

---

# Veränderte Dynamik von süddeutschen Waldbeständen seit 1870

Hans Pretzsch, Peter Biber, Gerhard Schütze, Enno Uhl und Thomas Rötzer

**Schlüsselwörter:** Wachstumstrends, langfristige Versuchsflächen, Klimaänderung, Anthropozän

**Zusammenfassung:** Wir leben im Anthropozän, einer Epoche, in welcher die Beeinflussung der Erde und ihrer Ökosysteme durch den Menschen eskaliert. Waldökosysteme – in Europa bedecken sie mehr als 30% der Landfläche – sind seit mehr als einem Jahrhundert zunehmend von Klimaänderungen betroffen. Während vor knapp zwei Jahrzehnten noch das »Waldsterben« das großflächige Überleben von Waldökosystemen in Frage zu stellen schien, weisen gegenwärtig terrestrische, phänologische Untersuchungen, satellitengestützte Erfassungen der fotosynthetischen Aktivität und Waldinventuren eher auf ein beschleunigtes Wachstum als auf einen Kollaps der Wälder hin. Ob, wie und warum Waldbestände innerhalb des letzten Jahrhunderts ihr Wachstum veränderten, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Der vorliegende Aufsatz basiert auf einer Publikation, die im international renommierten, wissenschaftlichen Journal *Nature Communications* veröffentlicht wurde. Wir zeigen, dass gegenwärtig der Größenzuwachs von Bäumen, der Zuwachs des Bestandsvolumens und die Vorratsakkumulierung der Hauptbaumarten in Mitteleuropa um etwa 50–100% größer ist als noch vor 50 Jahren. Weil Bäume und Waldbestände sich schneller entwickeln, ist ihre Baumzahl, Bestandsdichte und Baummortalität etwa 25% geringer als in gleichaltrigen Beständen in der Vergangenheit. Nach wie vor folgen Waldbestände ähnlichen Regeln der Baum- und Bestandsallometrie. So verändert sich z. B. bei gegebener Bestandshöhe das erreichte Volumen nicht, gegebene Baum- und Bestandsgrößen werden aber schlichtweg schneller erreicht. Um die veränderte Bestandsdynamik zu verstehen, tragen wir das vorhandene Wissen über Klimaveränderungen zusammen und machen es für Szenarioanalysen mit modernen Modellen nutzbar. Nach unseren Ergebnissen können der Anstieg der Jahrestemperatur, die Zunahme des Niederschlags und die Verlängerung der Vegetationsperiode die beschleunigte Dynamik nicht ausreichend erklären. Erst wenn der Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und N-Deposition mit in die Szenarioanalysen einbezogen werden, können Modelle die Beobachtungen begrifflich machen. Vorliegende Untersuchung basiert auf Daten aus den langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen in Bayern, die seit

1870 kontinuierlich unter Beobachtung stehen und damit zu den ältesten Anlagen ihrer Art weltweit zählen. 300 Jahre nachdem Hans Carl von Carlowitz mit seiner *Sylvicultura Oeconomica* den Begriff »Nachhaltigkeit« prägte und er und weitere Gründerväter der Forstwissenschaft die Anlage langfristiger Versuchsflächen für die Untermauerung nachhaltigen Wirtschaftens initiierten, liefern diese Flächen heute unverzichtbare Fakten für ein besseres Verstehen, Modellieren und Bewahren der Wälder im Anthropozän.

---

## Versuchsflächen dokumentieren globale Trends

Wissen über die Bestandsdynamik ist essenziell für die nachhaltige Waldbewirtschaftung auf Betriebsebene (Pretzsch 2009), für die multikriterielle Planung auf Landschaftsebene (Pretzsch 2009) und für das Verstehen und die Vervollständigung der Kohlenstoffbilanz auf globaler Ebene (Magnani et al. 2007; Kauppi 1992). Aufgrund der langen Lebensspanne von Bäumen ist das Wissen über die Dynamik von Beständen und ihre langfristige Reaktion auf Umweltbedingungen nach wie vor sehr unvollständig. Retrospektive Jahrringanalysen an Bäumen können diese Wissenslücke kaum schließen, denn sie bieten nur Einblicke in das Wachstum von Bäumen, nicht aber in die zurückliegende Dynamik ganzer Bestände. Forstinventuren decken überwiegend bewirtschaftete Wälder ab und ermöglichen deshalb kaum eine Trennung zwischen Klima- und Behandlungseffekten auf das Waldwachstum. Wuchsmodelle eignen sich nur bedingt als Ausweg (Pretzsch et al. 2008), denn sie können kaum besser sein als die ihnen zugrunde liegende Datenbasis. Das volle Informationspotenzial von Wuchsmodellen lässt sich nur durch eine kombinierte Anwendung empirischer Analysen und Modelle ausschöpfen. Eine einmalige empirische Grundlage bieten die langfristigen Versuchsflächen, welche seit 1870 in Süddeutschland und anderen Regionen Europas nach Gründung der International Union of Forest Research Organisations (IUFRO) (Pretzsch 2009) angelegt und systematisch ausgebaut wurden. Die frühesten Flächen

– sie sind bis heute zehn- bis 20mal durchgängig aufgenommen worden – liefern die weltweit längsten Zeitperioden über die Entwicklung von Waldbeständen. Zwar wurden sie bisher intensiv für die Herleitung von Grundprinzipien des Waldwachstums ausgeschöpft, nicht aber für die Analyse langfristiger Wachstumstrends. Ein besonders günstiger Umstand besteht darin, dass für die Regionen, in denen diese langfristigen Versuchsflächen angesiedelt sind, die Aufzeichnungen von Niederschlägen und Temperaturen bis in das Jahr 1781 zurückreichen. Dadurch können sie, wie im Folgenden dargestellt, für die Quantifizierung und Erklärung globaler Wachstumstrends eingesetzt werden. So tragen Versuchsflächen, die eigentlich für die quantitative Untermauerung nachhaltiger Forstwirtschaft auf lokaler und regionaler Ebene angelegt wurden (Pretzsch 2009), auf andere Weise und auf anderer Skala zum nachhaltigen Wirtschaften bei.

Mit der vorliegenden Studie möchten wir anhand langfristig beobachteter Versuchsflächen für Fichte und Buche den statistischen Nachweis von Wachstumstrends führen und auch deren Größenordnung klären. Wir beschränken uns nicht auf eine rein beschreibende Darstellung, sondern knüpfen darüber hinaus die gefundenen Trends an grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Bestandsallometrie und identifizieren mittels einer Modellstudie Indizien für die Ursachen des veränderten Wachstums.

### Versuchsflächen in dieser Studie

Für die Analyse wählen wir Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). Diese Baumarten dominieren in Mitteleuropa mit einem Anteil von 30% an der Waldfläche, was einer Gesamtfläche von etwa 14 Mio. ha entspricht. Wir greifen auf 37 langfristig beobachtete Versuchsflächen in Deutschland zurück, von denen 24 in Fichtenbeständen und 13 in Buchenbeständen liegen. Von jeder Versuchsfläche verwenden wir jeweils die unbehandelte Parzelle (A-Grad), um den Einfluss von Durchforstungseingriffen auszuschalten. Die Flächen decken eine Reichweite von 47,78° bis 51,63° nördlicher Breite und 7,92° bis 13,31° östlicher Länge ab. Sie repräsentieren ein breites Spektrum an Standorten, Baum- und Bestandsdimensionen und spannen insgesamt einen Beobachtungszeitraum von 1870 bis 2012 auf (Tabellen 1, 2, 3). Der Erstautor des Artikels und seine Arbeitsgruppe sind für die wissenschaftliche Konzeption und den Unterhalt dieser Versuchsflächen verantwortlich.

|                             | Fichte |       | Buche |       |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|
|                             | min    | max   | min   | max   |
| Anzahl Parzellen            | 24     |       | 13    |       |
| Östliche Länge [°]          | 10,40  | 13,31 | 7,92  | 13,31 |
| Nördliche Breite [°]        | 47,78  | 49,68 | 48,04 | 51,63 |
| Höhe über N. N. [m]         | 510    | 844   | 330   | 760   |
| Jahresmitteltemperatur [°C] | 6,0    | 7,6   | 6,0   | 8,5   |
| Jahresniederschlag [mm]     | 800    | 1255  | 670   | 1.200 |

Tabelle 1: Anzahl der verwendeten Versuchspartellen und Spanne (Minimum – Maximum) der geografischen Position, Meereshöhe, Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag.

|   | Fichte |       | Buche |       |
|---|--------|-------|-------|-------|
|   | min    | max   | min   | max   |
| Anzahl Parzellen  | 24     |       | 13    |       |
| Erste Aufnahme [Jahr]   | 1882   | 1993  | 1870  | 1991  |
| Letzte Aufnahme [Jahr]  | 1963   | 2012  | 1936  | 2010  |
| Anzahl Aufnahmen [n]  | 3      | 18    | 4     | 18    |
| Alter bei der letzten Aufnahme [Jahre]                          | 28     | 143   | 65    | 188   |
| Oberhöhe (ho) [m] letzte Aufnahme                               | 15,0   | 44,4  | 28,7  | 38,6  |
| N [ha <sup>-1</sup> ] letzte Aufnahme                           | 210    | 2.333 | 170   | 924   |
| Bonität [m] letzte Aufn.  | 28,7   | 42,8  | 23,5  | 37,6  |
| dq [cm] letzte Aufnahme   | 12,6   | 50,7  | 21,6  | 45,8  |
| V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) letzte Aufn.               | 135    | 1.637 | 366   | 1.119 |
| PAI (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup> ) l. Aufn. | 10,1   | 39,8  | 7,9   | 21,2  |
| YT (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) letzte Aufn.              | 160    | 2.433 | 531   | 1.460 |

Tabelle 2: Zusammenfassung wichtiger Bestandscharakteristika der verwendeten Versuchspartellen. ho: Oberhöhe, N: Baumzahl/ha, Bonität: Oberhöhe im Alter 100 nach den Ertragstafeln von Assmann und Franz (1963) bzw. Schober (1970), dq: Durchmesser des Grundflächenmittelstamms, V: aufstockendes Holzvolumen, PAI: periodischer jährlicher Zuwachs, YT: Gesamtwuchsleistung.

