits im März 2013, die beiden anderen im Mai 2014 beprobt.

2.2 Jahrringanalyse

Die Messung der Jahrringbreiten erfolgte an einem Linearmesstisch (Auflösung 1/100 mm, angefertigt durch die Technische Zentrale der Universität Hohenheim) und dem PC-Programm TSAPWin Professional 4.68e (© RinnTECH) an der Universität Hohenheim (Institut für Botanik, Labor für Dendrochronologie). Die Jahrringkurven der beiden Bohrkerne eines Baumes wurden arithmetisch gemittelt. Aus den Baummittelkurven wurden Chronologien für jede Art und jeden Bestand erstellt.

Als Kriterium für die Übereinstimmung zwischen den einzelnen, baumweisen Jahrringkurven einer Chronologie wurde die mittlere Gleichläufigkeit herangezogen

¹) Universität Hohenheim, Institut für Botanik (210), Labor für Dendrochronologie, D-70593 Stuttgart.

²) Universität Bayreuth, Ökologisch-Botanischer Garten, Universitätsstraße 30, D-95447 Bayreuth.

*) Korrespondierende Autorin: REBECCA SCHLÜTER.
Hauswiesenstraße 15, D-75323 Bad Wildbad.
E-Mail: rebeccaschlueter@gmx.de

Tab. 1

**Untersuchte Bestände, Anzahl beprobter Bäume (n) und Datum der Probennahme.
Studied forest stands, number of sampled trees (n) and date of sampling.**

Standort	Bestand	Koordinaten (UTM)		Höhe üNN <i>Thuja/Picea</i>	Exposition	n <i>Thuja/Picea</i>	Probennahme
		<i>Thuja/Picea</i>					
Nordost-Schwarzwald	Gültlingen	32U E 483449	N 5387091	560/560 m	N/N	15/16	29. April 2014
	Exotenwald	32U E 483504	N 5387181				
	Gültlingen Heimen	32U E 486649	N 5390523	520/540 m	N/N	15/16	März 2013 & 07. Mai 2014
Mittlerer Schwarzwald	Hausach	32U E 435397	N 5347358	340/380 m	N/NO	15/14	21. Mai 2014
	Bad Peterstal	32U E 435319	N 5346989	500 m	N-NW	13/13	22. Mai 2014
Frankenwald	Nordhalben	32U E 674528	N 5567772	400 m	N	15/15	16. Juni 2014
	Rothenkirchen	32U E 669299	N 5574597	550 m	NW	15/15	16. Juni 2014

(OBERHUBER und MAYR, 1998). Für die Berechnungen wurden das Statistikprogramm R (Version 3.1.1) (R CORE TEAM, 2014) und das Package „dplr“ (BUNN, 2008; BUNN, 2010; BUNN et al., 2014) verwendet.

2.3 Klimadaten und Witterungs-Wachstums-Beziehungen

Daten zur Witterung stammen von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für die Bestände Rothenkirchen und Nordhalben wurden die Daten der Station Kronach (UTM 32U E 665431 N 5569249, 312 m üNN), für die Bestände Bad Peterstal und Hausach die der Station Wolfach (UTM 32U E443550 N5349369, 291 m üNN) herangezogen. Für die Bestände Gültlingen Exotenwald und Gültlingen Heimen wurden die Niederschlagswerte (nur Monatswerte) von der Station Deckenpfronn (UTM 32U E487192 N5388719, 560 m üNN), die weiteren Werte von der Station Neubulach-Oberhaugstett (UTM 32U E476432 N5388754, 570 m üNN) verwendet. Da die Daten dieser, den Beständen

nächstgelegenen Stationen jedoch nicht den kompletten Zeitraum umfassen, wurden fehlende Monatswerte mit Hilfe von linearen Modellen interpoliert. Hierfür wurden (neben der Station Neubulach-Oberhaugstett) Daten der Stationen Bad Wildbad-Calmbach (UTM 32U E468862 N5403609, 385 m üNN), Karlsruhe (UTM 32U E453591 N5432008, 112 m üNN) und Stuttgart-Echterdingen (32U E516449 N5392831, 371 m üNN) herangezogen. Das Bestimmtheitsmaß war für alle linearen Modelle sehr gut (r^2 zwischen 0,90 und 0,99).

Die Tageswerte wurden nicht modelliert, da sich hier im Gegensatz zu den Monatsmittelwerten klimatische Besonderheiten individueller Wetterlagen zu stark auswirken und deshalb eine Berechnung realistischer Werte nicht möglich ist (vgl. LÜERS et al., 2014). Da für einige Klimavariablen aber Tageswerte nötig waren, wurden mit unkorrigierten Werten der Station Bad Wildbad-Calmbach die fehlenden Tageswerte (bis auf den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2004) der Station Neubulach-Oberhaugstett so weit wie möglich ergänzt.

Tab. 2

Mittlere, maximale und minimale Jahrringbreite für *Picea abies* und *Thuja plicata* aller sechs Bestände für den Vergleichszeitraum 1978–2013 sowie das Jahr, aus dem der erste vermessene Jahrring stammt.

Mean, maximum and minimum ring-width of all six forest stands for the reference period 1978–2013 and the year with the first measured tree ring for *Picea abies* and *Thuja plicata*.

Bestände	<i>Picea abies</i>			<i>Thuja plicata</i>				
	Jahrringbreite [mm]			Jahr 1.Ring	Jahrringbreite [mm]			Jahr 1.Ring
	Max.	Min.	Mittel		Max.	Min.	Mittel	
Bad Peterstal	7,63	0,63	3,82 (100 %)	1967	13,45	0,68	5,33 (140 %)	1964
Hausach	6,86	0,47	2,92 (100 %)	1968	14,94	1,72	6,05 (207 %)	1975
Gültlingen Exotenwald	10,45	0,47	3,81 (100 %)	1964	12,01	1,35	5,61 (147 %)	1966
Gültlingen Heimen	10,22	0,32	3,77 (100 %)	1956	14,92	0,62	5,66 (150 %)	1964
Rothenkirchen	10,54	0,31	4,05 (100 %)	1978	10,65	1,03	4,29 (106 %)	1965
Nordhalben	10,29	0,41	3,97 (100 %)	1965	13,20	0,94	5,40 (136 %)	1967

