

Rezente Wachstumsveränderungen der Weißtanne im 1.000 jährigen Kontext

Hans-Peter Kahle, Willy Tegel, Heinrich Spiecker

Professur für Waldwachstum, Institut für Forstwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,

SUMMARY

Recent changes in growth of silver fir in a 1.000 year context: In this report we present results to recent changes in growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) based on retrospective growth data. The tree-ring data originate from two independently generated data sets: annual tree-ring width data of mainly archaeological timber, and time series of annual radial increment of living trees. The material is divided into three regional areas of origin: East (SE-Germany, Czech Republic), Middle (S-Germany), and West (NE-France, N-Switzerland, SW-Germany). The tree-ring data include 13,549 individual series and cover continuously the period from AD 962 to 2011. The homogeneity of the data sets and time series with respect to series length, cambial age, stem diameter, growth trend and inter-series correlation is analyzed and discussed. Over the last 150 years, growth dynamics of silver fir are characterized by a long-lasting increase from 1860 to 1930, a distinctive drop from 1930-1976 and the subsequent growth boost with a maximum in the early to mid-1990s. This growth momentum is largely synchronous in all investigated data sets. By examining the intensity of the growth responses we could show, that the boost in growth after the growth depression around the year 1976 is unique in the 1,000-year period covered by the observations.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht werden Ergebnisse zu rezenten Wachstumsveränderungen der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) auf der Grundlage von retrospektiv ermittelten Zuwachsdaten dargestellt. Die verwendeten Daten entstammen zwei unabhängig generierten Datenbeständen: Jahrringbreiten von überwiegend archäologischen Hölzern, und Zeitreihen jährlicher Radialzuwächse von rezenten Bäumen. Das Material lässt sich in drei regionale Herkunftsgebiete einteilen: Ost (SO-Deutschland, Tschechische Republik), Mitte (S-Deutschland), und West (NO-Frankreich, N-Schweiz, SW-Deutschland). Die Jahrringdaten umfassen 13.549 Einzelerien und decken den Zeitraum AD 962 bis 2011 lückenlos ab. Die Homogenität der Datensätze und Zeitreihen in Bezug auf Serienlänge, Kambialalter, Stammdurchmesser, Wachstumstrend und Interserienkorrelation wird analysiert und kritisch diskutiert. Im Verlauf der letzten 150 Jahre ist die Zuwachsdynamik der Weißtanne vor allem durch einen lange anhaltenden Zuwachsanstieg von 1860 bis 1930, den markanten Abfall zwischen 1930 und 1976, und den anschließenden Zuwachsanstieg mit einem Maximum Anfang bis Mitte der 1990er Jahre charakterisiert. Diese Zuwachsdynamik verläuft weitgehend synchron in allen untersuchten Datensätzen. Anhand der Untersuchung der Intensität der Zuwachsreaktionen konnte gezeigt werden, dass die Wachstumsbeschleunigung der Weißtanne nach der Zuwachsdepression um das Jahr 1976 einzigartig ist in dem knapp 1.000 jährigen Beobachtungszeitraum.

EINLEITUNG

Die mit erhöhten Mortalitätsraten und Vitalitätseinbußen einhergehende extreme Zuwachsdepression der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in den 1970er Jahren rückte diese in den Fokus der Waldschadensforschung (vgl. ULRICH 1981). Das durch frühsummerliche Trockenheit charakterisierte Jahr 1976 markiert an vielen Standorten in Mitteleuropa einen Tiefpunkt im langfristigen Radialzuwachsverlauf der Weißtanne. Viele Tannen die diese kritische Phase überlebt haben zeigten in der Folge ein teilweise bis in die jüngere Vergangenheit andauerndes, extrem beschleunigtes Dickenwachstum. Mögliche Ursachen dieser modernen Wachstumsschwankungen der Weißtanne werden kontrovers diskutiert: der Hypothese eines primär durch Witterungs- bzw. Klimafaktoren verursachten Phänomens (z.B. KAHLE 1996) steht die einer im wesentlichen durch Veränderungen der Luftschadstoffkonzentrationen verursachten Wachstumsänderung (z.B. ELLING 2004; ELLING et al. 2009) gegenüber. In der vorgestellten Untersuchung werden die modernen Wachstumsveränderungen in den Kontext der Wachstumsdynamik der Weißtanne während des letzten Jahrtausends gestellt. Basierend auf rezenten Zuwachsdaten (überwiegend aus Südwestdeutschland) und umfangreichen Jahrringbreitendaten von archäologischen Hölzern werden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Vergleichbarkeit: Stellen die archäologischen und rezenten Zuwachsdaten homogene Zeitreihen dar?
- Wachstumsdynamik: Welche kurz-, mittel- und langfristigen Wachstumsschwankungen traten im Laufe der Zeit auf?
- Wachstumsveränderungen: Gibt es historische Analogien zu den rezenten Wachstumsveränderungen?

Mit der Beantwortung dieser Forschungsfragen leistet die Studie sowohl einen Beitrag zur Beschreibung des Phänomens als auch zur Klärung der Ursachen.

ZUWACHSDATEN

In diesem Bericht werden erste Ergebnisse zu Wachstumsveränderungen der Weißtanne (*Abies alba* Mill.) auf der Grundlage von retrospektiv, anhand von Jahrringen, ermittelten Zuwachsdaten dargestellt. Die zugrundeliegende Datenbasis setzt sich aus zwei unabhängig generierten Datenbeständen zusammen: Zeitreihen von Jahrringbreiten von überwiegend archäologischen Hölzern (DS1), und Zeitreihen jährlicher Radialzuwächse von rezenten Bäumen (DS2). Die Jahrringbreitendaten von archäologischen Hölzern wurden von Ulf Büntgen und Ko-Autoren kompiliert (BÜNTGEN et al. 2011) und für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die rezenten Zuwachsdaten wurden im Zeitraum ca. 1980-2011 im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben am Institut für Waldwachstum der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (u.a. ABETZ 1984; GERECKE 1986; KAHLE et al. 1994; KAHLE 1996; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN et al. 2013), sowie an der Abteilung Waldwachstum der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg in Freiburg (SCHÖPFER & HRADETZKY 1984; KENK et al. 1984; KOHNLE (unveröff.)) erhoben.

Büntgen et al. (2011) haben während der vergangenen Jahrzehnte mehr als 11.800 Serien absolut datierter Jahrringbreitenmessungen von archäologischen Konstruktionshölzern und von lebenden Weißtannen von Fundstellen und aus Wäldern der kollinen bis montanen (< 900 m üNN) Höhenstufe in Nordost-Frankreich, der Nord-Schweiz, Süd-Deutschland und der Tschechischen Republik zusammengestellt (BÜNTGEN et al. 2011). Die Jahrringbreite, d.h. der senkrechte Abstand zwischen benachbarten Jahrringgrenzen, wurde auf Bohrkernen und Stammscheiben gemessen. Die Entnahmehöhe der Holzproben in Bezug auf deren Lage im Baumstamm sowie die Konkurrenzverhältnisse unter denen die Bäume erwachsen sind, sind bei dem archäologischen Material nicht bekannt. In die Datenbasis der archäologischen Hölzer wurden nur Messreihen mit einer Länge von mindestens 50 Jahren aufgenommen. Die DS1-Jahrringbreitenserien lassen sich entsprechend ihrer Herkunft drei regionalen Teildatensätzen Ost“ (SO-Deutschland, Tschechische Republik), „Mitte“ (S-Deutschland), und „West“ (NO-Frankreich, N-Schweiz, SW-Deutschland), zuordnen (vgl. BÜNTGEN et al. 2011). Die DS1-Jahrringbreitenserien decken den Zeitraum AD 962-1996 lückenlos ab.