Diese Studie orientiert sich eng an den von der IUFRO definierten Standardvariablen (Pretzsch 2009) wie das oberirdische Volumen des Mittelstamms und der Bestandsvorrat. Biomassegrößen werden nicht verwendet. Hierdurch vermeiden wir zusätzliche Annahmen, wie sie für die Skalierung von Volumen zu Masse notwendig wären. Die Verwendung forstlicher Standardgrößen erfordert für fachfremde Leser folgende Definition: Der mittlere Baumdurchmesser  $d_q$  (cm) bezieht sich auf den Durchmesser in Brusthöhe (1,30m), der die durchschnittliche Kreisfläche aller Bäume pro Fläche repräsentiert. Die Oberhöhe  $h_o$  (m) bezeichnet die mittlere Höhe der 100 stärksten Bäume pro Hektar. Das mittlere Baumvolumen  $\bar{v}$  ( $m^3$ ) be-

zeichnet das durchschnittliche Stammvolumen eines Baumes im Bestand. Der jährliche Zuwachs des Mittelstamms  $i\bar{v}$  ( $m^3 J^{-1}$ ) wird analog zum mittleren Volumen  $\bar{v}$  als der durchschnittliche Volumenzuwachs eines Baums im Bestand berechnet. Der periodische jährliche Volumenzuwachs PAI ( $m^3 ha^{-1} J^{-1}$ ) und der stehende Bestandsvorrat  $V$  ( $m^3 J^{-1}$ ) betreffen den mittleren jährlichen Volumenzuwachs des Gesamtbestands im Intervall zwischen zwei Beobachtungen bzw. das akkumulierte Bestandsvolumen pro Hektar Bestandsfläche. Die Anzahlen der Bäume des verbleibenden Bestands ( $N ha^{-1}$ ) und der abgestorbenen Bäume ermöglichen die Kalkulation der jährlichen Mortalitätsrate auf Bestandesebene MORT ( $\% J^{-1}$ ).

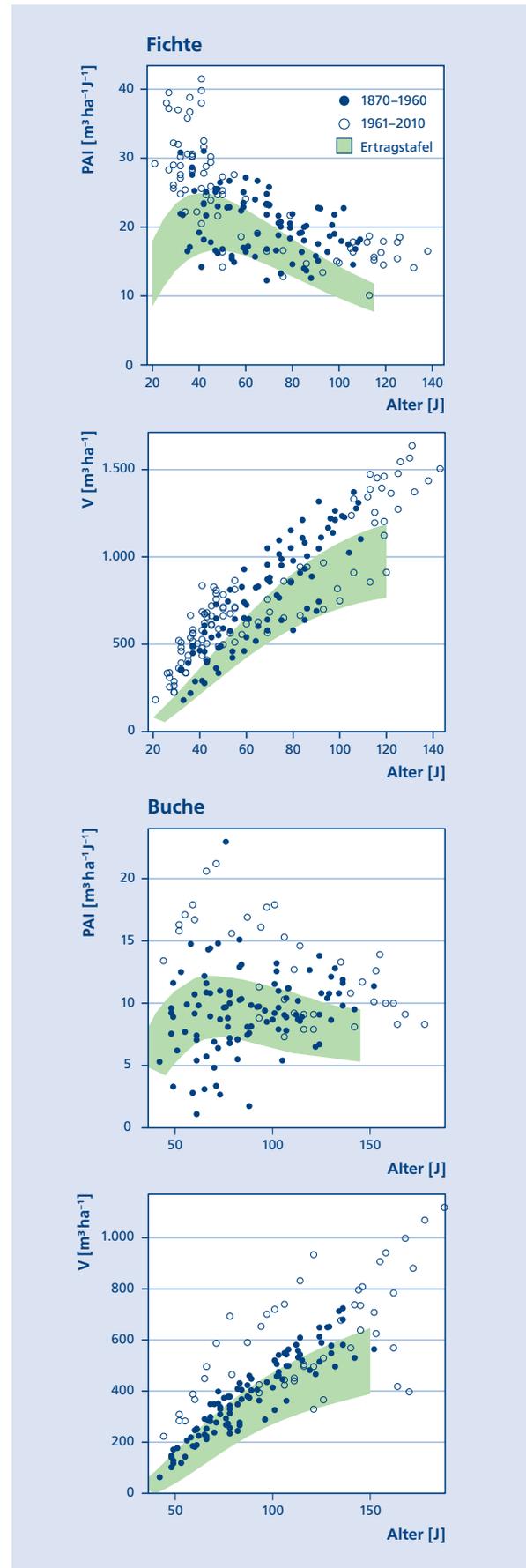
| Versuch/Parzellennummer | Bestandsalter bei letzter Aufnahme [J] | Geografische Lage |                  | Höhe ü. N. N. [m] | Jahresmitteltemperatur [°C] | Jahresniederschlag [mm] | Bodenart<br>Bodenfeuchte                    |
|-------------------------|--|-------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|---|
|                         |  | Östliche Länge    | Nördliche Breite |                   |                             |                         |   |
| <b>Fichte</b>           |  |                   |                  |                   |                             |                         |   |
| Sachsenried 2/1         | 122                                    | 10,75             | 47,85            | 820               | 6,2                         | 1.255                   | Mäßig frischer, tiefgründiger Schluff       |
| Sachsenried 3/1         | 116                                    | 10,76             | 47,85            | 830               | 6,2                         | 1.204                   | Mäßig frischer, tiefgründiger Schluff       |
| Denklingen 5/1          | 143                                    | 10,84             | 47,87            | 782               | 6,8                         | 1.114                   | Mäßig frischer, tiefgründiger Schluff       |
| Ottobeuren 8/1          | 113                                    | 10,40             | 47,88            | 660               | 7,0                         | 1.100                   | Mäßig frischer, tiefgründiger Schluff       |
| Sachsenried 67/1        | 131                                    | 10,75             | 47,83            | 843               | 6,2                         | 1.204                   | Mäßig frischer, tiefgründiger Schluff       |
| Sachsenried 68/1        | 130                                    | 10,75             | 47,83            | 844               | 6,2                         | 1.204                   | Frischer, tiefgründiger Schluff             |
| Eglharting 72/1         | 120                                    | 11,85             | 48,12            | 533               | 7,6                         | 1.009                   | Mäßig frischer, sandiger Schluff            |
| Eglharting 73/1         | 119                                    | 11,85             | 48,11            | 541               | 7,6                         | 1.009                   | Mäßig frischer, sandiger Schluff            |
| Sachsenried 602/1       | 46                                     | 10,76             | 47,85            | 820               | 6,2                         | 1.200                   | Frischer, schluffiger Ton                   |
| Zusmarshausen 603/1,2,3 | 47                                     | 10,48             | 48,40            | 510               | 7,5                         | 800                     | Mäßig frischer, sandiger Schluff            |
| Eurach 605/7,8          | 55                                     | 11,34             | 47,78            | 600               | 7,2                         | 1.173                   | Frischer Schluff                            |
| Denklingen 606/3,4      | 55                                     | 10,83             | 47,87            | 750               | 6,8                         | 1.115                   | Frischer, Tiefgründiger Schluff             |
| Sachsenried 607/10      | 53                                     | 10,82             | 47,87            | 775               | 6,8                         | 1.115                   | Mäßig frischer, schluffiger Ton             |
| Fürstfeldbruck 612/7,19 | 43                                     | 11,08             | 48,24            | 542               | 7,5                         | 825                     | Mäßig frischer Schluff                      |
| Weißenburg 613/2,4,7    | 93                                     | 11,04             | 49,00            | 560               | 7,0                         | 800                     | Frischer Schluff                            |
| Traunstein 639/1        | 41                                     | 12,67             | 47,94            | 590               | 7,3                         | 1.200                   | Mäßig frischer, sandiger Schluff            |
| <b>Buche</b>            |  |                   |                  |                   |                             |                         |   |
| Kirchheimbolanden 11/1  | 114                                    | 7,92              | 49,62            | 640               | 8,0                         | 690                     | Trockener, schluffiger Sand                 |
| Waldbrunn 14/1          | 145                                    | 11,19             | 49,71            | 360               | 8,5                         | 700                     | Mäßig frischer Schluff                      |
| Fabriktschleichach 15/1 | 188                                    | 10,57             | 49,92            | 460               | 7,5                         | 820                     | Frischer Sand                               |
| Elmstein 20/1           | 145                                    | 7,92              | 49,39            | 500               | 8,0                         | 850                     | Trockener, schluffiger Sand                 |
| Lohr 24/1               | 162                                    | 9,51              | 49,99            | 500               | 7,0                         | 1.000                   | Frischer Sand                               |
| Mittelsinn 25/1         | 170                                    | 9,52              | 50,20            | 510               | 7,0                         | 1.020                   | Frischer Sand                               |
| Rothenbuch 26/1         | 144                                    | 9,43              | 49,97            | 450               | 7,0                         | 1.050                   | Mäßig frischer Sand                         |
| Hain 27/1               | 172                                    | 9,33              | 49,99            | 400               | 7,0                         | 1.080                   | Mäßig frischer Sand                         |
| Starnberg 91/2          | 78                                     | 11,38             | 48,04            | 620               | 7,5                         | 1.041                   | Mäßig trockener, sandiger Schluff           |
| Zwiesel 111/2,4         | 126                                    | 13,31             | 49,07            | 760               | 6,0                         | 1.200                   | Mäßig trockener, sandiger-steiniger Schluff |
| Wieda 600/2             | 121                                    | 10,58             | 51,63            | 360               | 7,0                         | 1.100                   | Frischer Schluff                            |
| Arnstein 638/1          | 65                                     | 9,98              | 49,90            | 330               | 8,0                         | 670                     | Frischer, schluffiger Ton                   |

Tabelle 3: Standörtliche Charakteristika der verwendeten Versuchspartellen

## Wachstumstrends im Ertragstafelvergleich

Ertragstafeln, gängige Hilfsmittel der Forstwirtschaft, tabellieren mittlere Waldentwicklungen über das Alter und stammen überwiegend aus den Jahren 1795 bis 1965. Sie basieren in der Regel auf Daten langfristiger Versuchsflächen und repräsentieren deshalb Wuchsbedingungen und Bestandsdynamik in der Vergangenheit. Der Vergleich zwischen den auf unseren Flächen beobachteten Werten und den Ertragstafeln (Abbildung 1) zeigt insbesondere für die Wachstumsraten und den stehenden Vorrat nach 1960 (leere Symbole in Abbildung 1) Überschreitungen der Ertragstafelwerte um 50% bis 100%. Solche Abweichungen von Modellvorstellungen zeigen grundlegende Veränderungen der Wuchsbedingungen an und stellen die Gültigkeit der Ertragstafeln in Frage.