Als Vegetationsperiode wurde der Zeitraum von April bis September festgelegt (siehe WITTSTOCK et al., 2012). Folgende 30 Witterungsvariablen wurden für die drei Standorte aus den Daten der Klimastationen (Monatswerte: mittlere Lufttemperatur [°C], Niederschlagshöhe [mm]; Tageswerte: Lufttemperatur [°C], Dampfdruck [hPa], maximale Lufttemperatur [°C], minimale Lufttemperatur [°C], Niederschlagshöhe [mm]) berechnet:

- mittlere Jahrestemperatur [°C];
- mittlere Lufttemperatur [°C] in der Vegetationsperiode sowie im Januar, im Juni und im August;
- Anzahl Frosttage (Tage mit Minimum-Lufttemperatur < 0°C (DWD, 2014)) im Jahr sowie im Mai;
- längste Frostperiode eines Jahres im Frühjahr (April bis Mai) und im Herbst (August bis Oktober): maximale Zahl aufeinanderfolgender Frosttage im Frühjahr bzw. im Herbst;
- Anzahl Eistage (Tage mit Maximum-Lufttemperatur ≤ 0°C (DWD, 2014)) im April, im September und im Oktober;

- Anzahl heiße Tage (Tage mit Maximum-Lufttemperatur ≥ 30°C (DWD, 2014)) im Mai;
- Wärmesumme (Summe der Differenzen zwischen mittlerer (Tages-)Lufttemperatur > 20°C und 20°C) in der Vegetationsperiode;
- Wasserdampfsättigungsdefizit (WSD) in der Vegetationsperiode, sowie im April, im Mai, im Juni, im Juli und im August: berechnet mit Hilfe der Magnus-Formel (SCHÖNWIESE, 2013) für den Sättigungsdampfdruck (mit T = Lufttemperatur) und dem tatsächlichen Dampfdruck (*e*) (Formel 1). Ein hoher Wert für WSD weist auf Stress hin, da die potentielle Transpiration der Bäume hoch ist;

$$WSD = 6,1078 \cdot \exp^{\frac{17,08085 \cdot T [^{\circ}C]}{234,175 + T [^{\circ}C]}} - e [hPa] \quad (\text{Formel 1})$$

- Niederschlagssumme [mm] im Jahr und in der Vegetationsperiode;
- Anzahl Regentage (Tage mit ≥ 0,1 mm Niederschlag (DWD, 2014)) in der Vegetationsperiode;

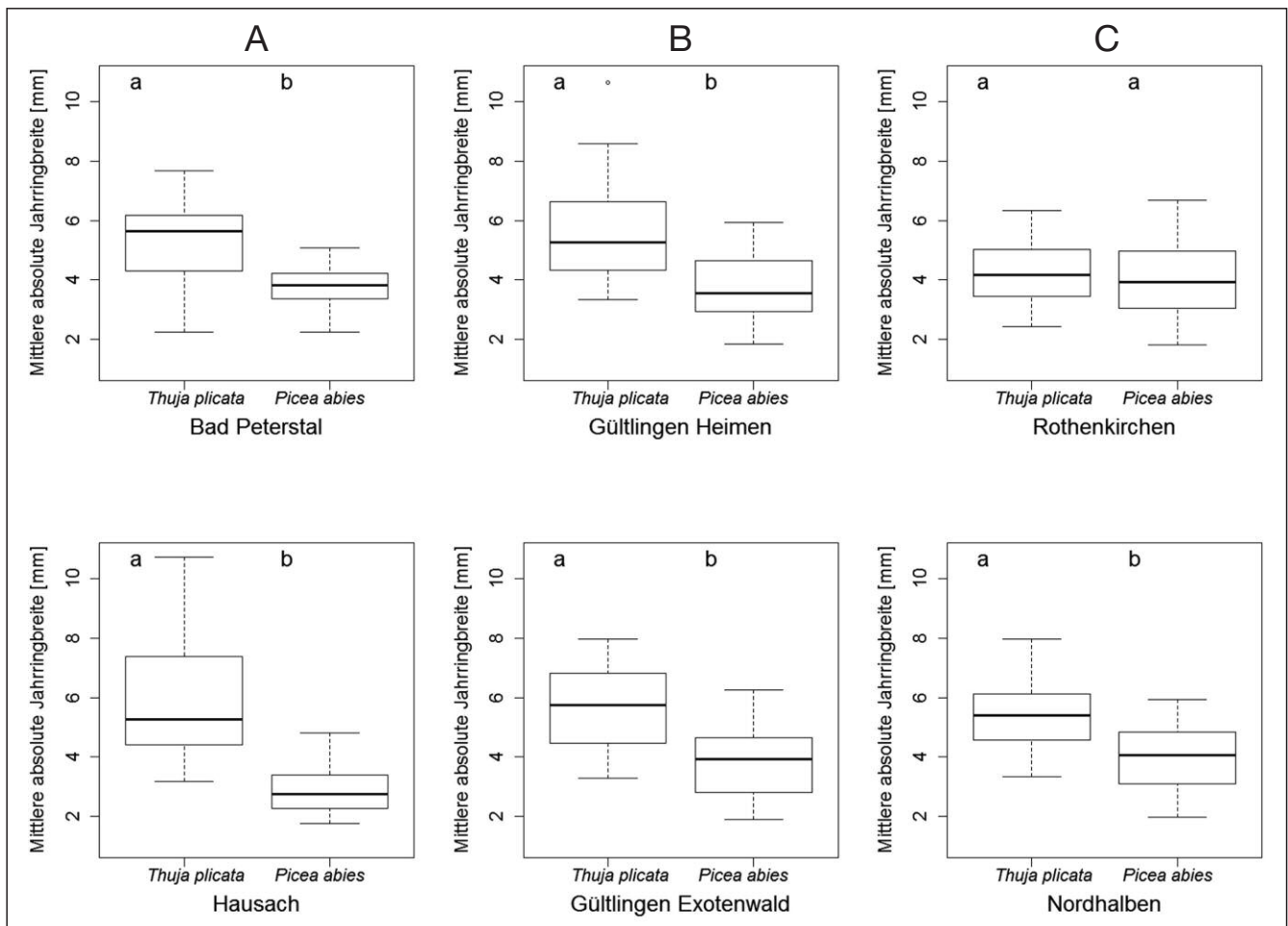


Abb. 1

Variation der mittleren absoluten Jahringbreiten von *Thuja plicata* und *Picea abies* auf den drei Standorten (A: Mittlerer Schwarzwald, B: Nordost-Schwarzwald, C: Franconwald) für den Vergleichszeitraum 1978–2013. Durch gleiche Kleinbuchstaben markierte Mittelwerte unterscheiden sich statistisch nicht signifikant ($p < 0,05$).