Die transformierten DS1-Jahrringbreitenchronologien wurden von Büntgen et al. (2011) dendroklimatologisch analysiert und zur Rekonstruktion extremer Frühjahrs- und Sommer-Temperaturen und Niederschläge in Mitteleuropa während des letzten Jahrtausends herangezogen. Methodische Aspekte in Bezug auf paläoklimatologische und paläoökologische Auswertungspotenziale dieser einzigartig umfangreichen Datenbasis wurden von Büntgen et al. (2012) dargestellt und diskutiert.

Die rezenten DS2-Untersuchungsbäume wurden entsprechend der jeweiligen Forschungsfragestellung gezielt ausgewählt und stammanalytisch untersucht. Die DS2-Untersuchungsbäume wurden im Rahmen von Inventuren sowie von temporären und permanenten Probeflächen auf verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg gewonnen. Mit wenigen Ausnahmen gehören sie den sozialen Baumklassen „vorherrschend“ und „herrschend“ an (KRAFT 1884). Bei den DS2-Zuwachsdaten handelt es sich um mittlere jährliche Radialzuwächse die auf Stammscheiben aus Brusthöhe (1.3 m Stammhöhe) entlang von acht einheitlich nach Himmelsrichtung ausgerichteten, äquidistanten Radien gemessen, und für den Einzelbaum zu einem jährlichen Mittelwert quadratisch gemittelt wurden. Bei konzentrischem Wachstum entspricht der mittlere jährliche Radialzuwachs der mittleren Jahrringbreite (vgl. ABETZ 1960). Bei ungleichförmigem Jahrringverlauf, oder wenn der Stammquerschnitt von der Kreisform abweicht, ist der mittlere jährliche Radialzuwachs größer als die mittlere Jahrringbreite.

In Abb. 1 ist die Verteilung der 13.549 Einzelserien über den Kalenderjahren dargestellt. Die Datenbasis enthält insgesamt 1.140.032 vermessene und datierte Jahrringe (DS1: 981.695, DS2: 158.337). In die Auswertung wurden nur Jahre mit einer Belegung von ≥ 10 Serien einbezogen. Die durchschnittliche Belegungsdichte in dem 986-jährigen Zeitraum von AD 1026 bis 2011 beträgt 1.156 Serien/Jahr. Es gibt vergleichsweise wenige Serien deren erster Jahrring auf den Zeitraum 1750 bis 1850, und deren letzter Jahrring auf den Zeitraum 1850 bis 1980 datiert. Die Belegungsdichte erreicht im Zeitraum 1840 bis 1850 mit durchschnittlich 777 Serien/Jahr ein lokales Minimum. Die absolut höchste Belegungsdichte weist das Jahr 1958 mit 3.305 Serien auf.

AUSWERTUNGSMETHODEN

Überprüfung der Homogenität

Die Homogenität der verwendeten Jahrringserien ist eine Voraussetzung für die Feststellung von Wachstumsveränderungen im Zeitablauf. Nur wenn die Zeitreihen frei sind von Inhomogenitäten, bzw. wenn die Auswirkungen von Inhomogenitäten datiert, beziffert und damit rechnerisch eliminiert werden können, lassen sich Veränderungen in den aggregierten Jahrringserien auf tatsächliche Wachstumsveränderungen zurückführen. Angesichts der Länge der verwendeten Jahrringzeitreihen und der Unterschiedlichkeit der Jahrringdatensätze in Bezug auf standörtliche Herkunft, Auswahl, Dimension und Alter der beprobten Hölzer bzw. Bäume ist die Überprüfung der Homogenität der verwendeten Datensätze für diese Studie von besonderer Bedeutung. Zur Überprüfung und Beurteilung der Homogenität werden Merkmale der Datensätze untersucht, die in einem direkten Zusammenhang stehen zu kurz-, mittel- und langfristigen Wachstumsreaktionen der Bäume. Dabei wird sowohl die Homogenität der Datensätze (Querschnitt-Homogenität) als auch die Homogenität der Zeitreihen (Längsschnitt-Homogenität) überprüft.

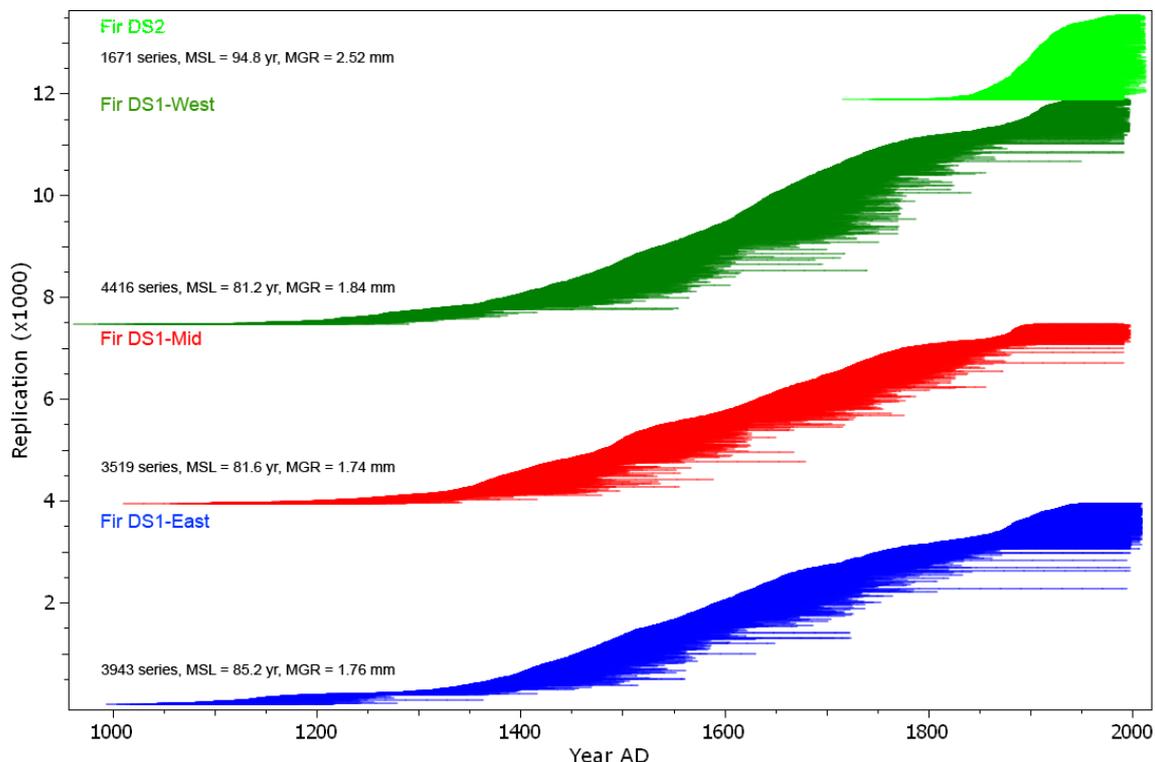


Abb. 1: Verteilung der Einzelserien über den Kalenderjahren. Jede horizontale Linie repräsentiert eine der insgesamt 13.549 Jahrringserien sortiert nach Datensatz (DS1, DS2) bzw. Region (East, Mid, West) und dem Kalenderjahr des innersten Jahrringes. MSL: Mittlere Serienlänge, MGR: Mittlere Wachstumsrate.