Abbildung 1: Beobachtete und erwartete Bestandsentwicklung von Fichte und Buche seit 1870. Gemessener periodischer Volumenzuwachs (PAI [ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{J}^{-1}$ ]) und stehender Vorrat an Bestandsvolumen ( $V$  [ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ]) bis 1960 (ausgefüllte Symbole) und nach 1960 (leere Symbole) verglichen mit gebräuchlichen Ertragstafeln (grün dargestellte Bereiche) für die Fichte (Oberhöhenbonitäten 32–40 nach Assmann und Franz [1963]) und für Buche (Ertragsklassen I–IV nach Schober [1970]).



**Umweltvariablen –  
Triebkräfte des Waldwachstums**

Für die Zeitperiode, die von unseren langfristigen Versuchsfächen abgedeckt wird, stellen wir Umweltvariablen zusammen, welche das Wachstum determinieren (Abbildung 2). Es wird deutlich, dass sich die Umwelt- und Wuchsbedingungen für Wälder seit Anlage der ersten Versuchsfächen im Jahre 1870 signifikant verändert haben. In dieser Periode ist die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration von 295 ppm im Jahre 1901 auf 390 ppm im Jahre 2010 angestiegen (Churkina et al. 2010; IPCC 2007).

Die mittlere Stickstoffdeposition hat sich von 2,5 kg ha<sup>-1</sup> J<sup>-1</sup> auf mehr als 9 kg ha<sup>-1</sup> J<sup>-1</sup> im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts erhöht (Churkina et al. 2010). Die mittlere Lufttemperatur und der mittlere jährliche Niederschlag stiegen im 20. Jahrhundert um 1,0 °C

bzw. 9% an. Dabei verliefen der Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, der N-Deposition und der Lufttemperatur in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zwei bis dreimal schneller als in der ersten Hälfte (Abbildung 2, oben). Aus Temperaturzeitreihen und phänologischen Beobachtungen kann abgeleitet werden, dass sich die Vegetationszeit in den letzten 40 Jahren um 0,8 Tage pro Jahr verlängert hat (Abbildung 2, unten).

**Statistischer Nachweis der Wachstumstrends**

Der bemerkenswerte Anstieg der Bestandszuwächse seit 100 Jahren (Abbildung 1) und die gleichzeitige Zunahme der Ressourcenversorgung (Kohlendioxid und Stickstoff) in Kombination mit einer Verlängerung der Vegetationszeit und Veränderung der Klimavariablen

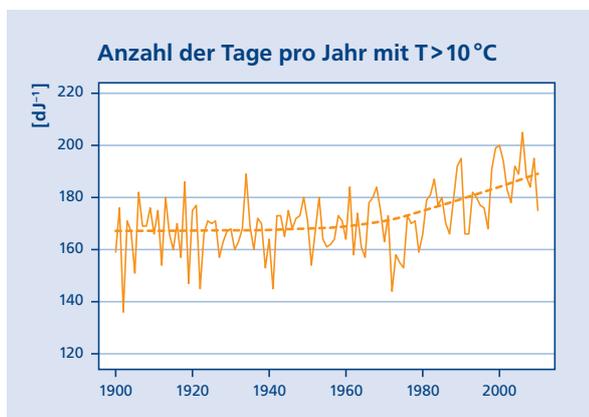
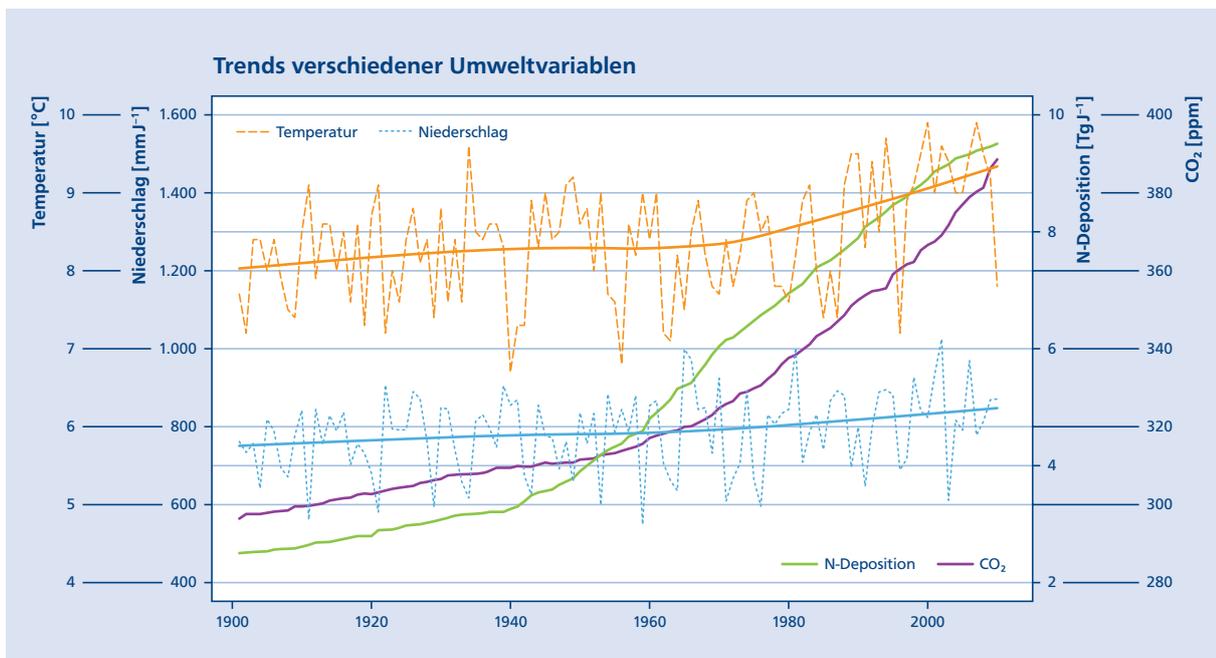


Abbildung 2: Veränderung der Wachstumsbedingungen in Mitteleuropa seit 1900;

oben: Trend der mittleren Jahrestemperatur und des Jahresniederschlags. Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und N-Deposition;

unten: Verlängerung der jährlichen Vegetationszeit, charakterisiert durch die Anzahl der Tage im Jahr mit Mitteltemperaturen > 10 °C.

Datenquellen: Churkina et al. (2010), Schönwiese et al. (2005).

(Abbildung 2) rechtfertigen eine statistische Analyse der beobachteten Wachstumstrends.

Zunächst prüfen wir, ob die Entwicklung der Bestandscharakteristika sich allein in Abhängigkeit vom Bestandsalter veränderte oder ob auch Zusammenhänge mit dem Kalenderjahr, das als Proxy-Variable den Zeittrend der veränderten Wuchsbedingungen repräsentiert, nachgewiesen werden können. Als Basismethode verwenden wir gemischte lineare Regressionsmodelle (Zuur et al. 2009; Pinheiro und Bates 2000) mit den situationsbedingt untransformierten oder logarithmierten Bestandscharakteristika als Responsevariablen und dem untransformierten oder logarithmierten Alter und dem Kalenderjahr als Prädiktorvariablen. Da viele der Messungen Wiederholungsaufnahmen auf ein und demselben Plot repräsentieren, wurden Zufallseffekte auf Ebene der Parzelle und der Versuchsfläche in das Modell aufgenommen, um Verfälschungen der Ergebnisse durch eventuell vorhandene Autokorrelationen auszuschließen.

Aufgrund der Geschichte des Forstlichen Versuchswesens sind die verschiedenen Kombinationen zwischen Bestandsalter und Kalenderjahr im Datenmaterial nicht in gleicher Weise repräsentiert. Vielmehr umfasst der Datenbestand für die jüngere Zeit viele Altbestände, während in den 1870er bis 1950er Jahren zumeist junge oder mittelalte Waldbestände unter Beobachtung standen. Insbesondere fehlen in der Gründerzeit des Versuchswesens Fichtenbestände im Alter über 60 Jahre und Buchenbestände über 130 Jahre, während sie in der Gegenwart das Flächennetz dominieren. Um Verzerrungen zu vermeiden, wurden die Regressionsmodelle deshalb bei der Fichte nur mit Daten bis zum Alter 60 und bei der Buche mit Beständen bis zum Alter 130 angepasst. Bei einer solchen Vorgehensweise sind historische wie gegenwärtige Wuchsbedingungen mit gleichem Gewicht durch junge und alte Bestände vertreten.