Variation of the mean ring-width for *Thuja plicata* and *Picea abies* on the three study sites (A: mid Black Forest, B: northeastern Black Forest, C: Franconian Forest) for the reference period 1978–2013.

The same small letters indicate no significant difference between means ($p < 0.05$).

- längste Dürreperiode in der Vegetationsperiode: maximale Zahl aufeinanderfolgender Tage ohne Niederschlag $\geq 0,1$ mm;
- Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (TI mit N_d =Niederschlagshöhe, T =mittlere Lufttemperatur, Formel 2, verwendet werden Monatsmittelwerte) im April, im Mai, im Juni, im Juli und im August. Ein niedriger Wert weist auf trockene Ver-

hältnisse hin, ein hoher Wert auf gute Wasserversorgung (DE MARTONNE, 1926; KOHNLE et al., 2014);

$$TI = \frac{N_d [mm]}{T [^\circ C] + 10} \quad (\text{Formel 2})$$

- längste Trockenphase in der Vegetationsperiode eines Jahres: maximale Zahl aufeinanderfolgender

Tab. 4

Statistischer Zusammenhang zwischen den Witterungsvariablen und dem mittleren, trendbereinigten Jahrringbreitenindex (pos./neg. = signifikant positiver bzw. signifikant negativer Zusammenhang mit $p < 0,05$, +/- = nicht-signifikant positiver bzw. nicht-signifikant negativer Zusammenhang; die Pfeile am rechten Rand markieren Variablen mit entgegengesetztem Einfluss bei beiden Arten). In die Analyse eingegangen sind die Werte aller Bäume (*Thuja*: $n = 88$, *Picea*: $n = 89$) der sechs Bestände. Die Berechnung erfolgte mit linearen gemischten Modellen („lmer“).

Statistical correlation between the climate-variables and the mean ring-width index (pos./neg. = significant positive respectively significant negative correlation with $p < 0.05$, +/- = not-significant positive respectively not-significant negative correlation; the arrows on the right side mark variables with a contrary influence in both species). Values of all trees from all six sample-sides were used for the analysis (*Thuja*: $n = 88$, *Picea*: $n = 89$). Linear mixed-effect models (“lmer”) were used for correlation.

Variable	<i>Thuja plicata</i>	<i>Picea abies</i>	
Mittlere Jahrestemperatur	-	+	←
Mittlere Temperatur in der Vegetationsperiode	-	-	
Mittlere Temperatur im Januar	-	-	
Mittlere Temperatur im Juni	neg.	-	
Mittlere Temperatur im August	-	+	←
Frosttage im Jahr	-	neg.	
Frosttage im Mai	-	neg.	
Längste Frostperiode im Frühjahr	neg.	neg.	
Längste Frostperiode im Herbst	+	+	
Eistage im April	+	pos.	
Eistage im September	+	+	
Eistage im Oktober	pos.	+	
Heiße Tage im Mai	+	pos.	
Wärmesumme in der Vegetationsperiode	neg.	neg.	
Mittleres Wasserdampfsättigungsdefizit in der Vegetationsperiode	neg.	neg.	
Wasserdampfsättigungsdefizit im April	pos.	pos.	
Wasserdampfsättigungsdefizit im Mai	neg.	pos.	←
Wasserdampfsättigungsdefizit im Juni	neg.	neg.	
Wasserdampfsättigungsdefizit im Juli	neg.	neg.	
Wasserdampfsättigungsdefizit im August	neg.	-	
Niederschlagssumme im Jahr	+	pos.	
Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode	+	pos.	
Regentage in der Vegetationsperiode	pos.	+	
Längste Dürreperiode in der Vegetationsperiode	-	-	
Trockenheitsindex im April	-	-	
Trockenheitsindex im Mai	pos.	+	
Trockenheitsindex im Juni	pos.	pos.	
Trockenheitsindex im Juli	pos.	pos.	
Trockenheitsindex im August	+	+	
Längste Trockenphase in der Vegetationsperiode	neg.	neg.	

Tage mit einem Trockenheitsindex $\leq 0,2$. Entgegen der ursprünglichen Definition wurde hierfür der Trockenheitsindex auf Tagesbasis mit Tageswerten berechnet.

Zur Berechnung der Witterungs-Wachstums-Korrelationen wurde nicht die absolute Jahrringbreite, sondern der dimensionslose Ringbreitenindex RWI (ring-width index) verwendet, um den Einfluss des Baumalters und der Konkurrenz (Bestandesdichte) auf den Zuwachs gering zu halten. Die RWI-Werte wurden über eine modifizierte exponentielle Kurve („modified negative exponential curve“, positive Steigung erlaubt (BUNN, 2008; BUNN, 2010; BUNN et al., 2014)) berechnet.

Die Variablen wurden – separat für jeden Standort – gegeneinander korreliert. Einzelne hohe Korrelationen ($>0,7$ bzw. $<-0,7$) wurden akzeptiert, aber keine Variablenkombination zeigte an allen drei Standorten eine hohe Korrelation. In linearen gemischten Modellen wurde der Einfluss aller 30 Witterungsvariablen auf die Jahrringbreite (RWI) von *Thuja* und *Picea* für alle Bestände zusammen getestet. Die sechs Bestände und die drei Standorte wurden im Modell als zufällige Effekte („random effects“) berücksichtigt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) wurde mittels Anova über den Vergleich mit dem Nullmodell bestimmt, das Signifikanzniveau auf 95% festgelegt (p-Wert $<0,05$). Für alle Berechnungen und grafischen Darstellungen wurden das Statistikprogramm R (Version 3.1.1) (R CORE TEAM, 2014) und die Packages „stats“, „lme4“ (BATES et al., 2014a; BATES et al., 2014b), „dplr“ (BUNN, 2008; BUNN, 2010; BUNN et al., 2014) und „calibrate“ (GRAFFELMAN, 2013) verwendet.

3. ERGEBNISSE

3.1 Jahrringbreiten

3.1.1 Absolute Jahrringbreiten

Mit einer mittleren Jahrringbreite für den Vergleichszeitraum 1978–2013 von 5,39 mm ($\pm 1,53$ mm) hatte *Thuja plicata* (n = 88) deutlich breitere Jahrringe als die Fichte (3,72 mm, $\pm 1,08$ mm, n = 89) (Tab. 2, Abb. 1). In den einzelnen Beständen lag die mittlere Jahrringbreite von *Thuja* mit einer Ausnahme (Rothenkirchen: 4,29 mm) eng zwischen 5,33 mm (Bad Peterstal) und 6,05 mm (Hausach). Bei *Picea abies* schwankte der mittlere Radialzuwachs der einzelnen Bestände zwischen 2,92 mm (Hausach) und 4,05 mm (Rothenkirchen). Der Unterschied zwischen den Arten war im Bestand Hausach am stärksten (*Thuja* + 107%). Betrachtet man die Einzelbäume, war sowohl die maximal als auch die minimal erreichte Jahrringbreite bei *Thuja* immer größer als bei Fichte.