Merkmale zu Überprüfung der Querschnitts-Homogenität:

Mittlere Serienlänge (MSL): Die MSL gibt die über die Einzelserien gemittelte mittlere Anzahl der Jahrringe an. Anhand des Vergleichs der MSL-Werte zwischen den Datensätzen lässt sich beurteilen, ob die Datensätze bezüglich ihrer Zusammensetzung nach Kambialalter als homogen angesehen werden können.

Mittlere Wachstumsrate (MGR): Die MGR gibt die über die Einzelserien gemittelte mittlere Zuwachsrate an (mittlere Jahrringbreite, TRW, bzw. mittlerer jährlicher Radialzuwachs, *ir*). Anhand des Vergleichs der MGR-Werte zwischen den Datensätzen lässt sich beurteilen, ob die Datensätze bezüglich der mittleren Wachstumsgeschwindigkeit der Einzelserien als homogen angesehen werden können.

Mittleres Kambialalter zum Zeitpunkt der Kulmination des Zuwachses (MAC): Das MAC gibt das über die Einzelserien gemittelte Kambialalter an, zu dem der Zuwachs erstmals kulminiert. Als Zeitfenster wurde hier das Kambialalter 1 bis 18 Jahre festgelegt. Untersuchungen an einem mehr als 200, vorherrschende und herrschende Untersuchungsbäume umfassenden Weißtannen-Stammanalyse-Datensatz (FOA, ABETZ 1984) ergaben einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Mess- bzw. Probenentnahmehöhe am Stamm und dem

Eintritt der Zuwachskulmination: je höher am Stamm, um so früher tritt die Zuwachskulmination ein (z.B. Entnahmehöhe 1.3 m bzw. 6.5 m: $MAC = 10.6$ Jahre bzw. 7.5 Jahre, $p < 0.001$) (KAHLE, in Vorbereitung). Anhand des Vergleichs der MAC -Werte ergeben sich Hinweise darauf, ob die Holzproben der verschiedenen Datensätze aus den gleichen Entnahmehöhen stammen.

Merkmale zu Überprüfung der Längsschnitt-Homogenität:

Mittleres Kambialalter (MCA): Das MCA gibt die über den Kalenderjahren gemittelte Anzahl der vom Mark aus gezählten Jahrringe (Kambialalter) an. Anhand des Vergleichs des MCA zwischen den Kalenderjahren lässt sich beurteilen, ob die Zeitreihen bezüglich ihrer Zusammensetzung nach Kambialalter als homogen angesehen werden können.

Mittlerer Stammdurchmesser (MSD): Der MSD gibt den über den Kalenderjahren gemittelten Stammdurchmesser (ohne Rinde) der Einzelserien an ($MSD = 2 \times TRW$ bzw. $2 \times ir$). Anhand des Vergleichs des MSD zwischen den Kalenderjahren lässt sich beurteilen, ob die Zeitreihen bezüglich der repräsentierten mittleren Stammdimension als homogen angesehen werden können.

Mittlerer Wachstumstrend (MTG): Der MTG gibt die mittlere Richtung der Wachstumsentwicklung während einer bestimmten Kambialaltersphase an (hier festgelegt auf Kambialalter 1 bis 50 Jahre). MTG wird dargestellt als der in einem bestimmten Kalenderjahr gegebene prozentuale Anteil der Einzelserien die in der betreffenden Kambialaltersphase einen ansteigenden (positiven) oder abfallenden (negativen) Trend aufweisen. Da die Weißtanne in der Jugend eine hohe Schattentoleranz aufweist, kann sie über mehrere Jahrzehnte im Zwischen- und Unterstand, unter dem Schirm der herrschenden Bäume, verharren (MITSCHERLICH & WEIHE 1952). Solche Bedingungen führen zu einem negativen MTG . Eine frühe Abnahme des Zuwachses ist auch kennzeichnend für solitär aufwachsende Bäume, allerdings mit Zuwächsen auf höherem Niveau. Dagegen resultiert ein mit dem Baumalter zunehmender Lichtgenuss, typisch für Starkholzstämmen in stufig aufgebauten Beständen wie z.B. im Plenterwald, in einem positiven MTG (SPIECKER 1991). Der Vergleich der MTG -Anteile im Zeitverlauf lässt deshalb Rückschlüsse darauf zu, ob sich die Wachstumsbedingungen der Probestämme in der Etablierungsphase (Stangen- bis Baumholzphase) im Laufe der Zeit verändert haben.

Analyse von Wachstumsveränderungen

Die Analyse von Wachstumsveränderungen erfolgt anhand der beiden folgenden Merkmale:

Mittlere Interserienkorrelation (MIK): Die mittlere Interserienkorrelation ist die über einen bestimmten Zeitraum berechnete mittlere Korrelation zwischen den Einzelserien bzw. zwischen den Gruppenmittelwerten. Die MIK ist ein Maß für die Signalstärke (WIGLEY et al. 1984). Veränderungen von MIK im Laufe der Zeit lassen sich anhand gleitender Zeitfenster darstellen, sie weisen auf Veränderungen im Ausmaß synchroner Zuwachsvariationen hin.

Mittlere Intensität der Zuwachsreaktionen (MIR): MIR wird berechnet in Anlehnung an die von LORIMER & FRELICH (1989) und BLACK & ABRAMS (2003) beschriebene "Boundary-Line-Methode" zur Analyse von störungsbedingten Freistellungseffekten auf Waldbäume (vgl. RUBINO & MCCARTHY 2004). Dabei wird als Referenzzuwachs der mittlere Zuwachs einer zehnjährigen Periode vor dem Ereignisjahr und als Zuwachsreaktion der mittlere Zuwachs einer zehnjährigen Periode danach (inklusive dem Ereignisjahr) definiert. Gewöhnlich besteht zwischen dem Niveau des Referenzzuwachses und der relativen Zuwachsreaktion (Zuwachsreaktion geteilt durch Referenzzuwachs) ein enger inverser Zusammenhang. Deshalb wird die relative Zuwachsreaktion über dem Referenzzuwachs aufgetragen, und als Boundary-Line eine negative Exponentialfunktion an die 5%-höchsten relativen Zuwachsreaktionswerte angepasst (vgl. SPLECHTNA et al. 2005). Für jedes Kalenderjahr im Betrachtungszeitraum wird MIR als mittlere relative Zuwachsreaktion bezogen auf die Boundary-Line berechnet. Je näher die Zuwachsreaktion an der Boundary-Line, je höher also der MIR -Wert, umso höher die Reaktionsintensität unter Berücksichtigung des Referenzzuwachses. In der hier verwendeten Formulierung werden nur die positiven Zuwachsreaktionen zur Berechnung von MIR herangezogen.

Die Berechnungen wurden mit der Software GAUSS durchgeführt (APTECH 2012). Die statistische Signifikanz von Mittelwertunterschieden wurde anhand von t-Tests getestet.

ERGEBNISSE

Zur Querschnitt-Homogenität

Die mittlere Serienlänge (MSL) des archäologischen Materials liegt mit $MSL = 85.2 \pm 32.06$ Jahren (Mittelwert \pm Standardabweichung) ($DS1$ -Ost), $MSL = 81.6 \pm 26.30$ Jahren ($DS1$ -Mitte), und $MSL = 81.2 \pm 28.01$ Jahren ($DS1$ -

West) für die einzelnen Regionen in einem ähnlichen Wertebereich. Mit 94.8 ± 34.16 Jahren ist die *MSL* des rezenten Material dagegen signifikant größer ($p < 0.001$).