Die Analyse zeigt, dass der mittlere Baumdurchmesser  $dq$  und das Bestandsvolumen  $V$ , der mittlere Baumdurchmesser  $dq$ , die Oberhöhe  $ho$  (Mittlere Höhe der 100 höchsten Bäume pro ha) und das mittlere Baumvolumen gegenwärtig signifikant schneller wachsen als in der Vergangenheit (Abbildung 3). So wird unter den Wuchsbedingungen des Jahres 2010 ein gegebener Mitteldurchmesser um etwa ein bis zwei Jahrzehnte früher erreicht als noch 1960 (Abbildungen 3 und 4). Die Zunahme des mittleren periodischen Volumenzuwachses von 1960 bis 2010 beläuft sich auf 14% bei der

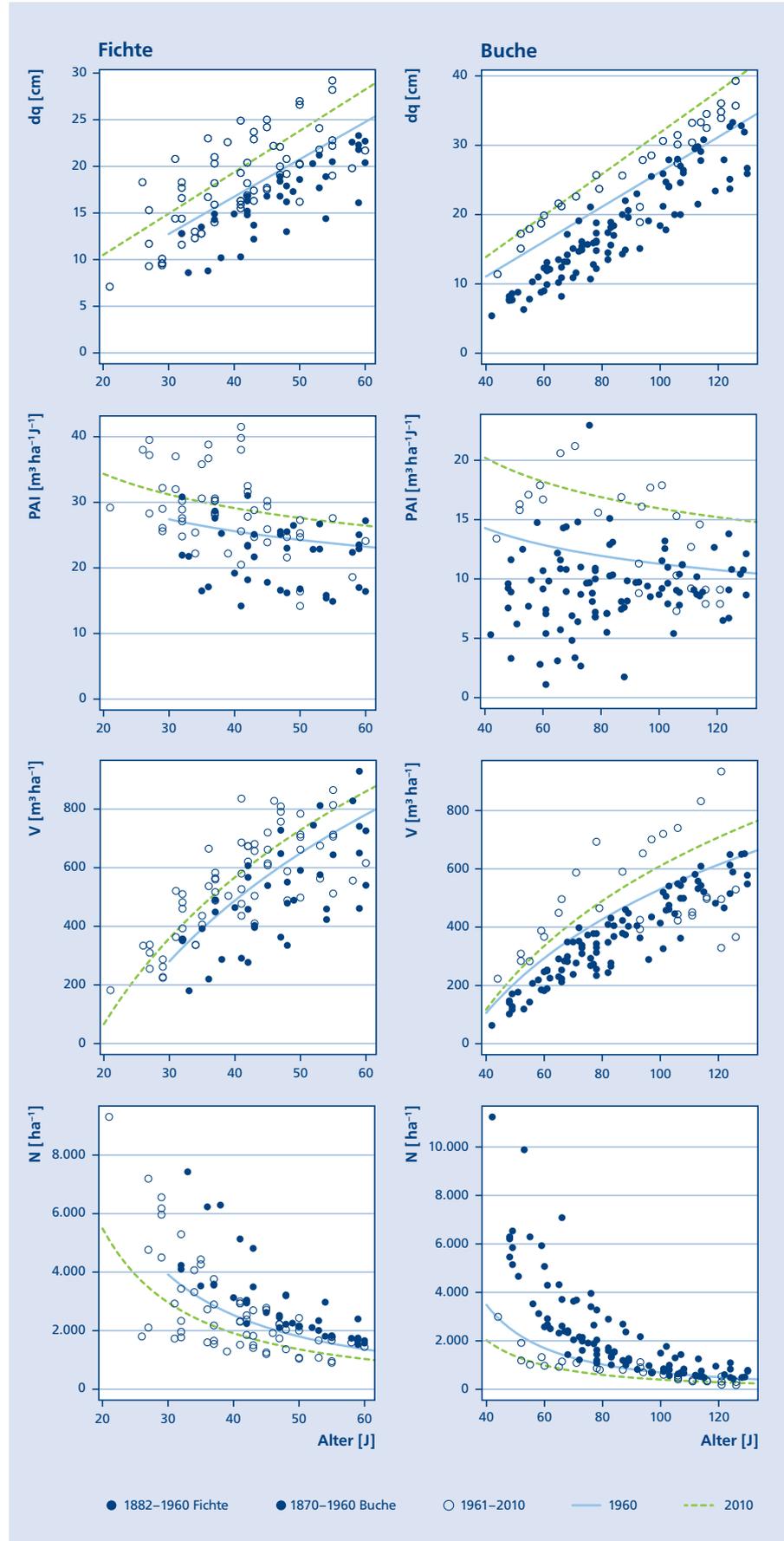
Fichte und 41% bei der Buche (Abbildung 3, Tabelle 4). Aus den Abbildungen 1 und 3 geht hervor, dass selbst die Altbestände gegenwärtig noch immer Volumen akkumulieren und noch nicht das Plateau eines konstanten Endvolumens erreicht haben. Während 1960 maximale Bestandsvolumina im Alter 60 bei der Fichte mit  $780\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  und bei der Buche mit  $650\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  erreicht waren, belaufen sich die gegenwärtig stehenden Volumina im gleichen Alter auf  $860\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  bei der Fichte und  $750\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  bei der Buche (Abbildung 3). Eine Konsequenz dieser Wuchsbeschleunigung ist eine schnellere Reduktion der Baumzahl pro Hektar (Abbildung 3) und eine Veränderung der Baum mortalität (Abbildung 4). Ein Vergleich zwischen 1960 und 2010 zeigt eine unveränderte Mortalitätsrate der Fichte, während sich die Mortalitätsrate der Buche um 21% reduziert (Tabelle 4). Während sich der Effekt des Kalenderjahrs auf die Entwicklung der mittleren Baumgröße, des Bestandszuwachses und der Volumenakkumulation durchwegs signifikant positiv auswirkte, war der Effekt auf die Baumzahl immer signifikant negativ auf dem Niveau  $p < 0,05$ .

|   | Änderung von 1960 zu 2010 in % |                   |
|---|--------------------------------|-------------------|
|   | Fichte                         | Buche             |
| Oberhöhe ( $ho$ )                                   | <b>+7</b>                      | <b>+8</b>         |
| Mitteldurchmesser ( $dq$ )                          | <b>+13</b>                     | <b>+23</b>        |
| Mittleres Baumvolumen ( $\bar{v}$ )                 | <b>+56</b>                     | <b>+82</b>        |
| Periodischer jährlicher Zuwachs (PAI)               | <b>+14</b>                     | <b>+41</b>        |
| Stehendes Holzvolumen ( $V$ )                       | <b>+8</b>                      | <b>+15</b>        |
| Baumzahl/ha ( $N$ )                                 | <b>-24</b>                     | <b>-42</b>        |
| Mortalitätsrate (MORT)                              | Nicht signifikant              | -21               |
| Zuwachs des mittleren Baumvolumens ( $\bar{iv}$ )   | <b>+53</b>                     | <b>+149</b>       |
| Verschiebung der $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Allometrie | <b>+20</b>                     | <b>+60</b>        |
| Verschiebung der $N$ - $\bar{v}$ -Allometrie        | Nicht signifikant              | Nicht signifikant |

Tabelle 4: Relative Änderung der Kennwerte 75-jähriger Waldbestände von 1960 zu 2010. Die hier gezeigten Ergebnisse wurden aus mit unseren Regressionsmodellen abgeleiteten Erwartungswerten hergeleitet. Wir zeigen ausschließlich Änderungen, die auf mit diesen Modellen festgestellten signifikanten Kalenderjahr-Effekten beruhen (Signifikanzniveaus  $p < 0,05$ : fett gedruckte Zahlen,  $p < 0,10$ : Zahlen im Normaldruck).

Abbildung 3:  
 Statistische Prüfung der Veränderung des Baum- und Bestandswachstums seit 1870. Gezeigt werden der mittlere Durchmesser  $dq$ , der mittlere periodische Volumenzuwachs auf Bestandsebene PAI, das stehende Volumen  $V$  und die Baumzahl  $N$  über dem Bestandsalter jeweils für Fichte und Buche.

Ausgefüllte Symbole: Beobachtungen bis 1960, leere Symbole: Beobachtungen nach 1960. Durchgezogene Linien: Modellvorhersagen für 1960, gestrichelte Linien: Modellvorhersagen für 2010. Die Vorhersagen basieren auf statistischen Analysen des Datenmaterials.