3.1.2 Wachstumsverlauf

Die Thujen zeigten in den Beständen Bad Peterstal, Hausach, Gültlingen Exotenwald und Nordhalben einen ähnlichen Verlauf der Jahrringkurven (Abb. 2). Das Wachstum verlief bei *Thuja* und bei Fichte größtenteils synchron. Mit Ausnahme von Rothenkirchen lag der

jährliche Dickenzuwachs von *T. plicata* spätestens ab Mitte der 1990er Jahre immer über dem von *P. abies*.

Die Übereinstimmung der einzelnen Jahrringkurven, ausgedrückt über die mittlere Gleichläufigkeit, war für alle Bestände ähnlich (Tab. 3).

3.2 Witterung-Wachstums-Beziehungen

Für die Analyse der Witterung-Wachstums-Beziehungen wurden für jede Baumart alle Bestände zusammengefasst. Bei fast allen Klimavariablen war bei *Thuja plicata* und *Picea abies* der Einfluss auf die Jahrringbreite gleichgerichtet positiv oder negativ (Tab. 4). Insgesamt waren von den 30 Variablen bei *T. plicata* neun (*P. abies* acht) signifikant negativ und sechs (*P. abies* acht) signifikant positiv mit der Jahrringbreite korreliert. Ein hohes Wasserdampfsättigungsdefizit im Mai war die einzige Variable, die sich auf den Zuwachs signifikant unterschiedlich (*T. plicata* negativ, *P. abies* positiv) auswirkte (Tab. 4). Die Parameter mittlere Jahrestemperatur und mittlere Temperatur im August waren bei beiden Arten ebenfalls unterschiedlich mit der Jahrringbreite korreliert (negativ bei *T. plicata*, positiv bei *P. abies*), aber nicht signifikant.

4. DISKUSSION

4.1 *Thuja plicata* leistet größeres Dickenwachstum als *Picea abies*

Thuja plicata übertrifft *Picea abies* im Dickenwachstum. Betrachtet man alle beprobten Bäume zusammen, hatte *T. plicata* mit 5,39 mm um 45% breitere Jahrringe als *P. abies* mit 3,72 mm, wobei die Wuchsüberlegenheit in fünf der sechs Bestände bestätigt werden konnte. Größeren Dickenzuwachs von *T. plicata* gegenüber *P. abies* stellten auch KRISTÖFEL (2003) in Österreich und DAUTZENBERG (2009) in Nordrhein-Westfalen fest. Breitere Jahrringe sind möglicherweise eine arttypische Eigenschaft im Wachstum von *Thuja*, die in ihrer Heimat im Nordwesten Nordamerikas am Aufbau extrem produktiver Wälder beteiligt ist (CHEN und KLINKA, 2003). Bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit ist aber zu beachten, dass breitere Jahrringe zwar die Produktion eines größeren Holzvolumens ermöglichen, das aber nicht gleichbedeutend ist mit höherer Massenleistung, da das Holz von *T. plicata* eine geringere Dichte (Darrdichte 0,34 g/cm³ (SACHSSE, 1991)) aufweist als das von *P. abies* (0,43 g/cm³ (SACHSSE, 1984)). Zudem wächst der Riesen-Lebensbaum häufig spannrückig und im unteren Teil des Stammes flaschenförmig ausgebaucht (MINORE, 1983; DIEZ und BÜRGI, 1991, eigene Beobachtungen), mit der Folge, dass sich die Stammformen (Formzahlen) von *T. plicata* und *P. abies* unterscheiden und sich die Jahrringbreite auf Brusthöhe (BHD) unterschiedlich stark auf das Holzvolumen des gesamten Stammes auswirkt.

Bei der Interpretation der Resultate sind das Alter der beprobten Bäume und die Herkunft ihres Saatgutes zu berücksichtigen. Mit etwa 35–57 Jahren waren die Bäume aller sechs Bestände vergleichbaren Alters. Da *T. plicata* (max. Alter ca. 1000 Jahre (MINORE, 1990))

jedoch deutlich älter werden kann als *P. abies* (max. Alter ca. 600 Jahre (MAYER, 1992)), kann sich der Alterstrend unterschiedlich auf die Jahrringbreite auswirken. Aus diesem Grund wurden die Jahrringchronologien für die Witterungs-Wachstums-Korrelationen standardisiert.

Die beiden beprobten Baumarten standen nicht immer direkt auf derselben Fläche in Mischbeständen (Hausach, Gültlingen Exotenwald und Gültlingen Heimen). Auch wenn die miteinander verglichenen Thujen- und Fichtenbestände nie weit auseinander lagen, können geringe Unterschiede im Standort und in der waldbaulichen Behandlung nicht ausgeschlossen werden. Auch die Bestandsdichten und Konkurrenzverhältnisse in den einzelnen Beständen waren nicht identisch und wurden nicht methodisch erfasst.

Die Herkunft des Saatgutes der in den sechs Beständen beprobten Thujen ist nicht bekannt. Innerhalb des natürlichen Areals von *T. plicata* besteht eine große geografische Variation (Herkunftsunterschiede) bezüglich Trockenheits- und Frosttoleranz sowie Wachstum (BOYD, 1959; GROSSNICKLE und RUSSEL, 2010b; RUSSELL und KRAKOWSKI, 2010; HUBER und STORZ, 2014). Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass bei Untersuchung des Wachstums von *T. plicata* unterschiedlicher Provenienz in Mitteleuropa andere Ergebnisse erzielt werden als die vorliegenden. Analysen weiterer Bestände und die Anlage neuer Versuchsanbauten mit Pflanzen bekannter Herkunft sind nötig, um das Wachstum dieser Art unter den aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen besser zu verstehen.