Auch die mittlere jährliche Wachstumsrate (*MGR*) des archäologischen Materials ist zwischen den Regionen sehr ähnlich (DS1-Ost: $MGR = 1.76 \pm 0.769$ mm, DS1-Mitte: $MGR = 1.74 \pm 0.554$ mm, DS1-West: $MGR = 1.84 \pm 0.653$ mm). *MGR* des rezenten Material ist mit 2.52 ± 0.781 mm dagegen signifikant größer ($p < 0.001$).

Das über die Jahrringserien gemittelte Kambialalter zum Zeitpunkt der Kulmination des Zuwachses (*MAC*) beträgt im gemeinsamen Analysezeitraum AD 1714 bis 1988 für das archäologische Material $MAC = 7.54 \pm 1.513$ Jahre, und für das rezente Material $MAC = 9.04 \pm 1.984$ Jahre. Auf den Gesamtzeitraum bezogen (AD 1050 bis 2010) beträgt der *MAC*-Wert für das archäologische Material 6.54 ± 1.746 Jahre. Bezogen auf beide Analysezeiträume tritt die Zuwachskulmination bei DS1 demnach signifikant früher ein als bei DS2 ($p < 0.001$).

Zur Längsschnitt-Homogenität

Das über die Kalenderjahre gemittelte Kambialalter (*MCA*) des Gesamtdatensatzes (DS1 und DS2) ist im Zeitraum AD 1050 bis 1900 sehr stabil (ohne Abb.) ($MCA = 42.1 \pm 6.34$ Jahre). Ab 1900 nimmt *MCA* stetig zu und beträgt im Zeitraum AD 1900 bis 2011 im Mittel 68.6 ± 22.30 Jahre ($p < 0.001$).

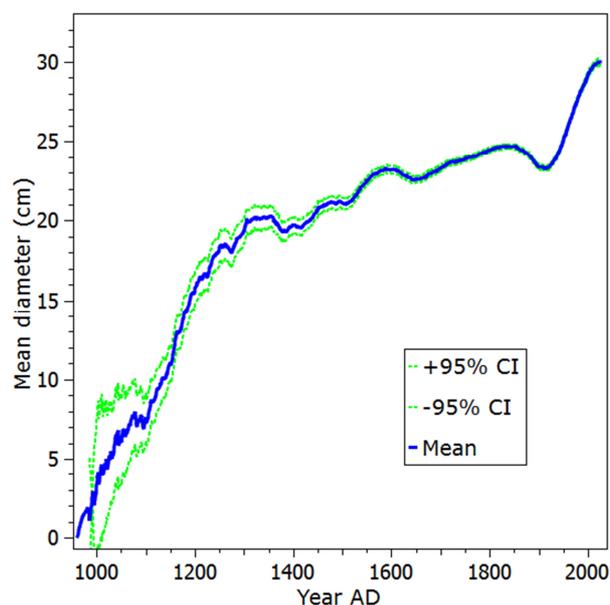


Abb. 2: Der mittlere Durchmesser über den Kalenderjahren (gestrichelt: 95 % Vertrauensintervall).

Im Untersuchungszeitraum zeigt der über die Kalenderjahre gemittelte mittlere Stammdurchmesser (*MSD*) eine gerichtete Veränderung: von < 5 cm um das Jahr AD 1000 nimmt *MSD* auf knapp 30 cm am Ende zu (Abb. 2).

Das Ergebnis zur Auswertung des mittleren Wachstumstrends ist in Abb. 3 dargestellt. Im Zeitraum AD 1350 bis 1956 weisen pro Kalenderjahr im Mittel 22.3 ± 13.0 % der Serien, deren erster Jahrring auf das betreffende Kalenderjahr fällt, einen positiven Wachstumstrend in der Kambialaltersphase 1 bis 50 Jahre auf. Es treten charakteristische periodische Schwankungen auf (vgl. Abb. 3a), die in den verschiedenen Regionen weitgehend synchron verlaufen (ohne Abb.). Im Zeitraum 1800 bis 1956 liegt der Wert mit 33.3 ± 14.47 % deutlich höher ($p < 0.001$).

In Abb. 3b sind die Zuwachsentwicklungen der Serien mit positivem bzw. negativem Wachstumstrend dargestellt. Die mittlere jährliche Zuwachsrate bis zum Kambialalter 100 Jahre beträgt $TRW = 1.89 \pm 0.290$ mm und $TRW = 1.64 \pm 0.568$ mm für die Serien mit positivem bzw. negativem Wachstumstrend.

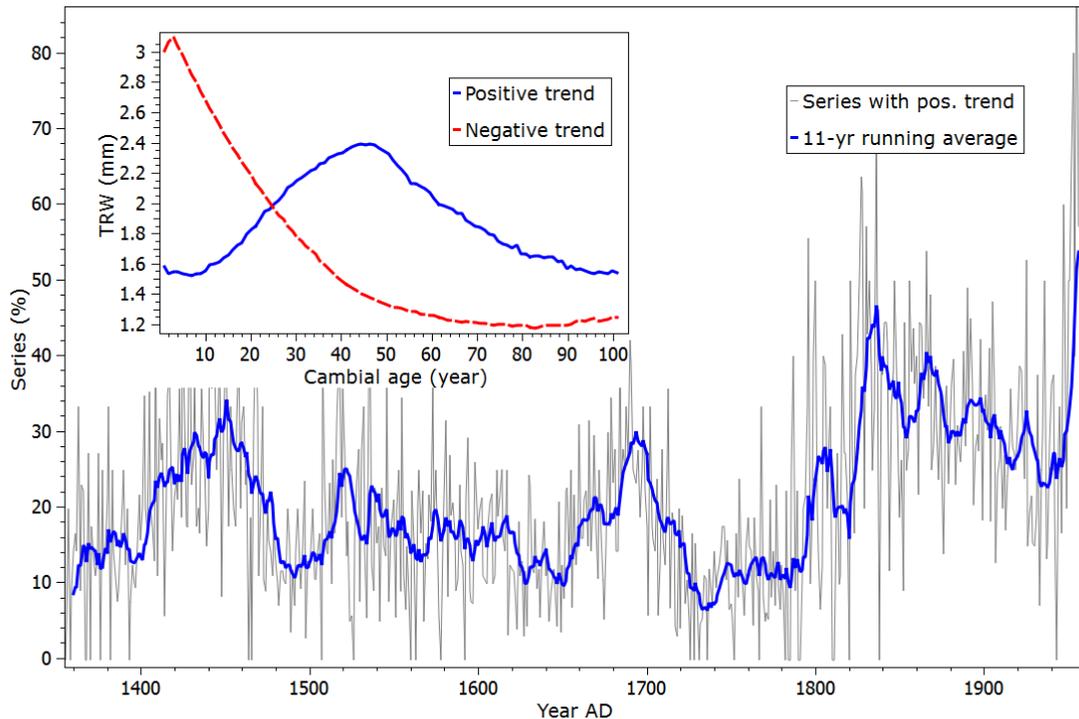


Abb. 3a (außen): Prozentualer Anteil der Serien mit ansteigendem (pos.) Wachstumstrend über den Kalenderjahren. Lokale Maxima treten um AD 1450, 1700, 1800 und 1840 auf. **Abb. 3b (innen):** Mittlerer Zuwachsverlauf über dem Kambialalter für die Serien mit positivem bzw. negativem Wachstumstrend.