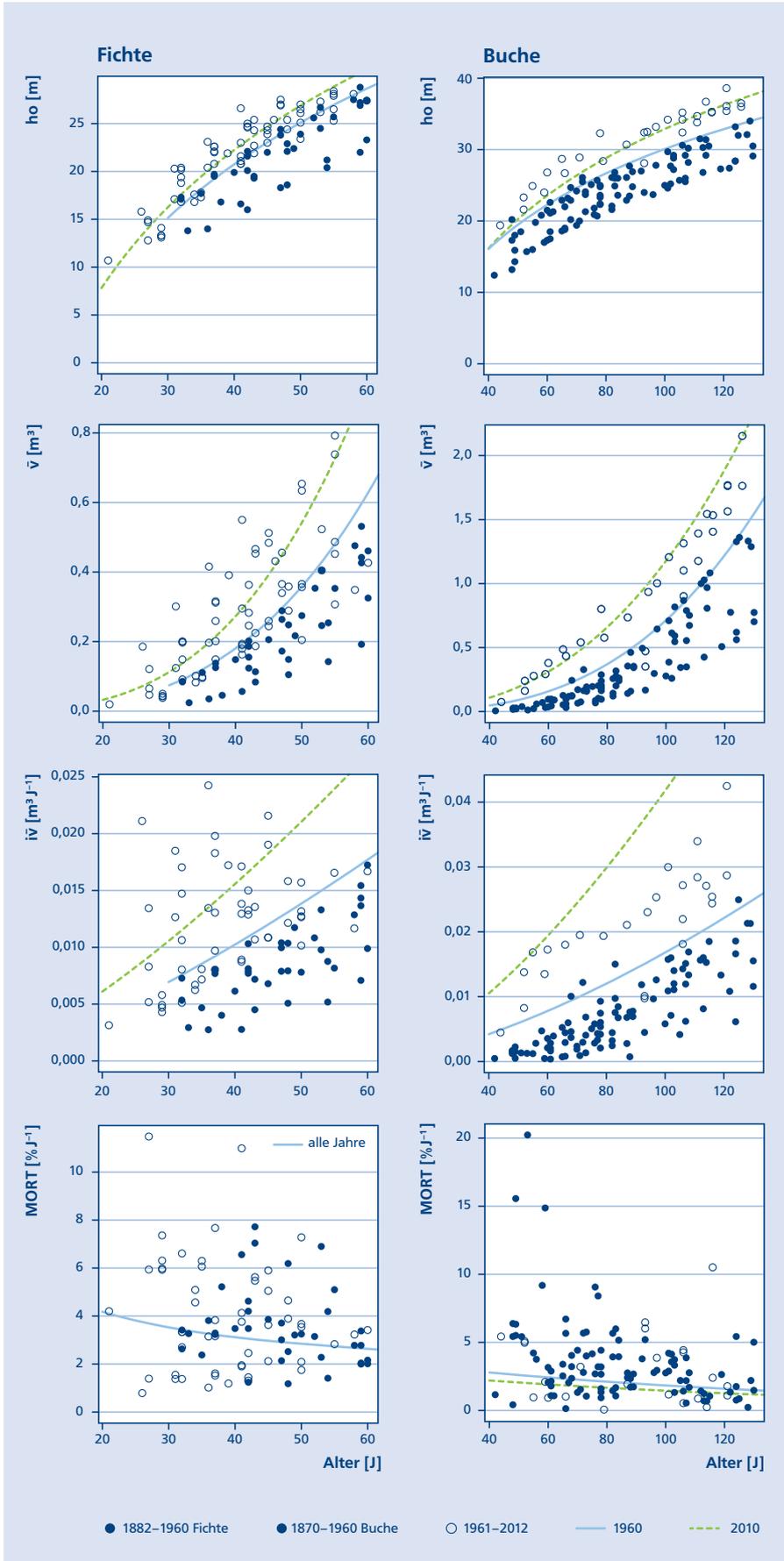


Abbildung 4: Statistische Prüfung der Veränderung des Baum- und Bestandswachstums seit 1870. Gezeigt werden die Oberhöhe  $h_o$ , das mittlere Baumvolumen  $\bar{v}$ , der jährliche Zuwachs des Mittelstamms  $\bar{i}v$  und jährliche Mortalitätsrate (MORT) über dem Bestandsalter jeweils für Fichte und Buche.

Ausgefüllte Symbole: Beobachtungen bis 1960, leere Symbole: Beobachtungen nach 1960. Durchgezogene Linien: Modellvorhersagen für 1960, gestrichelte Linien: Modellvorhersagen für 2010. Die Vorhersagen basieren auf statistischen Analysen des Datenmaterials.

### Veränderungen der Bestandsallometrie

Weiter prüfen wir, wie sich die Grundbeziehungen der Bestandsallometrie (Enquist und Niklas 2001; Pretzsch 2009; West et al. 2009), nämlich der allometrische Zusammenhang zwischen der mittleren Zuwachsrate  $i\bar{v}$  der Bäume und dem mittleren Baumvolumen  $\bar{v}$  ( $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Beziehung) sowie die Beziehung zwischen Baumzahl  $N$  und mittlerem Baumvolumen  $\bar{v}$  ( $N$ - $\bar{v}$ -Beziehung, Selbstdurchforstungslinie) im Beobachtungszeitraum veränderten (Abbildung 5).

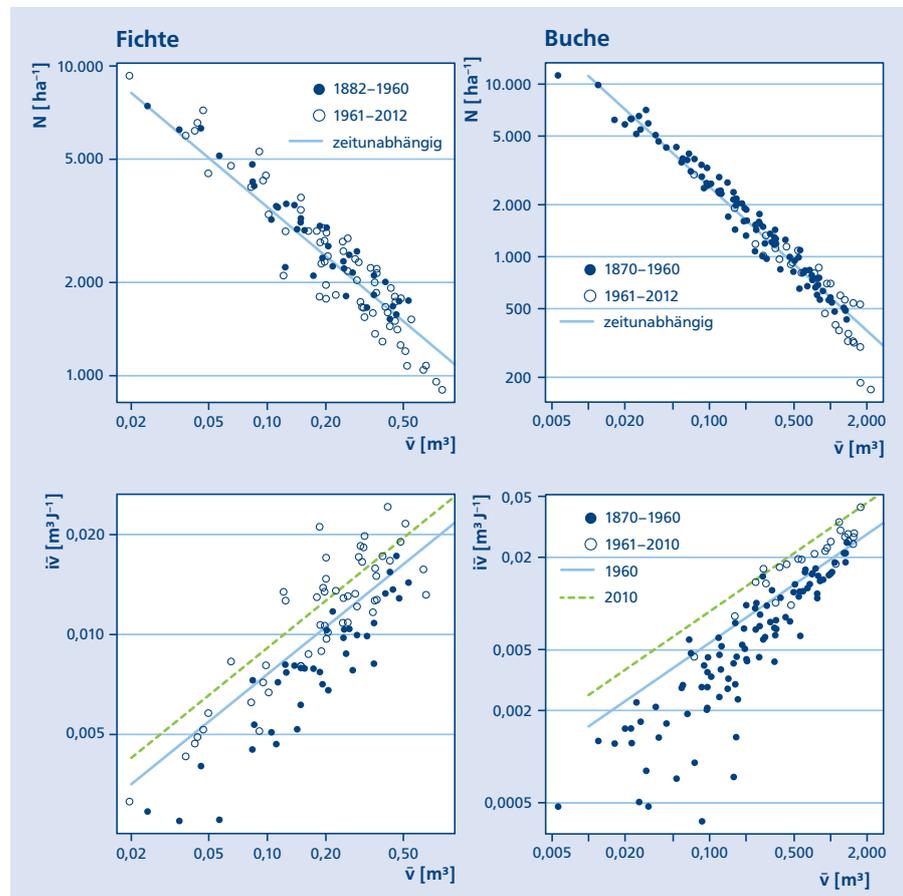
In gleicher Weise wie oben dargestellt verwenden wir lineare gemischte Modelle mit Zufallseffekten auf Versuchs- und Parzellenebene zur Berücksichtigung von Autokorrelationen. Im Fall der  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Beziehung ist die logarithmierte mittlere Zuwachsrate die Responsevariable, während das logarithmierte mittlere Baumvolumen und das Kalenderjahr sowie deren Wechselwirkung als Prädiktorvariablen verwendet werden. Analog wird in der  $N$ - $\bar{v}$ -Beziehung die logarithmierte Baumzahl als Responsevariable herangezogen, während das mittlere Baumvolumen zusammen mit dem Kalenderjahr in gleicher Weise wie oben dargestellt als Prädiktor fungiert. Signifikante Effekte des Kalenderjahrs zeigen

Unterschiede zwischen der historischen und der aktuellen Ausprägung der Bestandsallometrien an.

Diese statistische Analyse erbringt keine signifikante Veränderung der Selbstdurchforstungslinie mit dem Kalenderjahr, d.h. die Kapazitätsgrenze der Bestände blieb unverändert. Mit Blick auf die  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Beziehung konnte zwar keine Veränderung der Steigung dieses allometrischen Zusammenhangs festgestellt werden, allerdings hat sich die Höhenlage der  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Beziehung signifikant nach oben verschoben (Abbildung 5). Diese Parameterveränderung zeigt, dass sich die relative Zuwachsrate von 1960 bis 2010 bei der Fichte um 20% und der Buche um 60% gesteigert hat. Beide Arten zeigen ähnliche und konstante Steigungen der allometrischen  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ - und  $N$ - $\bar{v}$ -Beziehungen, wie das von der Theorie der metabolischen Skalierung (West et al. 2009) vorhergesagt wird.

Die Analysen zeigen, dass Waldbestände gegenwärtig schneller wachsen und daher in einer gegebenen Zeitspanne mehr Volumen akkumulieren als vor einem Jahrhundert. Sie entwickeln sich aber noch immer entlang denselben Selbstdurchforstungslinien wie in der Vergangenheit. Allerdings werden diese wesentlich

Abbildung 5: Grundbeziehungen der Bestandsallometrie in Vergangenheit und Gegenwart für Fichte und Buche. Zusammenhang zwischen der Baumzahl pro Hektar und dem mittleren Baumvolumen  $\bar{v}$  (oben) und zwischen dem mittleren Volumenzuwachs eines Baumes  $i\bar{v}$  und dem mittleren Baumvolumen  $\bar{v}$  (unten) jeweils in doppelt logarithmischem Koordinatensystem. Ausgefüllte Symbole: Beobachtungen bis 1960, leere Symbole: Beobachtungen nach 1960. Die Ergebnisse der statistischen Analyse zeigen, dass sich der Zusammenhang zwischen  $N$  und  $\bar{v}$  (durchgezogene Linie, oben) nicht verändert, der Zusammenhang  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$  allerdings von 1960 (durchgezogene Linie, unten) bis 2010 (gestrichelte Linie, unten) eine Verlagerung erfährt.



schneller durchlaufen als vor 100 Jahren. Demnach basieren die Wachstumstrends im Wesentlichen auf einer veränderten Beziehung zwischen Baumgröße und Baumzuwachs, d. h. die Zuwachsrate änderte sich signifikant, nicht aber die mittlere Packungsdichte der Bäume. Bemerkenswert ist, dass sich die Veränderung der  $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Relation nur in der Erhöhung der Höhenlage dieser Beziehung, nicht aber in der Veränderung ihrer Steigung äußert.