4.2 *Thuja plicata* und *Picea abies* reagieren ähnlich sensibel auf Trockenstress

Das Wachstum von Bäumen wurde in den letzten Dekaden durch anthropogen bedingte Veränderungen verschiedener zuwachsrelevanter Faktoren beeinflusst. Dazu gehört der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration, die Zunahme der N-Deposition in Waldökosystemen und der Klimawandel (PRETZSCH et al., 2014). Die Veränderungen des Klimas, die auch zu einer Zunahme extremer Witterungsbedingungen führen werden (CHRISTENSEN et al., 2007; IPCC, 2007; BUNDESKABINETT, 2011), wirken sich je nach Baumart und Region sehr unterschiedlich auf das Wachstum von Bäumen aus (KÖLLING und ZIMMERMANN, 2007). Wichtigstes Ziel unserer Analysen war die Prüfung des Einflusses variabler Witterungsbedingungen auf den Dickenzuwachs der exotischen *Thuja plicata* und der einheimischen *Picea abies*.

T. plicata und *P. abies* reagieren in ihrem Zuwachs sehr ähnlich auf die Variation der Witterung. 27 der 30 getesteten Witterungsvariablen beeinflussen die Jahrringbreite beider Arten gleichgerichtet (Tab. 4). Damit im Einklang steht, dass die Jahrringchronologien beider Arten in allen Beständen weitgehend synchron verlaufen (Abb. 1).

T. plicata leidet nicht stärker unter Früh- und Spätfrösten als *P. abies*. Ein früher Beginn der Vegetationsperiode (hohes Wasserdampfsättigungsdefizit (WDS) im April, niedriger Trockenheitsindex nach DE MARTON-

NE (TI) im April, wenig Frosttage im Frühjahr) hatte bei beiden Arten einen positiven Einfluss auf das Dickenwachstum. Frostphasen im Frühjahr verzögern den Austrieb und verkürzen dadurch die Länge der Vegetationszeit oder führen durch Frostschäden zu Wachstumseinbußen. Wichtiger als hohe Niederschläge auf den zum Ende des Winters mit Wasser ausreichend versorgten Böden sind höhere Temperaturen zu Beginn der Vegetationszeit, die meist mit vielen Sonnenstunden einhergehen (vgl. GROSSNICKLE und RUSSEL, 2010a).

Hohe Temperaturen und Trockenheit (siehe u.a. WDS) im Sommer führten bei beiden Baumarten zu schmalen Jahrringen, umgekehrt eine gute Wasserversorgung zu stärkerem Dickenwachstum. Beide Arten wachsen am besten bis zu einer Jahresmitteltemperatur von 8,0°C (LORENZ et al., 2008; LESHER und HENDERSON, 2010). Höhere Temperaturen können nicht in stärkeres Wachstum umgesetzt werden, vermutlich weil gleichzeitig die Wasserversorgung limitierend ist. Die Anfälligkeit von *P. abies* gegenüber Trockenheit ist vielfach belegt (siehe z.B. KAHLE et al., 2007; ZANG et al., 2011; LÉVESQUE et al., 2014). Die große Bedeutung einer ausreichenden Wasserversorgung für das Wachstum des Riesen-Lebensbaums ergab sich auch beim Vergleich zweier Bestände in Thüringen (TRAUBOTH, 2006). Im Weinheimer Exotenwald (Baden-Württemberg) wuchs *T. plicata* in einem Mischbestand auf schlechter wasser-versorgten Standorten schlechter als *Pseudotsuga menziesii* und *Abies grandis*, auf frischem Boden dagegen deutlich besser (NOE und WILHELM, 1997). Der einzige von allen 30 hier getesteten Parametern, der sich signifikant unterschiedlich auswirkte, war das Wasserdampfsättigungsdefizit (WDS) im Mai: ein hohes Defizit führte bei *T. plicata* zu geringem Zuwachs, bei *P. abies* dagegen zu eher breiten Jahrringen.

Die durchgeführten Analysen zeigen somit deutlich, dass *P. abies* und *T. plicata* sehr ähnlich sensibel auf witterungsbedingten Trockenstress reagieren. Warmtrockene Bedingungen in der Vegetationszeit wirken sich bei beiden Baumarten negativ auf den Jahrringzuwachs aus. *T. plicata* kann demzufolge nicht als trockenheitstoleranter als *P. abies*, der in Mitteleuropa gegenüber Trockenstress sensibelsten Wirtschaftsbaumart (ZANG et al., 2011), charakterisiert werden. Die vorliegenden Resultate geben sogar Hinweise darauf, dass *T. plicata* noch empfindlicher als *P. abies* auf Trockenstress reagiert, da sich bereits ein höheres WDS im Mai signifikant und eine höhere Lufttemperatur im August tendenziell nachteilig auf das Dickenwachstum ausgewirkt haben.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die von uns angewendeten dendrochronologisch basierten Analysen des jährlichen Dickenzuwachses in Abhängigkeit von Witterungsparametern keine genauen Vorhersagen über den langfristigen, klimabedingten Trend des Wachstums von *P. abies* und *T. plicata* erlauben. Sehr wahrscheinlich wird aber der Klimawandel u. a. zu einer Zunahme von Witterungsextremen führen (CHRISTENSEN et al., 2007; IPCC, 2007; BUNDESKABINETT, 2011). Deshalb ist nicht auszuschließen, dass ein fortschreitender Klimawandel das Wachstum auch der exotischen *T. plicata* beeinträchtigt, vielleicht sogar stärker als das der heimischen

P. abies. In diesem Zusammenhang erwähnenswert sind die Ergebnisse von Modellberechnungen auf Vancouver Island (Kanada, LAROQUE und SMITH, 2005), wonach *T. plicata* als Folge zunehmend warmtrockener Sommer in ihrer Heimat deutlich geringere Radialzuwächse leisten wird.

4.3 Fazit

Thuja plicata hat bis zu einem Lebensalter von etwa 50 Jahren ein deutlich stärkeres Dickenwachstum als *Picea abies*. Beide Arten reagieren aber in ihrem Zuwachsverhalten sehr ähnlich auf die Variabilität der Witterung. Unter den aktuellen Klimabedingungen ist der Riesen-Lebensbaum eine waldbaulich leistungsfähige Baumart. Fraglich ist aber, ob er in Zeiten des Klimawandels eine Alternative für die Fichte und generell für den Aufbau stabiler, klimatoleranter Wälder in Mitteleuropa ist.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Angesichts des Klimawandels wird die Frage diskutiert, ob zukünftig in der Forstwirtschaft vermehrt auch nicht-heimische Baumarten für den Aufbau stabiler Wälder notwendig sind. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die nordamerikanische *Thuja plicata* eine geeignete Baumart für den Aufbau klimastabiler Wälder in Mitteleuropa ist.