Wachstumsveränderungen

Abb. 4 zeigt die Mittelwerte der Jahrringserien über den Kalenderjahren für den Gesamtzeitraum und Abb. 5 für den Zeitraum 1800 bis 2011. Die mittlere Interserienkorrelation (*MIK*) der DS1-Datensätze Ost, Mittel und West im gemeinsamen Überlappungszeitraum 1097 bis 1996 beträgt $MIK = 0.748$ ($p < 0.001$), die der DS1- und DS2-Datensätze im Zeitraum 1800 bis 1996 $MIK = 0.801$ ($p < 0.001$).

Die anhand geleiteter Zeitfenster berechneten *MIK*-Werte sind stabil und zeigen keine deutlichen Veränderungen im Zeitverlauf (ohne Abb.).

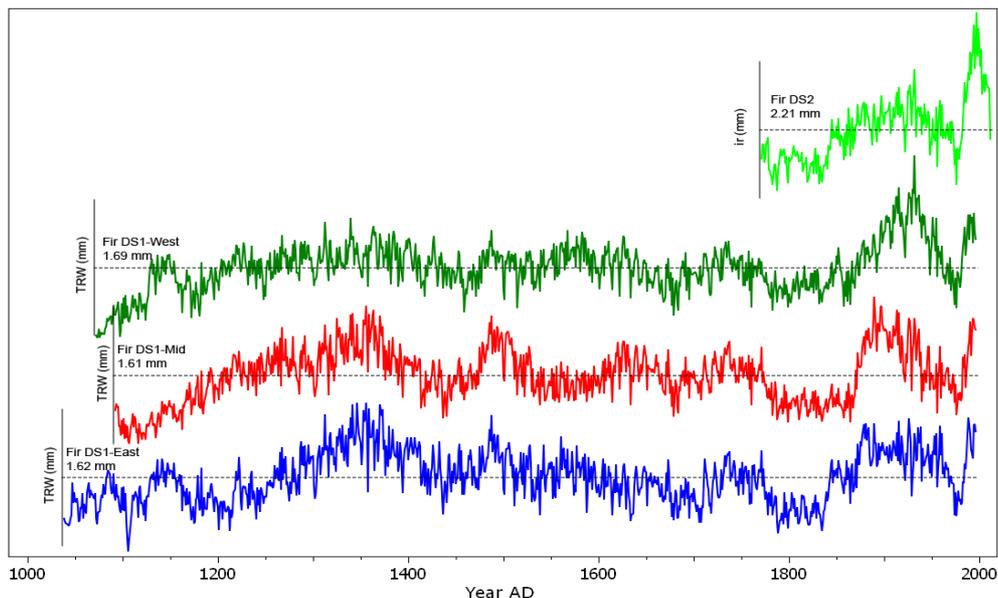


Abb. 4: Mittelwerte der Jahrringserien sortiert nach Datensatz bzw. Region über den Kalenderjahren (Jahre mit einer Belegung ≥ 10 Serien). Angegeben ist die mittlere Jahrringbreite (TRW) bzw. der mittlere jährliche Radialzuwachs (*ir*). Die y-Achsen kennzeichnen den Bereich Mittelwert ± 1 mm.

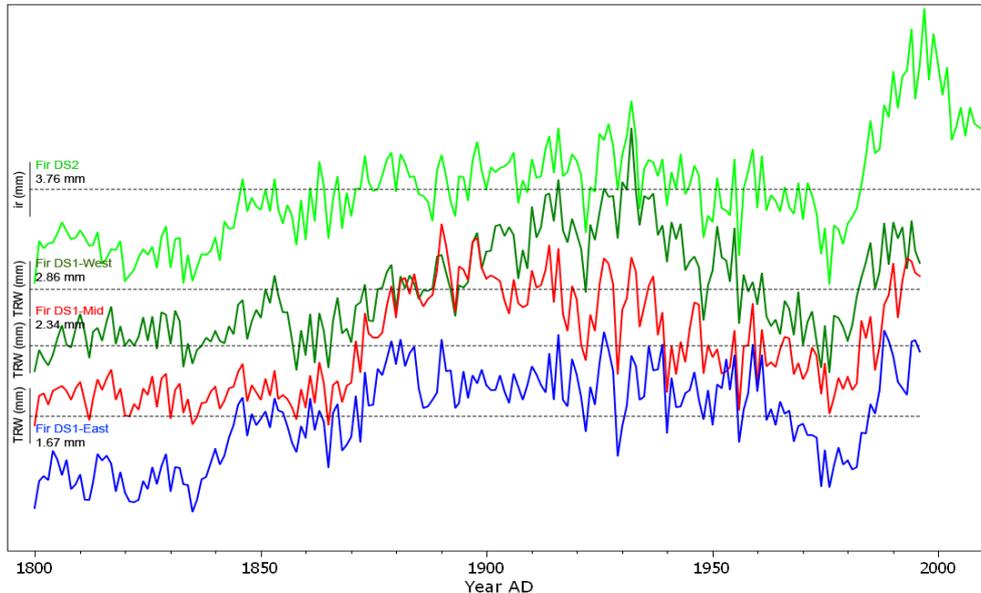


Abb. 5: Wie Abb. 4, für AD 1800 bis 2011. Die y-Achsen kennzeichnen den Bereich Mittelwert ± 0.25 mm.

Die Zuwachsdynamik im Zeitraum 1860 bis 1930 ist durch einen ansteigenden Trend gekennzeichnet (Abb. 5). Das Jahr 1932, bzw. in der Zuwachsreihe DS1-Ost das Jahr 1925, markiert ein lokales Zuwachsmaximum von dem ab der Zuwachs in allen Zuwachsreihen auf ein lokales Minimum im Jahr 1976 abfällt. Anschließend findet ein starker Zuwachsanstieg statt, der je nach Serie Anfang oder Mitte der 1990er Jahre gipfelt. Tab. 1 stellt die beschriebenen mittleren relativen Zuwachsveränderungen bezogen auf den Zuwachs während einer 50 Jahre langen Referenzperiode (1883 bis 1932) dar.

Tab. 1: Mittlere relative Zuwächse der Jahrringserien im Jahr 1976 und im Zeitraum 1992 bis 1996 in Bezug auf die Referenzperiode 1883 bis 1932.

Periode	Ta DS1-Ost	Ta DS1-Mitte	Ta DS1-West	Ta DS2	Gesamt
Zuwachs in % (Index: Mittlerer Zuwachs 1883-1932 = 100 %)					
1883-1932	100	100	100	100	100
1976	52,5	47,0	47,6	57,5	51,3
1992-1996	109,4	107,6	98,2	138,5	114,1

Bezogen auf den Zuwachs in der Referenzperiode war die Zuwachsdpression im Jahr 1976 in der mittleren und westlichen Region (DS1-Mitte und DS1-West) am größten (Tab. 1). Den geringsten Rückgang im mittleren Zuwachs 1976 zeigt DS2. Hier war auch die anschließende Wachstumsbeschleunigung am höchsten.

Abb. 6 stellt die mittleren Zuwachsverläufe der nach ihrem Trend in der Zeitperiode 1932 bis 1976 klassifizierten Jahrringserien dar. Von den analysierten 2.830 Jahrringserien weisen in der Zeitperiode 1932 bis 1976 73 % einen negativen, der Rest einen positiven Trend auf. Die Weißtannen mit negativem Trend sind in der Vorperiode (1900 bis 1931) mit $TRW = 2.47 \pm 0.223$ mm signifikant schneller gewachsen als das Vergleichskollektiv ($TRW = 1.92 \pm 0.186$ mm) ($p < 0.001$). Auf den gesamten dargestellten Zeitraum von 1900 bis 2011 bezogen, ist der mittlere Zuwachs des Kollektivs mit ansteigendem Trend jedoch größer ($TRW = 2.34 \pm 0.582$ mm bzw. $TRW = 2.14 \pm 0.511$ mm, $p < 0.01$).