In Tabelle 4 verwenden wir das Alter 75 als Referenz, da es etwa der Umtriebszeit entspricht, und zeigen, wie sich die Bestandscharakteristika in diesem Alter von 1960 bis 2010 veränderten. Zu diesem Zweck wurden die beiden Kalenderjahre (1960, 2010) und das Bestandsalter (75 Jahre) in die zuvor statistisch angepassten gemischten Regressionsmodelle, die die Wachstumsveränderungen beschreiben, eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Baumhöhe nur marginal veränderte, der mittlere Baumdurchmesser und das mittlere Baumvolumen aber eine deutliche Beschleunigung von 1960 zu 2010 aufweisen. Der Volumenzuwachs und die Akkumulation des stehenden Vorrats der Buche verlaufen um 41 % bzw. 15 % stärker, so dass die Baumzahl und Mortalität um 42 % bzw. 21 % schneller abfallen.

Der Befund, dass Bäume schneller wachsen, aber noch immer denselben Selbstdurchforstungslinien folgen, wird besonders offensichtlich durch die Erhöhung des Zuwachses des mittleren Baumvolumens um 53%–149% und die Erhöhung der Zuwachs-Größenallometrie ( $i\bar{v}$ - $\bar{v}$ -Beziehung) um 20%–60% bei gleichbleibender Selbstdurchforstungslinie. Die aufgezeigten Veränderungen bewegen sich in einer Größenordnung, die sowohl für die Waldökologie, als auch für die Waldbehandlung relevant sind.

### Modelle und Szenarioanalysen zur Ursachenklärung

Um die Mechanismen hinter den beobachteten Wachstumstrends aufzudecken, koppeln wir unsere empirischen Untersuchungen mit einem Simulationsexperiment, das auf zwei Wachstumssimulatoren gründet, namentlich dem ökophysiologischen Prozessmodell BALANCE (Pretzsch et al. 2008; Rötzer et al. 2013) und dem Hybridmodell SILVA (Pretzsch et al. 2002), das auf einer Kombination empirischer und theoretischer Ansätze beruht. Das erstgenannte Modell wurde eingesetzt, um die mittelfristigen Reaktionen von Baum und

Bestand auf Veränderungen der Umweltbedingungen im Detail zu analysieren, das letztgenannte Modell eignet sich zur längerfristigen Betrachtung von Wachstumstrends in aggregierter Form.

Beiden Modellen ist gemein, dass sie einen Waldbestand als räumlich-zeitliches System verstehen, das Verhalten des Bestands insgesamt aus dem Wachstum der Bäume und ihrer Interaktion ableiten und eine Abbildung des Bestandswachstums in Abhängigkeit von Klima- und Standortvariablen ermöglichen. Dabei beschreibt BALANCE das Baum- und Bestandswachstum anhand physiologischer Prozesse im Tages- bzw. 10-Tages-Takt. SILVA simuliert dagegen in 5-Jahres-Abständen und bildet den Zuwachs und die Mortalität von Baum und Bestand statistisch in Abhängigkeit von aggregierten Klima- und Standortvariablen ab. Während BALANCE in erster Linie als Forschungswerkzeug konzipiert ist, wird SILVA routinemäßig in der Forstplanung für Szenariorechnungen über Zeiträume von 30 bis 50 Jahren verwendet.

In ihrem jeweiligen Anwendungsbereich sind beide Modelle wiederholt auf ihre biologische Plausibilität und Prognosegenauigkeit geprüft worden (Pretzsch et al. 2002; Pretzsch 2009; Rötzer et al. 2010; Rötzer et al. 2013). Deshalb können sie im Kontext dieser Studie Hinweise auf die Kausalitäten hinter den beobachteten Wachstumstrends liefern.

Als Ausgangssituation für die Simulationen mit beiden Modellen wurden junge Reinbestände aus Fichte bzw. Buche eingesteuert, die in struktureller und standörtlicher Hinsicht für beide Arten typisch sind. Aktive Nutzungseingriffe unterblieben. Damit entsprechen die Szenarioanalysen bestmöglich den Beobachtungsbeständen, auf denen unsere empirische Analyse beruht.

Mit BALANCE wurde das Baum- und Bestandswachstum auf täglicher Basis über 30 Jahre simuliert. Für die Szenarioanalysen wurden unterschiedliche Entwicklungsgänge für Klima, CO<sub>2</sub> und N-Deposition ausgewählt. Das Referenzszenario basiert auf dem für Mitteleuropa typischen Klima von 1901–1930 und verwendet auch die für diese Periode gültige CO<sub>2</sub>-Konzentration und N-Deposition. In den weiteren Szenarien wurden zunächst die Klimabedingungen auf jene der Periode 1981–2010 verändert, dann die angestiegene CO<sub>2</sub>-Konzentration eingefügt und die gestiegene N-Deposition eingesteuert, so dass das letzte Szenario den gegenwärtigen Wuchsbedingungen entspricht. Die Szenarioanalysen mit SILVA reichen bei der Fichte bis zum

Alter 120 Jahre und bei der Buche bis zum Alter 160 Jahre, wobei von drei Konstellationen der Umweltbedingungen ausgegangen wurde. Jedes dieser Szenarien wurde in SILVA eingesteuert, dessen Standortleistungsmodell auf drei Variablengruppen basiert:

- Variablen der Nährstoffversorgung
- Charakteristika von Temperatur und Strahlung
- Charakteristika der Wasserversorgung

Unser Referenzszenario, im Folgenden »1901–1930« genannt, basiert auf den in Abbildung 2 dargestellten Umweltbedingungen in dieser Zeit, deren Durchschnittswerte für den gesamten Simulationszeitraum als konstant vorgegeben wurden. Das zweite Szenario, »1981–2010«, verwendet dagegen in analoger Weise die Umweltbedingungen für den Zeitraum 1981–2010. Um den Effekt steigender Temperaturen von dem anderer Umweltvariablen trennen zu können, wurde ein drittes Szenario »1981–2010 nur Temperatur« definiert, welches ausschließlich die Variablen, die mit Temperaturen verbunden sind, auf die Werte von 1981–2010 setzt. Alle anderen Variablen werden in der Einstellung von 1901–1930 belassen. Weil zwischen den Perioden 1901–1930 und 1981–2010 Niederschläge kaum variierten, müssen Ergebnisunterschiede zwischen dem

dritten und zweiten Szenario auf Änderungen der Nährstoffversorgung und atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie N-Deposition zurückzuführen sein (Abbildung 2). Durch diese Vorgehensweise können nach dem Ausschlussprinzip Indizien für die Ursachen hinter den Wachstumstrends isoliert werden.

Die Simulationsläufe mit BALANCE erbrachten für die Buche und noch deutlicher für die Fichte, dass Zuwachs und Vorräte merklich zurückgehen (Reduktion auf 84% bzw. 50%), wenn in den Simulationsszenarien die historischen Wuchsbedingungen lediglich durch die gegenwärtigen Klimabedingungen ersetzt werden (Abbildung 6). Damit zeigen die Modellläufe, dass alleine durch die Klimaveränderungen die positiven Wachstumstrends nicht erklärt werden können. Werden aber die gegenwärtig höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration und die erhöhte N-Deposition miteingesteuert, übertreffen die Volumina von Buche und Fichte deutlich das historische Niveau. Im 30-jährigen Durchschnitt liegt nach den Modellläufen der Volumenzuwachs bei der Fichte um 12% und bei der Buche um 18% höher als im Referenzzeitraum für historische Bedingungen (1901–1930, Abbildung 6).

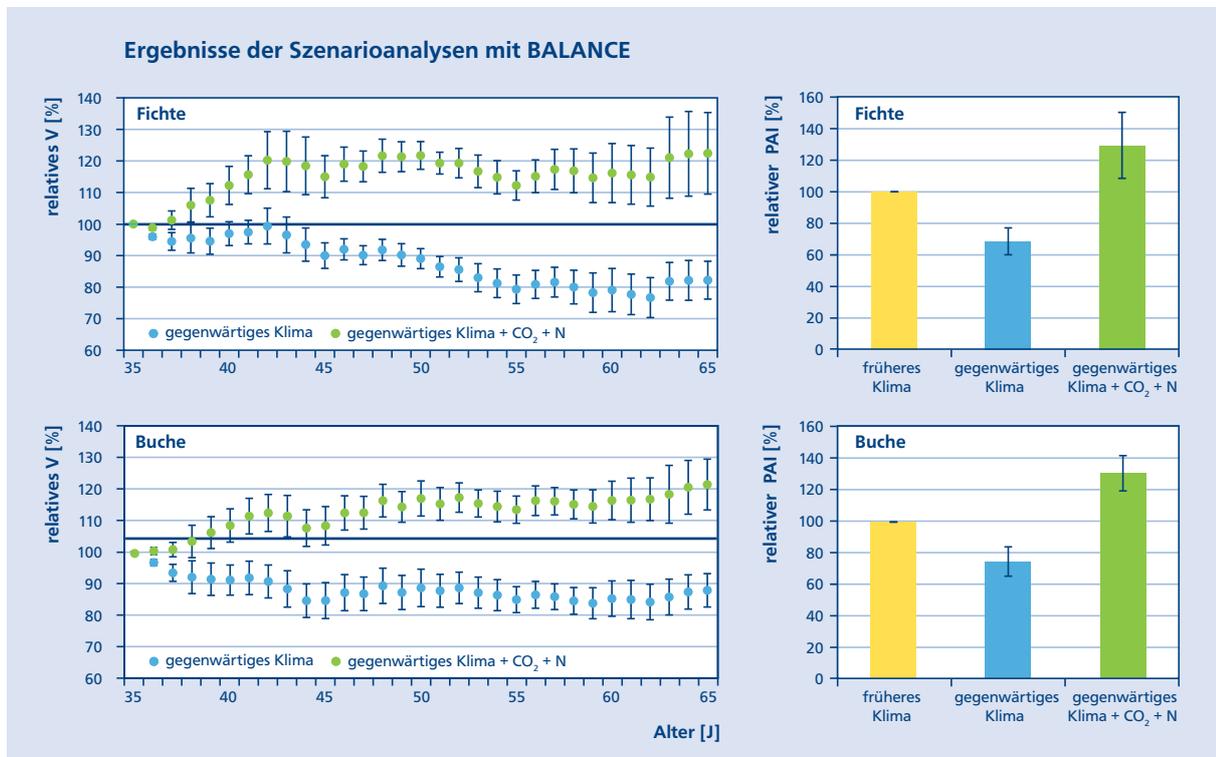


Abbildung 6: Simuliertes Bestandsvolumen V und periodischer Volumenzuwachs PAI für Fichte (oben) und Buche (unten) über 30 Jahre für gegenwärtige Klimabedingungen (1981–2010) sowie gegenwärtige Klimabedingungen mit zusätzlicher Veränderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit gesteigerter N-Deposition bezogen auf das simulierte Wuchsverhalten unter den Klimabedingungen von 1901–1930 als 100%-Basis).