Analysiert wurde das jährliche Dickenwachstum von *T. plicata* und *Picea abies*, sowie die Abhängigkeit der Jahrringbreite von Witterungsparametern. Zugrunde lag die Hypothese, dass der exotische Riesen-Lebensbaum höhere Zuwächse leistet als die einheimische Fichte und weniger sensibel auf witterungsinduzierte Stressbedingungen reagiert.

In sechs Beständen mit *T. plicata* und *P. abies* (88 bzw. 89 Bäume, Alter zwischen 35 und 57 Jahre) an drei Standorten Süddeutschlands (Frankenwald, Nordost- und mittlerer Schwarzwald, Tab. 1) wurden Bohrkerne entnommen und Jahrringchronologien erstellt. Statistisch geprüft wurde der Einfluss von insgesamt 30 Witterungsparametern auf die Variation der Jahrringbreite.

T. plicata hat im Mittel mit 5,39 mm deutlich breitere Jahrringe als *P. abies* (3,72 mm) (Tab. 2, Abb. 1). Der Verlauf der Jahrringchronologien in den einzelnen Beständen war bei beiden Baumarten ähnlich (Abb. 2). Bei beiden wird die Jahrringbreite signifikant durch eine ganze Reihe von Witterungsparametern beeinflusst (Tab. 4). Dabei ist von einer Ausnahme abgesehen (Wasserdampfsättigungsdefizit im Mai) der (statistisch signifikante) Einfluss bei *Thuja* und *Picea* jeweils gleichgerichtet. Beide Baumarten reagieren somit sehr ähnlich auf die Variabilität der Witterung und insbesondere auf deren Extreme. *T. plicata* erweist sich als nicht stärker empfindlich gegenüber Frost, aber auch nicht toleranter gegenüber Trockenheit. *T. plicata* ist unter den aktuellen Klimabedingungen eine in Mitteleuropa forstlich leistungsfähige Baumart. Fraglich ist aber, ob sie bei zunehmend wärmerem Klima in Mitteleuropa eine waldbauliche Alternative zu *P. abies* darstellt und sich für den Aufbau stabiler, klimatoleranter Wälder eignet.

6. SUMMARY

Title of the paper: *The influence of weather conditions on the radial growth of the exotic Thuja plicata and the native Picea abies in southern Germany.*

Current climate change projections predict general warming and altered seasonal distribution of precipitation as well as increased occurrence of extreme weather conditions in Central Europe. It is unclear if and how well native tree species can cope with these changes. The commercially most important tree species in Central Europe is *Picea abies* (Norway spruce). According to our current knowledge, *P. abies* is particularly affected by climate change. It is expected to be less relevant for forestry in many regions in the future. Non-native tree species may be increasingly necessary in future forestry. In this context, it is particularly interesting whether the North American *Thuja plicata* (western redcedar) is a suitable species for stable forests in future Central Europe.

The annual radial growth of *T. plicata* and *P. abies* was analysed as well as the dependence of the ring-width on climate and weather parameters. It was hypothesized that the exotic western redcedar has higher radial growth rates and is less sensitive to drought stress than the native Norway spruce.

Tree ring chronologies from six forest stands with *T. plicata* and *P. abies* (overall 88 and 89 trees respectively, 35 to 57 years old) in southern Germany (Franconian Forest, northeastern and mid Black Forest, Tab. 1) were investigated. The influence of 30 weather parameters on the variation of the annual ring-width was tested statistically.

The average ring-width of *T. plicata* (5.39 mm) was conspicuously higher than that of *P. abies* (3.72 mm) (Tab. 2, Abb. 1). The pattern on the tree ring chronology curves in each population was similar in both species (Abb. 2). The ring-width of both species is significantly influenced by a number of climate and weather parameters (Tab. 4). With one exception (water vapor saturation deficit in May), the significant influence was qualitatively similar in each case for *Thuja* and *Picea*. Therefore both tree species react very similar to the variation of climate and weather and in particular to their extremes. *T. plicata* is found to be not more sensitive to frost, but also not more tolerant to drought. Western redcedar is a highly productive forestry tree species in Central Europe under the current climatic conditions. However considering the present results, it is questionable if western redcedar will show good growth under changing future climate conditions and specifically if it is a better alternative for Norway spruce in times of global climate change.

7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Influence des intempéries sur la croissance en diamètre de l'espèce exotique Thuja plicata et de l'espèce autochtone Picea abies en Allemagne du Sud.*

Au regard des changements climatiques, est ici discutée la question de savoir s'il est nécessaire de multiplier les espèces ligneuses exotiques dans la gestion forestière

de l'avenir pour obtenir des forêts plus stables. Dans ce contexte se pose ainsi la question suivante: le *Thuja plicata* nord-américain est-il l'espèce ligneuse adéquate pour avoir des forêts plus stables par rapport au climat, en Europe centrale?

La croissance annuelle en diamètre de *Thuja plicata* et de *Picea abies* a été analysée, de même que la relation de dépendance entre la largeur des cernes et les paramètres météorologiques. Comme fondement a été posée l'hypothèse que l'arbre exotique géant avait un accroissement plus fort que l'épicéa autochtone et réagissait de manière moins sensible que lui aux conditions de stress induites par les intempéries.

Dans six peuplements composés de *Thuja plicata* et de *Picea abies* (88, respectivement 89 arbres, d'âge compris entre 35 et 57 ans) situés dans trois stations écologiques différentes de l'Allemagne du Sud (forêt de Franconie, forêt noire du Nord-Est et centrale, *Tabl. 1*), des carottes ont été extraites du cœur des arbres et la dendrochronologie ainsi établie. L'influence de 30 paramètres météorologiques sur la variation de la largeur annuelle de cernes a été vérifiée de manière statistique.

Thuja plicata présente une moyenne de largeur de cernes annuelles de 5,39 mm, soit nettement plus forte que chez *Picea abies* (3,72 mm) (*Tabl. 2, Fig. 1*). Le déroulement de la dendrochronologie dans chaque peuplement a été identique pour les deux espèces (*Fig. 2*). Chez les deux espèces, la largeur de cernes annuelles est influencée significativement par toute une série de paramètres météorologiques (*Tabl. 4*). Ce faisant, on observe comme une exception (déficit de saturation en vapeur d'eau en mai), l'influence (statistiquement significative) chez *Thuja* et *Picea*, variant dans le même sens. Les deux espèces ligneuses réagissent ainsi de manière très semblable à la variabilité aux intempéries et particulièrement aux phénomènes extrêmes. *T. plicata* se présente comme pas plus sensible au gel mais aussi pas plus tolérant à la sécheresse. *T. plicata* est une espèce ligneuse forestière productive en Europe centrale, dans les conditions climatiques actuelles. Mais on peut se demander si cette espèce se présente comme une alternative sylvicole à *P. abies* dans des conditions d'augmentation de température en Europe centrale et si elle est l'espèce adéquate pour constituer des forêts plus stables et plus tolérantes aux variations climatiques.

8. DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt Dr. ALEXANDER LAND und Dr. REINER ZIMMERMANN von der Universität Hohenheim (Institut für Botanik, Labor für Dendrochronologie) für die tatkräftige Unterstützung bei der Probennahme, Probenaufbereitung und Probenanalyse. THERESE BRUNNER (Universität Hohenheim) danken wir für die Bereitstellung ihrer Proben aus Gültlingen Heimen.

Wir danken den zuständigen Revierleitern der Forstreviere: REINHARD BRAUN (Hinteres Renchtal), LUTZ ENDRES (Wildberg), TASSILO HADERLEIN (Zeyern), HERBERT HEINE (Fischerbach) und DIETER SONNTAG (Rothenkirchen) bzw. dessen Vertretung MAXIMILIAN HEINDL (Ködel).

Weiterhin geht Dank an BERNHARD METTENDORF (Amt für Waldwirtschaft Ortenaukreis), OTTMAR RUPPERT (LWF) und MICHAEL WOHLWEND (Universität Bayreuth).

9. LITERATUR

- BACHMANN, M., M. KONNERT und A. SCHMIEDINGER (2009): Vielfalt schaffen, Risiko verringern – Gastbaumarten als Alternativen zur Fichte. LWF Wissen **63**, S. 22–30.
- BARTELS, A. (1993): Gehölzkunde. UTB, Stuttgart, S. 59.
- BATES, D., M. MAECHLER, B. BOLKER und S. WALKER (2014a): lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1-7, <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- BATES, D., M. MAECHLER, B. BOLKER und S. WALKER (2014b): lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. ArXiv e-print; submitted to Journal of Statistical Software, <http://arxiv.org/abs/1406.5823>.
- BAUCH, J. (1975): Dendrologie der Nadelbäume und übrigen Gymnospermen. Band 2603 von Sammlung Göschen. De Gruyter, 188 S.
- BIERMAYER, G. (2008): Quo vadis – Forstwirtschaft im Zeichen des Klimawandels. AFZ – Der Wald **15**, 63. Jahrgang, S. 808–810.
- BMEL (2014): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Das wichtigste in Kürze. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn. <http://www.bundeswaldinventur.de/enid/b1c34f94402db19a1a4eeeb5191f1436,0/31.html>, letzter Zugriff 05.10.2014.
- BOYD, R. (1959): Silvics of western redcedar. Misc. Pub. No. 20, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, Ogden, Utah, 14 S.
- BROSINGER, F. und S. TRETTER (2007): Waldbau im Zeichen des Klimawandels. LWF aktuell **60**, S. 21–23.
- BUNDESKABINETT (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 93 S. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan_anpassung_klimawandel_bf.pdf, letzter Zugriff 18.09.2014.
- BUNN AG (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). Dendrochronologia **26** (2), S. 115–124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
- BUNN AG (2010): Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. Dendrochronologia **28** (4), S. 251–258, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>.
- BUNN, A., M. KORPELA, F. BIONDI, F. CAMPELO, P. MÉRIAN, M. MUDELSEE, F. QEADAN, M. SCHULZ und C. ZANG (2014): dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.0. <http://CRAN.R-project.org/package=dplR>.
- CHEN, H. und K. KLINKA (2003): Aboveground productivity of western hemlock and western redcedar mixed-species stands in southern coastal British Columbia. Forest Ecology and Management **184**, S. 55–64.
- CHRISTENSEN, J. H., B. HEWITSON, A. BUSUIOC, A. CHEN, X. GAO, I. HELD, R. JONES, R. K. KOLL, W.-T. KWON, R. LAPRISE, V. MAGAÑA RUEDA, L. MEARN, C. G. MENÉNDEZ, J. RÄISÄNEN, A. RINKE, A. SARR und P. WHETTON (2007): Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLO-