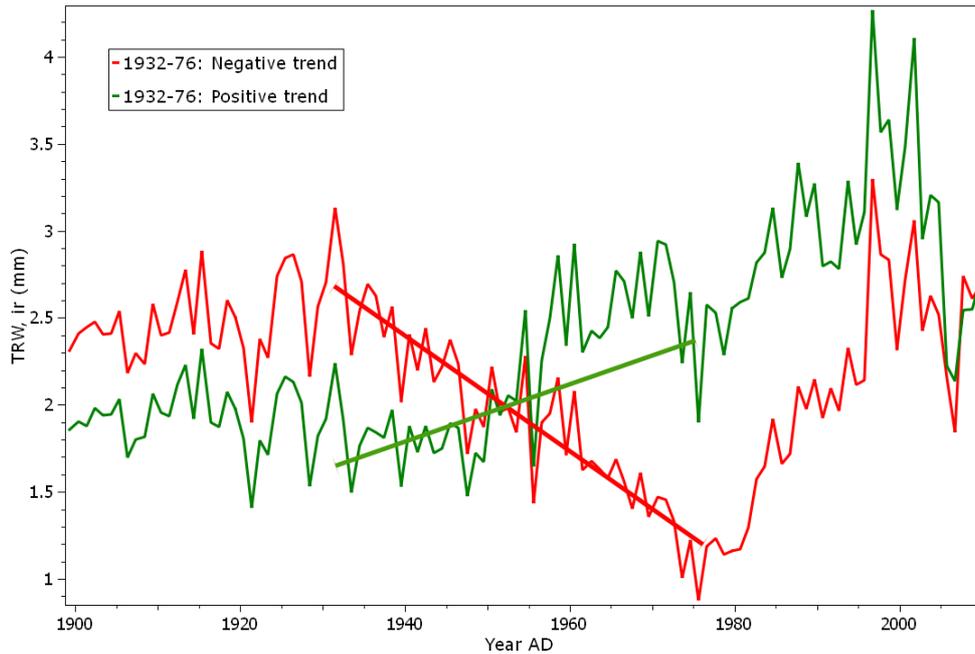


Abb. 6: Mittelwerte der Jahrringserien sortiert nach positivem bzw. negativem Wachstumstrend in der Zeitperiode 1932 bis 1976 über den Kalenderjahren. Der mittlere Trend ist jeweils mit einer durchgezogenen Linie gekennzeichnet.

Unabhängig vom Trendverlauf sind die folgenden, für alle Regionen charakteristischen negativen Weiserjahre deutlich zu erkennen: 1922, 1929, 1934, 1940, 1948, 1956 und 1976 (vgl. Abb. 5 und 6).

Die mittlere Intensität der Zuwachsreaktionen (MIR) im Zeitraum AD 1060 bis 2001 beträgt $MIR = 21.7 \pm 5.04 \%$ (Abb. 7a). Sie nimmt in den Jahren 1977 bis 1997 auf im Mittel $MIR = 44.7 \pm 8.45 \%$ zu. Mit $MIR = 57.3 \%$ wird im Jahr 1983 der absolute Maximalwert erreicht. Die Boundary-Line wurde auf der Grundlage von mehr als 300.000 Zuwachswerten berechnet (vgl. Abb. 7b).

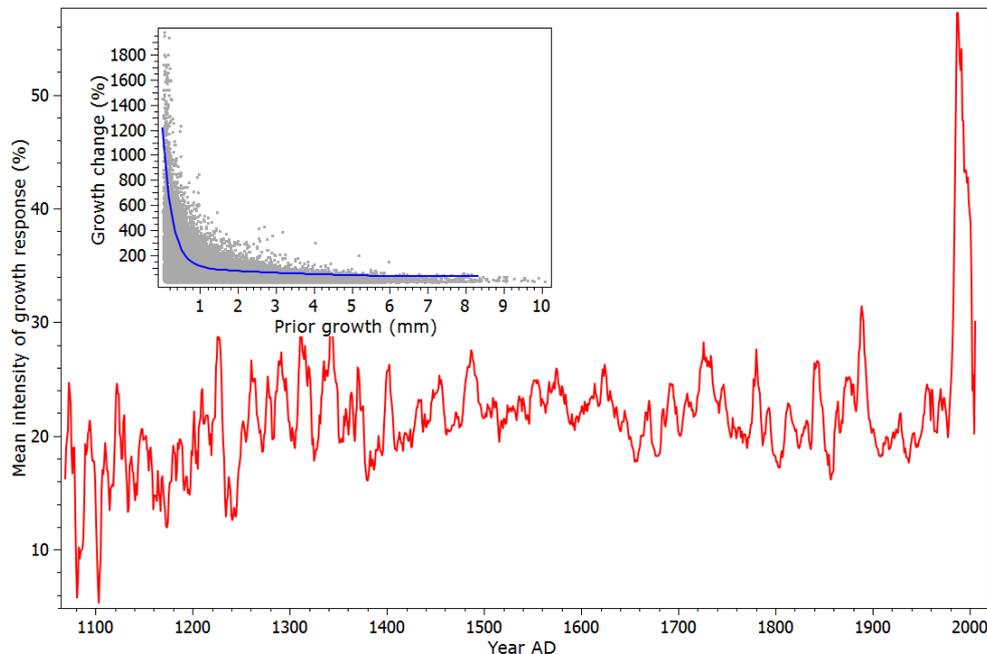


Abb. 7a (außen): Mittlere Intensität der Zuwachsreaktionen in Prozent über den Kalenderjahren (MIR). MIR von 100 % würde exakt dem Betrag der Boundary-Line entsprechen. **Abb. 7b (innen):** Relative Zuwachsänderung als Scatterplot über dem Referenzzuwachs sowie geschätzte Boundary-Line (Linie: nichtlineares Modell angepasst an die 5 % höchsten Werte).

DISKUSSION

Die mittlere Serienlänge und die mittlere jährliche Wachstumsrate des Datensatzes mit rezentem Material (DS2) ist um 15 % bzw. 42 % größer als die des Datensatzes mit überwiegend archäologischem Material (DS1). Da der Dickenzuwachs mit zunehmendem Baumalter i.d.R. nachlässt, wäre unter sonst gleichen Bedingungen zu erwarten, dass die mittlere jährliche Wachstumsrate bei DS2 geringer ausfällt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den DS2-Zuwachsdaten um mittlere jährliche Radialzuwächse handelt, die geometrisch bedingt in der Regel größer sind als die Jahrringbreiten der DS1-Daten. Außerdem handelt es sich bei den DS2-Untersuchungsgäumen ganz überwiegend um vorherrschende und herrschende Bäume die größere Stammdickenzuwächse aufweisen als Bestandesmittelstämme.

Die erste Kulmination des Zuwachses tritt bei DS1 im Mittel 1.5 Jahre früher ein als bei DS2. Dies wird als Hinweis darauf gewertet, dass das Probenmaterial von DS1 überwiegend aus höheren Stammhöhen als aus Brusthöhe (wie bei DS2) stammt. Angesichts der Tatsache, dass der überwiegende Anteil des archäologischen Materials Konstruktionsholz darstellt, erscheint dieser Befund plausibel. Anhand langfristiger Versuchsflächen konnte gezeigt werden, dass Freistellungen zu einer Zuwachsverlagerung in Richtung Stammbasis führen (ASSMANN 1961). Die Wechselwirkungen zwischen Umweltbedingungen, Standraum und Zuwachs entlang des Baumschaftes müssen folglich bei der Analyse langfristiger Wachstumsveränderungen in verschiedenen Schafthöhen berücksichtigt werden.