Mit dem Modell SILVA konnten langfristige Wachstumsreaktionen simuliert werden, die in Richtung und Ausmaß den beobachteten Trends sehr nahe kommen (Abbildungen 3 und 7). Unter gegenwärtigen Umweltbedingungen zeigen beide Baumarten ein beschleunigtes Durchmesserwachstum, einen höheren periodischen Bestandszuwachs sowie ein höheres Bestandsvolumen. Dagegen nimmt die Baumzahl pro Hektar von der historischen zur gegenwärtigen Zeitperiode deutlich ab. Diese Effekte sind bei der Buche stärker ausgeprägt als bei der Fichte. Bemerkenswerterweise zeigt ein drittes Szenario, in welchem nur die temperaturbezogenen Wuchsbedingungen auf die aktuellen Werte gesetzt und die anderen Umweltvariablen auf historischem Level belassen wurden, keine Wachstumstrends gegenüber 1901–1930 für die Buche und ein deutlich gehemmtes Wachstum für die Fichte (Abbildung 7). Demnach legen die Szenarioanalysen nahe, dass die Temperaturzunahme kaum die Ursache für die Wachstumssteigerungen sein dürfte. Weil die Temperaturanstiege nicht mit erhöhten Niederschlägen verbunden sind (Abbildung 2), wirken sie vermutlich wegen steigender Evaporation negativ auf das Wachstum der Fichte, welche in Regionen mit guter Wasserversorgung ihre natürliche Verbreitung hat (Tjoelker et al. 2007). Das wiederum lässt vermuten, dass die verbesserte Versorgung mit Stickstoff und CO<sub>2</sub> die entscheidende Ursache hinter den beobachteten Wachstumstrends darstellt. Im Fall der Fichte vermag die verbesserte Nährstoffversorgung offensichtlich den leicht ansteigenden Wasserstress zu kompensieren bzw. zu überkompensieren. Diese Modellergebnisse korrespondieren gut mit jenen von BALANCE, die auf einem völlig anderen Modellierungskonzept und einer anderen Datenbasis beruhen.

### Langfristige Versuchsflächen, Modelle und Walddynamik im Anthropozän

Während bisherige Studien auf der Ebene des Einzelbaums ansetzten, um Wachstumstrends zu identifizieren (Kahle 2008), stellt unsere Untersuchung den Effekt der veränderten Wuchsbedingungen auf Bestandesebene und damit seine Relevanz für die Forstwirtschaft dar. Die Länge der Beobachtungszeit von mehr als einem Jahrhundert erlaubt gut fundierte Vergleiche zwischen früherem und gegenwärtigem Wachstum an gleichen Wuchsorten. Weil die Studie auf unbehandelten, voll bestockten Beständen gründet, wurden eventuelle Wachstumstrends nicht »wegdurchforstet«. Vielmehr repräsentieren die untersuchten

Bestände die Auswirkungen von Umweltveränderungen auf Baum- und Bestandesebene bei maximaler Bestandsdichte. Die Entwicklung von Bäumen und Beständen vollzieht sich eher in Abhängigkeit von der Ressourcenverfügbarkeit und weniger in Abhängigkeit vom Alter (Enquist und Niklas 2001). Verbesserte Ressourcenverfügbarkeit in Form von Stickstoff und Kohlendioxid lässt die Bäume und Bestände somit schlichtweg schneller altern. Wie von der allometrischen Theorie vorhergesagt (Enquist und Niklas 2001; West et al. 2009), erweisen sich die allometrischen Trajektorien als konstant (Harper 1977), die Bestände wachsen aber schneller entlang dieser Trajektorien. Die Konstanz der Selbstdurchforstungslinie, die die Tragfähigkeit eines Standorts charakterisiert, belegt, dass der Vorrat an Ressourcen gegenwärtig kaum höher ist, jedoch der Turnover und die Wachstumsgeschwindigkeit zugenommen haben. Das korrespondiert mit den Ergebnissen von Messungen des Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), welche zeigen, dass zwar die Dauer und Effizienz der Photosynthese zugenommen haben, dass dies aber nicht auf einer angestiegenen Blattfläche oder Bestandsdichte beruht (Myneni et al 2001; Hicke et al. 2002).

Durch Kombination von statistischen und modellbasierten Analysen gelingt die folgende Differenzialdiagnose, warum Waldbestände in Mitteleuropa ihr Wachstum beschleunigt haben. Die Szenarioanalysen mit beiden Modellen belegen, dass Änderungen von Temperatur und Niederschlag sowie die Verlängerung der Vegetationsperiode alleine die aufgedeckten Wachstumstrends von Fichte und Buche nicht erklären können. Ohne den Düngungseffekt der erhöhten N-Deposition und ohne Einbeziehung der angestiegenen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration können die beobachteten Veränderungen von Zuwachs und Vorrat nicht vorhergesagt werden. Die erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und N-Deposition scheinen simultan zwei wachstumslimitierende Faktoren auf unseren langfristigen Versuchsflächen zu beseitigen. Die einzige uns bekannte experimentelle Wachstumsstimulation erwachsener Bäume durch Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde mit historischer und erhöhter (530 ppm) CO<sub>2</sub>-Konzentration über einen Zeitraum von nur vier Jahren vorgenommen (Körner et al. 2005). Demgegenüber basieren unsere Ergebnisse auf langfristigen Wachstumsreaktionen ganzer Bestände mit historischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 295 ppm und gegenwärtigen Konzentrationen von ca. 390 ppm.

Abbildung 7: Ergebnisse der Szenarioanalysen mit SILVA; simulierte Entwicklung des mittleren Baumdurchmessers  $dq$ , des periodischen Volumenzuwachses des Bestands PAI, des Bestandsvolumens  $V$ , der Baumzahl  $N$  über dem Bestandsalter für Fichte und Buche. Durchgezogene Linien: historische Umweltbedingungen (1901–1930), gebrochene Linie: gegenwärtige Umweltbedingungen (1981–2010), punktierte Linie: Annahme, dass sich nur die Temperatur, nicht aber andere Umweltvariablen auf das Niveau von 1981–2010 verändert haben (1981–2010 nur Temperatur). Jede Linie repräsentiert das Mittel von fünfmal wiederholten Szenariorechnungen.



Die angestiegene CO<sub>2</sub>-Konzentration kann die fotosynthetische Aktivität steigern, die Lichtnutzungs-Effizienz erhöhen und den Lichtkompensationspunkt verringern (Granados und Körner 2002). Dass die in etwa verdreifachte N-Deposition auf unseren Versuchsflächen eine Schlüsselrolle zur Erklärung der Wachstumstrends in den letzten Jahrzehnten spielt, wird durch die Szenarioanalysen mit beiden Modellen bestätigt. Erhöhte N-Versorgung kann die Produktivität und Wassernutzungseffizienz erhöhen und so Beeinträchtigungen des Wachstums durch Klimaänderungen in Richtung warm und trocken verringern. Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können allerdings eine Verringerung der N-Konzentration in Blättern herbeiführen (Ainsworth und Long 2005), was unter anderem an erhöhten Kohlenhydratkonzentrationen und verringerter Aufnahme von Mineralstoffen aus dem Boden liegt (Taub und Wang 2008). Gesteigerte N-Depositionen, wie sie in den letzten Jahrzehnten auftraten, können diese Effekte allerdings überlagern, die N-Versorgung trotz erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration verbessern und den Zuwachs erhöhen.

Fichte wie Buche profitieren von der erhöhten CO<sub>2</sub>- und N-Versorgung. Die artspezifischen Reaktionsmuster werden durch die Modellszenarien plausibel. Da die Fichte stärker durch geringe Wasserversorgung und höhere Temperaturen im Zuwachs limitiert wird als die Buche, wird die Fähigkeit der Fichte, von den verbesserten CO<sub>2</sub>- und N-Konzentrationen zu profitieren, reduziert. Vermutlich aufgrund dieser stärkeren Limitierung durch Wasser und Wärme fällt die Mortalität der Fichte gegenwärtig so hoch aus wie in der Vergangenheit (Pretzsch 2009; Tjoelker et al. 2007). In Buchenbeständen mit ihrer wesentlich breiteren Kronenschicht könnte sich der Anstieg oder frühere Beginn der fotosynthetischen Aktivität im Bereich der Schattenkrone positiv auf das Wachstum auswirken (Granados und Körner 2002). Die Verlängerung der Vegetationszeit mindert wachstumssenkende Klimaeffekte, wie z. B. Anstieg der Temperatur und Verringerung des Sommerniederschlags, bei Buche stärker als bei Fichte. Die immergrüne Fichte war schon immer dazu in der Lage, milde Perioden im Winter und Herbst durch Zuwachs zu nutzen, während die Buche nun durch verlängerte Laubpräsenz erst Zugang zu Ressourcen in bisher nicht nutzbaren Zeiten erhält.