- MON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR, H. L. MILLER (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DAUTZENBERG, H. (2009): *Thuja plicata*. In: Burgholz – Geschichte und Perspektiven eines Versuchsreviers im Zeichen des Klimawandels. Heft 19 der Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen. Herausgeber: Landesbetrieb Wald und Holz NRW. S. 45.
- DE MARTONNE, E. (1926): Aréisme et indice aridite. *Comptes Rendus de L'Acad. Sci., Paris* **182**: S. 1395–1398.
- DIETRICH, H.-P., S. RASPE und A. SCHUBERT (2004): Trockenheit 2003 war nicht die einzige Ursache für starke Zuwachsverluste. *LWF aktuell* **43**, S. 14–16.
- DIEZ, C. und A. BÜRGI (1991): Wuchsleistung und Qualität von Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco), Riesen-Lebensbaum (*Thuja plicata* Donn) und Roteiche (*Quercus rubra* L.) in der Schweiz. *Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* **329**, S. 26–29.
- DWD (2014): Online Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienstes, 1996-2014. <http://www.dwd.de/lexikon>, letzter Zugriff 20.10.2014.
- EARLE, C. J. (2014): *Thuja plicata* (western redcedar) description. © 2013 The Gymnosperm Database, last modified 2014-08-17. http://www.conifers.org/cu/Thuja_plicata.php, letzter Zugriff 21.08.2014.
- GRAFFELMAN, J. (2013): calibrate: Calibration of Scatterplot and Biplot Axes. R package version 1.7.2. <http://CRAN.R-project.org/package=calibrate>.
- GROSSNICKLE, S. und J. RUSSELL (2006): Yellow-cedar and western redcedar ecophysiological response to fall, winter and early spring temperature conditions. *Annals of Forest Science* **63**, S. 1–8.
- GROSSNICKLE, S. und J. RUSSELL (2010a): Ecophysiological processes of western redcedar (*Thuja plicata*) and yellow-cedar (*Callitropsis nootkatensis*). 33–36. In: A Tale of Two Cedars: International Symposium on Western Redcedar and Yellow-Cedar. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-828, Portland, Oregon 191 S. http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr828.pdf, letzter Zugriff 11.10.2014.
- GROSSNICKLE, S. und J. RUSSELL (2010b): Physiological variation among western redcedar (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) populations in response to short-term drought. *Annals of Forest Science* **67**, 506, 11 S.
- HUBER, G. und C. STORZ (2014): Zedern und Riesenlebensbaum – welche Herkünfte sind bei uns geeignet? *LWF wissen* **74**, S. 63–70.
- IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR und H. L. MILLER, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin.
- KAHLE, H.-P., A. MUTSCHLER und H. SPIECKER (2007): Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress – Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. *DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2007*. S. 6–16.
- KOHNLE, U., T. WOLF, K. v. WILPERT und C. YUE (2014): Wachstumstrends der Hauptbaumarten in Südwestdeutschland. *AFZ – Der Wald* **12**, S. 6–8.
- KÖLLING, C. und L. ZIMMERMANN (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **67**, Nr. 6, S. 259–268.
- KÖLLING, C., T. KNOKE, P. SCHALL und C. AMMER (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* **80**, S. 42–54.
- KRAMER, H. (1988): *Waldwachstumslehre*. Parey, Hamburg und Berlin, S. 77.
- KRISTÖFEL, F. (2003): Über Anbauversuche mit fremdländischen Baumarten in Österreich. *Bundesamt und Forschungszentrum Wald BFW-Bericht* **131**, S. 23–31.
- LAROQUE, C. und D. SMITH (2005): Predicted short-term radial-growth changes of trees based on past climate on Vancouver Island, British Columbia. *Dendrochronologia* **22**, S. 163–168.
- LESHER, R. und J. HENDERSON (2010): Ecology and distribution of western redcedar and Alaska yellowcedar in northwestern Washington. 13–18. In: A Tale of Two Cedars: International Symposium on Western Redcedar and Yellow-Cedar. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-828, Portland, Oregon 191 S. http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr828.pdf, letzter Zugriff 11.10.2014.
- LÉVESQUE, M., A. RIGLING, H. BUGMANN, P. WEBER und P. BRANG (2014): Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. **197**, S. 1–12.
- LINDNER, M., M. MAROSCHEK, S. NETHERER, A. KREMER, A. BARBATI, J. GARCIA-GONZALO, R. SEIDL, S. DELZON, P. CORONA, M. KOLSTRÖM, M. J. LEXER und M. MARCHETTI (2010): Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* **259**, S. 698–709.
- LORENZ, M., W.-U. KRIEBITZSCH, M. REUTER und M. KÖHL (2008): Wirkungen des Klimawandels auf Bäume und Wälder. In: Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken – Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Herausgeber: J. L. LOZÁN, H. GRABL, G. JENDRITZKY, L. KARBE, K. REISE, unter Mitwirkung von W. A. MAIER. S. 103–107.
- LÜERS, J., M. SOLDNER, J. OLESCH und T. FOKEN (2014): 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe – Homogenisierung der Bayreuther Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten. *Arbeitsergebnisse Nr. 56*, Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie.
- MAYER, H. (1992): *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. 4., teilweise neu bearbeitete Auflage, S. 77 und 160.
- MINORE, D. (1983): *Western Redcedar – A Literature Review*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Generic Technical Report PNW-150, 70 S.
- MINORE, D. (1990): *Western Redcedar*. In: RUSSELL, M. BURNS, BARBARA, H. Honkala, tech. coords. *Silvics of*

- North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877 p. http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/Volume_1/thuja/plicata.htm, letzter Zugriff 17.10.2013.
- NOE, E. und U. WILHELM (1997): Der Exotenwald in Weinheim 1872–1997. In: Versuchsanbauten mit nicht heimischen Baumarten – Historische Entwicklung in Baden-Württemberg. Schriftreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg Band 79, 264 S., Herausgeber: Ministerium für Ländlichen Raum Baden-Württemberg, S. 146–147.
- OBERHUBER, W. und S. MAYR (1998): Dendroklimatologische Untersuchung von Kiefernbeständen (*Pinus sylvestris* L.) auf Schuttmaterial des Tschirgant-Bergsturzes (Tirol). Berichte des naturwissenschaftlich medizinischen Vereins in Innsbruck, Band **85**, S. 35–45.
- POLLEY, H. und F. KROIHER (2006): Struktur und regionale Verteilung des Holzvorrates und des potenziellen Rohholzaufkommens in Deutschland im Rahmen der Clusterstudie Forst- und Holzwirtschaft. Arbeitsbericht des Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Eberswalde, S. 14–20.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL und T. RÖTZER (2014): Veränderte Dynamik von süddeutschen Waldbeständen seit 1870. LWF Wissen **76**, S. 72–87.
- R CORE TEAM (2014): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- RUSSELL, J. and J. KRAKOWSKI (2010): Yellow-cedar and western redcedar adaptation to present and future climates. 65–70. In: A Tale of Two Cedars: International Symposium on Western Redcedar and Yellow-Cedar. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-828, Portland, Oregon 191 S., http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr828.pdf, letzter Zugriff 11.10.2014.
- SACHSSE, H. (1984): Einheimische Nutzhölzer und ihre Bestimmung nach makroskopischen Merkmalen. Pareys Studentexte Nr. 44. Paul Parey, Hamburg und Berlin, 160 S.
- SACHSSE, H. (1991): Exotische Nutzhölzer. Pareys Studentexte Nr. 68. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- SCHMIDT, O. (2004): Die Tanne im Frankenwald. LWF Wissen **45**, S. 41–46.
- SCHMIEDINGER, A., M. BACHMANN, C. KÖLLING und R. SCHIRMER (2010): Gastbaumarten für Bayern gesucht. LWF aktuell **74**, S. 47–51.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2013): Klimatologie. 4. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, S. 76.
- TRAUBOTH, V. (2006): Pflanzungen des Riesenlebensbaumes (*Thuja plicata*) in Thüringen. Forst und Holz **61**, Heft 9, S. 373–376.
- UTSCHIG, H., M. BACHMANN und H. PRETZSCH (2004): Das Trockenjahr 1976 bescherte langjährige Zuwachseinbrüche. LWF aktuell **43**, S. 17–18.
- WALLÉN, C. C. (1967): Aridity definitions and their applicability. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Stockholm. Geografiska Annaler **49A**, 2–4, S. 369.
- WITTSTOCK, T., R. ZIMMERMANN und G. AAS (2012): Einfluss der Witterung auf das Radialwachstum von Sequoiadendron giganteum und *Picea abies*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **183**, 3/4, S. 55–62.
- ZANG, C., A. ROTHE, W. WEIS und H. PRETZSCH (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **182**, 5/6, S. 98–112.