Das mittlere Kambialalter pendelt im Zeitraum AD 1050 bis 1900 stabil um den Mittelwert von 42 Jahren, nimmt jedoch in den jüngeren Jahren um 63 % auf 69 Jahre zu (Zeitraum AD 1900 bis 2011). Das bedeutet, dass gegen Ende des Betrachtungszeitraums die Jahrringe im Mittel deutlich älter sind als im langjährigen Mittel. Parallel dazu nimmt auch der mittlere Stammdurchmesser der vermessenen Holzproben von anfangs weniger als 5 cm auf knapp 30 cm am Ende zu. Damit sind im Mittel die jährlichen Zuwächse zu Beginn an dünnere, am Ende an dickere Stämme angelagert worden. Da der Dickenzuwachs mit zunehmendem Baumalter und zunehmendem Stammdurchmesser i.d.R. abnimmt (MITSCHERLICH 1978), wäre zu erwarten, dass der mittlere Zuwachs zum Ende des Betrachtungszeitraumes ebenfalls abnimmt. Bei der schattentoleranten Tanne, die auch in fortgeschrittenem Alter noch mit einer Zuwachssteigerung auf Freistellung reagieren kann, ist aber auch eine Zunahme des Wachstums mit zunehmendem Alter möglich (SPIECKER 1986).

Im Zeitraum AD 1350 bis 1956 zeigen pro Kalenderjahr im Mittel nur 22 % der Serien einen positiven Wachstumstrend während der ersten 50 Jahrringe. Während dieses Zeitraums weist folglich der Großteil der Bäume entweder ein durch zunehmende Konkurrenzierung durch Nachbarbäume beeinflusstes Wachstum oder einen solitärartigen Wachstumstrend auf. Im Zeitraum 1800 bis 1956 nimmt der Anteil der Serien mit positivem Wachstumstrend um 50 % auf 33 %-Punkte zu. Dies wird als Hinweis dafür gewertet, dass sich in den jüngeren Jahren das Material vermehrt aus Weißtannen zusammensetzt, die in der Jugend unter dem Schirm eines Altbestandes erwachsen sind, und mit zunehmendem Alter einen höheren Lichtgenuss erfahren haben. Solche standraumbedingten Wachstumstrends können andere umweltbedingte, z.B. durch Klimaänderung bedingte, Wachstumsveränderungen überlagern und müssen bei der Analyse und Interpretation von trendhaften Änderungen in den Wachstumsverläufen berücksichtigt werden.

Die mittlere Interserienkorrelation (*MIK*) der DS1-Datensätze Ost, Mittel und West über einen 900-jährigen Zeitraum erreicht mit $MIK = 0.748$ einen sehr hohen Wert. Der hohe *MIK*-Wert ist Ausdruck dafür, dass die hochfrequente Variation in den Jahrringserien über die Regionen hinweg maßgeblich durch ein gemeinsames synchrones Signals gekennzeichnet ist. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der DS1- und DS2-Datensätze. Welche Umweltfaktoren das Wachstum der Weißtanne entscheidend beeinflussen und zu der hohen Zuwachssynchronität über große Distanzen beitragen, konnte bislang nicht befriedigend beantwortet werden (BÜNTGEN et al. 2011; CARRER et al. 2010; DITTMAR et al. 2012; LEBOURGEOIS et al. 2010; SCHÖPFER et al. 1997). Die *MIK*-Werte zeigen keine deutlichen Veränderungen im Zeitverlauf. Dies ist bemerkenswert, da sich, wie oben besprochen, wesentliche Merkmale der Datensätze im Laufe der Zeit verändert haben.

Im Verlauf der letzten 150 Jahre ist die Zuwachsdynamik der Weißtanne vor allem durch einen lange anhaltenden Zuwachsanstieg von 1860 bis 1930, einen markanten Abfall zwischen 1930 und 1976, und den anschließenden Zuwachsanstieg mit einem Maximum Anfang bis Mitte der 1990er Jahre charakterisiert. Diese Zuwachsdynamik verläuft weitgehend synchron in allen untersuchten Datensätzen. Die Zuwachsdepression im Jahr 1976 war in der mittleren und westlichen Region mit einem Rückgang um 53 % am größten. Auf die Zuwachsdepression folgte ein rasanter Zuwachsanstieg um im Mittel 63 %-Punkte. Die Klassifikation der Jahrringserien nach ihrem Trend in der Zeitperiode 1932 bis 1976 hat ergeben, dass 73 % der Serien einen negativen, die restlichen einen positiven Trend aufweisen. Dabei zeigt sich, dass die Weißtannen mit negativem Trend, in der Vorperiode (1900 bis 1931) signifikant schneller gewachsen sind als das Vergleichskollektiv. Hervorzuheben ist, dass die Bäume die 1932 bis 1976

keinen Zuwachseinbruch zeigen, zwischen 1976 und den 1990er Jahren einen ähnlich rasanten Anstieg aufweisen wie die anderen Bäume. Die Wachstumsbeschleunigung nach 1976 kann folglich nicht primär als Erholungsreaktion interpretiert werden.

Die Synchronität der Zuwachsreaktionen zeigt sich auch bei den Extremjahren. Die negativen Weiserjahre bei Weißtanne wurden auch beschrieben von Becker et al. (1989), Bert (1993), Büntgen et al. (2011), Gärtner & Stoll (1990), Gerecke (1986), Schmid-Haas et al. (1986), und Spiecker (1991) und mit Trockenjahren (z.B.: 1922, 1934, 1947, und 1976) bzw. Frostereignissen (z.B. 1940 und 1956, vgl. Bosch & Rehfuss 1988; Mayer et al. 1988) in Zusammenhang gebracht.

Die anhand der Boundary-Line-Methode hergeleitete mittlere Intensität der Zuwachsreaktionen beträgt im Zeitraum AD 1060 bis 2001 22 %. Sie nimmt in den Jahren 1977 bis 1997 deutlich auf im Mittel 45 % zu, und erreicht im Jahr 1983 mit 57 % den absoluten Maximalwert. Selbst unter Berücksichtigung der oben diskutierten Inhomogenitäten in den Datensätzen und Zeitreihen wird an diesem Ergebnis deutlich, dass der Wachstumsspur der Weißtanne nach dem Jahr 1976 einzigartig in dem ca. 1.000 jährigen Beobachtungszeitraum ist.

Die Analysen zum Wachstumsverhalten der Weißtanne im langfristigen Kontext sind noch nicht abgeschlossen. Die weiteren Auswertungen zielen vor allem drauf ab, die Wachstumsveränderungen vor dem Hintergrund der Umweltveränderungen zu untersuchen. Dabei sollen auch die folgenden Fragen beantwortet werden: Lassen sich aus den Jahrringserien Hinweise auf Veränderungen im Störungsregime der Wälder ableiten? Wie können die Trends im Wachstum erklärt werden? Welche Zusammenhänge bestehen zwischen den Wachstumsschwankungen und den in der Literatur beschriebenen Perioden des „Tannensterbens“ (vgl. LARSEN 1986)?

DANKSAGUNG

Wir danken allen Kolleginnen und Kollegen, die in großzügiger Weise ihre wertvollen Jahrringchronologien und Zuwachsdaten für diese Analyse zur Verfügung gestellt haben. Bezüglich der Daten von archäologischen Hölzern sind dies Ulf Büntgen (Birmensdorf), Rudolf Brázdil (Brno), Karl-Uwe Heussner (Berlin), Jutta Hofmann (Nürtingen), Raymond Kontic (Basel), Tomáš Kyncl (Brno), Christian Pfister (Bern) und Kateřina Chromá (Brno). Bezüglich der Daten von rezenten Bäumen sind dies Peter Abetz, Joachim Hradetzky, Georg Kenk und Ulrich Kohnle (alle Freiburg). Die Studie wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Rekonstruktion hydro-klimatischer Schwankungen in Mitteleuropa (Nordostfrankreich und Südwestdeutschland) während der letzten 3.000 Jahre anhand dendroklimatologischer Untersuchungen historischer und rezenter Jahrringdaten“ durchgeführt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer SP 437/16-1 gefördert wird.

LITERATURVERZEICHNIS

- ABETZ, P.: Die Genauigkeit der Radialzuwachs- und Jahrringbreitenmessung mit der Eklundschen Jahrringmessmaschine an Stammscheiben und Bohrspänen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 131: 74-80, 1960
- ABETZ, P.: Forstliche Anamnese (FOA) und Referenzkurven für den Durchmesserzuwachs von Z-Bäumen. Bericht Sektion Ertragskunde im DVFF: 10-1-10/14, 1984
- APTECH Systems. Copyright. GAUSS 12.
- ASSMANN, E.: Waldertragskunde: Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München, 490 S., 1961
- BECKER, M., LANDMANN, G., LEVY, G.: Silver fir decline in the Vosges Mountains (France): role of climate and silviculture. Water, Air and Soil Pollution 48: 77-86, 1989
- BERT, G.D.: Impact of ecological factors, climatic stresses, and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Jura mountains: an ecological and dendrochronological study. Acta Oecologica 14: 229-246, 1993
- BLACK, B.A., ABRAMS, M.D.: Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria. Ecological Applications 13: 1733-1749, 2003
- BOSCH, C., REHFUESS, K.E.: Über die Rolle von Frostereignissen bei den "neuartigen" Waldschäden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 107: 123-130, 1988
- BÜNTGEN, U., BRÁZDIL, R., HEUSSNER, K.U., HOFMANN, J., KONTIC, R., KYNCL, T., PFISTER, C., CHROMÁ, K., TEGEL, W.: Combined dendro-documentary evidence of Central European hydroclimatic springtime extremes over the last millennium. Quaternary Science Reviews 30: 3947-3959, 2011
- BÜNTGEN, U., TEGEL, W., HEUSSNER, K.U., HOFMANN, J., KONTIC, R., KYNCL, T., COOK, E.R.: Effects of sample size in dendroclimatology. Climate Research 53: 263-269, 2012
- CARRER, M., NOLA, P., MOTTA, R., URBINATI, C.: Contrasting tree-ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. Oikos 119: 1515-1525, 2010

- DITTMAR, C., ELLING, T., ROTHE, A.: Elevation-specific tree-ring chronologies of Norway spruce and Silver fir in Southern Germany. *Dendrochronologia* 30: 73-83, 2012
- ELLING, W.: Schädigung, Absterben und Erholung der Weißtanne. *LWF-Wissen* 45: 33-35, 2004
- ELLING, W., DITTMAR, C., PFAFFELMOSER, K., RÖTZER, T.: 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, 2009
- GÄRTNER, R., STOLL, G.: Weiserjahre in Baden-Württemberg. *AFZ* 45: 1163-1167, 1990
- GERECKE, K.L.: Zuwachsuntersuchungen an vorherrschenden Tannen aus Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 157: 59-68, 1986
- KAHLE, H.P.: Modelling the dynamics of growth-climate relationships of Norway spruce and silver fir in high elevations of the Black Forest. *Proceedings IUFRO Conference, Section 4.01, Berggießhübel, Dresden: 93-103, 1996*
- KAHLE, H.P., HAHN, D., SPIECKER, H.: Witterungsverlauf und Wachstum von Fichten, Tannen und Buchen in Südwestdeutschland unter besonderer Berücksichtigung des Standorts und des Standraums II. *KfK-PEF* 117: 111-123, 1994
- KENK, G., KREMER, W.L., BONAVENTURA, D., GALLUS, M.: Jahrring- und Zuwachsanalytische Untersuchungen in erkrankten Tannenbeständen des Landes Baden-Württemberg. *Mitt. FVA Baden-Württemberg*, 112: 38, 1984
- KRAFT, G.: Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. *Kindworth's Verlag, Hannover*. 147 S., 1884
- LARSEN, J.B.: Das Tannensterben: Eine neue Hypothese zur Klärung des Hintergrundes dieser rätselhaften Komplexkrankheit der Weißtanne (*Abies alba* Mill.). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105: 381-396, 1986
- LEBOURGEOIS, F., RATHGEBER, C.B.K., ULRICH, E.: Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science* 21: 364-376, 2010
- LORIMER, C.G., FRELICH, L.E.: A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Can. J. For. Res.* 19: 651-663, 1989
- MAYER, H., KÖNIG, C., RALL, A.: Identifikation von Witterungsereignissen mit pflanzenphysiologischer Stresswirkung für Waldbäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 107: 131-140, 1988
- MITSCHERLICH, G.: Wald, Wachstum und Umwelt. 1. Bd.: Form und Wachstum von Baum und Bestand. *Sauerländer's Verlag, Frankfurt*, 144 S., 1978
- MITSCHERLICH, G., WEIHE, J.: Untersuchungen an Tannenjungwüchsen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 124: 33-39, 1952
- RUBINO, D.L., MCCARTHY, B.C.: Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. *Dendrochronologia* 21: 97-115, 2004
- SCHMID-HAAS, P., MASUMY, S.A., NIEDERER, M., SCHWEINGRUBER, F.H.: Zuwachs- und Kronenanalysen an geschwächten Tannen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 137: 811-832, 1986
- SCHÖPFER, W., HRADETZKY, J.: Der Indizienbeweis: Luftverschmutzung maßgebliche Ursache der Walderkrankung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 103: 231-248, 1984
- SCHÖPFER, W., HRADETZKY, J., KUBLIN, E.: Wachstumsvergleiche von Fichte und Tanne in Baden-Württemberg. *Forst und Holz* 52: 443-448, 1997
- SPLECHTNA, B.E., GRATZER, G., BLACK, B.A.: Disturbance history of a European old-growth mixed-species forest: A spatial dendro-ecological analysis. *Journal of Vegetation Science* 16: 511-522, 2005
- SPIECKER, H.: Das Wachstum der Tannen und Fichten auf Plenterwald-Versuchsflächen des Schwarzwaldes in der Zeit von 1950 bis 1984. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 157: 152-164, 1986
- SPIECKER, H.: Zur Dynamik des Wachstums von Tannen und Fichten auf Plenterwald-Versuchsflächen im Schwarzwald. *AFZ* 46: 1076-1080, 1991
- ULRICH, B.: Eine ökosystemare Hypothese über die Ursachen des Tannensterbens (*Abies alba* Mill.). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 100: 228-236, 1981
- VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M., KAHLE, H.P., VAN DER MAATEN, E.: Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. *Annals of Forest Science* 70: 185-193, 2013
- WIGLEY, T.M.L., BRIFFA, K.R., JONES, P.D.: On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201-213, 1984