Das schnellere Wachstum und die schnelle Alterung von Bäumen und Wäldern verlangt allen mit ihnen verbundenen Organismen einschließlich der Menschen eine Anpassung ab. Für alle Pflanzen und Tiere, deren Habitate von speziellen Waldentwicklungspha-

sen und -strukturen abhängen, beeinflusst beschleunigtes Wachstum ihre Lebensbedingungen und zwingt sie zu höherer Mobilität (Walther et al. 2002). Weil die Buche stärker durch die veränderten Wuchsbedingungen angeregt wird, könnte die Fichte auf lange Sicht der Verlierer sein. Der Mensch kann von dem schnelleren Wachstum durch erhöhte Kohlenstoffbindung aber auch forstwirtschaftlich profitieren. Aufgrund der beschleunigten Größenentwicklung werden Zieldurchmesser und zuwachsoptimale Umtriebszeiten früher als in der Vergangenheit erreicht. Auf das erhöhte Zuwachsniveau kann die Forstwirtschaft mit Anhebung der Nutzungssätze reagieren. Der Befund, dass die gegenwärtigen Wachstumstrends höhere Bestockungsdichten erlauben, bedeutet, dass zu starke Durchforstungen die erhöhte Produktivität teilweise verschenken. Indem definierte Baumgrößen, Bestandsvolumina und Mortalitätsraten 20 bis 30 Jahre früher erreicht werden als in der Vergangenheit, werden altersbasierte Erfahrungswerte, Ertragstabellen und andere Modelle, die das Wachstum von Beständen in Abhängigkeit vom Alter betrachten, ungültig (Pretzsch 2009). Risikobehaftete Entwicklungsphasen werden ebenfalls schneller durchlaufen als in der Vergangenheit. Die Verkürzung von Umtriebszeiten kann in diesem Zusammenhang eine Reduktion der Risikobelastung von Wäldern durch Schäden wie Windwurf, Borkenkäferkalamitäten oder Schneebruch bedeuten.

Unter der Annahme, dass die Wuchsbeschleunigung durch erhöhte Ressourcenversorgung innerhalb der Vegetationsperiode und einer Ausdehnung der Länge der Vegetationszeit verursacht wird, dürften ähnliche Wachstumstrends für eine Region von ca. 45 · 10<sup>6</sup> ha von Norddeutschland bis Slowenien und von Frankreich bis Ungarn zu erwarten sein (IPCC 2007). Weil unsere Befunde durchweg auf unbehandelten Waldbeständen beruhen und in vielen Fällen Vor- und Folgegeneration an gleichem Wuchsort stocken und damit gleiche Genotypen repräsentieren, scheiden Veränderungen der waldbaulichen Bewirtschaftung oder genetische Veränderungen als Ursachen der Wachstumstrends aus. In aktiv bewirtschafteten Wäldern in Mitteleuropa dürften derartige Entwicklungen den Wachstumstrend eher verstärken. Andere mitteleuropäische Arten wie Traubeneiche, Stieleiche und Kiefer, die auf noch ärmeren Standorten wachsen als Fichte und Buche, lassen noch stärker positiv gerichtete Wachstumstrends erwarten, da bei ihnen der Grenznutzen der Nährstoffimporte für das Wachstum noch höher ist.

Die seit einigen Dekaden steigenden Zuwachsraten, Bestandsvorräte und Erntemengen erhöhten vermutlich die Kohlenstoffbindung in mitteleuropäischen Wäldern. Für eine überschlägige Abschätzung nehmen wir eine Steigerung des jährlichen Volumenzuwachses von  $4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ J}^{-1}$  (entspricht in etwa 1 t Kohlenstoff) auf einer Fläche von 45 Mio. ha an, was gleichbedeutend mit einer zusätzlichen Kohlenstoffsequestrierung von 45 Mio. t Kohlenstoff pro Jahr ist. Die aufgrund der erhöhten Zuwachsraten intensivierte Ernte kann aber neue lokale Probleme verursachen, wie etwa einen mit der historischen Streunutzung vergleichbaren Export mineralischer Nährstoffe. Ob die gegenwärtig positiven Wachstumstrends in Zukunft aufgrund von Klimaveränderungen in negative Trends umschlagen (IPCC 2007), erfordert wiederum langfristige Beobachtungen auf Versuchsflächen zur Indikation, Analyse und zum Verstehen von Wachstumsveränderungen.

Für dieselbe Zeit, in welcher die Angst vor einem Kollaps von Waldökosystemen durch das »Waldsterben« und die Klimaveränderungen die öffentliche Debatte dominierte (IPCC 2007), zeigen die kontinuierlichen Aufzeichnungen auf langfristigen Beobachtungsflächen eine signifikante Beschleunigung des Waldwachstums in Mitteleuropa. Solche Flächen gehen zurück auf Hans Carl von Carlowitz und andere Gründerväter der Forstwirtschaft, die damit die quantitative Untermauerung nachhaltigen forstlichen Handelns auf regionaler Ebene anstrebten. Leider wurden viele der in der Gründerzeit angelegten langfristigen Versuchsflächen mit dem Aufkommen großflächiger Forstinventuren aufgegeben. Dagegen unterstreicht unsere Studie den nach wie vor einmaligen und unverzichtbaren Beitrag unbehandelter langfristiger Beobachtungsflächen, zum regionalen aber auch globalen Monitoring von Waldökosystemen, zur Waldökosystemforschung und zur Umweltpolitik. Auch noch 300 Jahre nachdem Hans Carl von Carlowitz die Idee der Nachhaltigkeit mit seiner *Sylvicultura Oeconomica* im Jahre 1713 in die Forstwirtschaft einbrachte, dienen langfristige Versuchsflächen als herausragender Indizienbeweis für die langfristigen Einflüsse des Menschen auf Waldökosysteme im Anthropozän.

## Literatur

Ainsworth, E.A.; Long, S.P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* 165, S. 351–372

Assmann, E.; Franz, F. (1963): Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. In: Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1990), S. 52–63

Ballantyne, A.P.; Alden, C.B.; Miller, J.B.; Tans, P.P.; White, J.W.C. (2012): Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* 488, S. 70–73

Carlowitz, v. H.C. (1713): *Sylvicultura Oeconomica* oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. JF Braun, Leipzig, 430 S.

Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108, S. 101–112

Churkina, G. et al. (2010): Interactions between nitrogen deposition, land cover conversion, and climate change determine the contemporary carbon balance of Europe. *Biogeoscience* 7, S. 2749–2764

Crutzen, P.J. (2002): Geology of mankind. *Nature* 415, S. 23

Enquist, B.J.; Niklas, K.J. (2001): Invariant scaling relations across tree-dominated communities. *Nature* 410, S. 655–660

Ganghofer, v. A. (1881): *Das Forstliche Versuchswesen*. Band I, Augsburg, 505 S.

Granados, J.; Körner, C. (2002): In deep shade, elevated CO<sub>2</sub> increases the vigor of tropical climbing plants. *Glob. Change Biol.* 8, S. 1109–1117

Harper, J.L. (1977): *Population Biology of Plants*. Academic Press, London, New York

Hartig, G.L. (1795): *Anweisung zu Taxation der Forsten oder zur Bestimmung des Holzertrages der Wälder*. Heyer Verlag, Gießen, 166 S.

Hicke, J.A.; Asner, G.P.; Randerson, J.T.; Tucker, C.; Los, S.; Birdsey, R.; Jenkins, J.C.; Field, C.; Holland, E. (2002): Satellite-derived increases in net primary productivity across North America, 1982–1998. *Geophysical Research Letters*, 29 (10); 691–694.

IPCC (2007): *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I Report. The Physical Science Basis*, Geneva, Switzerland, 104 S.

Kahle, H.P. et al. (2008): *Causes and Consequences of Forest Growth trends in Europe*. European Forest Institute Research Report 21, Brill, Leiden, Bosten

Kauppi, P.E.; Mielikäinen, K.; Kuusela, K. (1992): Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990, *Science* 256: 70–74.

Körner, C. et al. (2005): Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Science* 309, S. 1360–1362

Magnani, F. et al. (2007): The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447, S. 848–850

- Menzel, A.; Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397, S. 659
- Myneni, R.B.; Dong, J.; Tucker, C.J.; Kaufmann, R.K.; Kauppi, P.E.; Liski, J.; Zhou, L.; Alexeyev, V.; Hughes, M.K. (2001): A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *PNAS* 98(26), S. 14784–14789
- Pinheiro, J.C.; Bates, D.M. (2000): *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer, 528 S.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Schütze, G.; Uhl, E.; Rötzer, T. (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat. Commun.* 5:4967, doi: 10.1038/ncomms 5967
- Pretzsch, H. (2009): *Forest dynamics, Growth and Yield*. Springer, Berlin, Heidelberg, 664 S.
- Pretzsch, H.; Grote, R.; Reineking, B.; Rötzer, T.; Seifert, S. (2008): Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Ann Bot* 101, S. 1065–1087
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Ďurský, J. (2002): The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *Forest Eco Manage* 162, S. 3–21
- Rötzer, T.; Liao, Y.; Klein, D.; Zimmermann, L.; Schulz, C. (2013): Modellierung des Biomassezuwachses an bayerischen Waldklimastationen unter gegebenen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen. *AFJZ* 184-11/12: S. 263–277
- Rötzer, T.; Leuchner, M.; Nunn, A.J. (2010): Simulating stand climate, phenology, and photosynthesis of a forest stand with a process based growth model. *Int. J. Biometeorology* 54/4: S. 449–464
- Schönwiese, C.D.; Staeger, T.; Trömel, S. (2005): *Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland*. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): *Klimastatusbericht 2005*, Selbstverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 191 S.
- Schellnhuber, H.J. (1999): 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402:C19-C23
- Schober, R. (1970): *Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M. 154 S.
- Spiecker, H.; Mielikäinen, K.; Köhl, M.; Skovsgaard, J.P. [Hrsg.] (1996): *Growth trends in European forests*. *Europ For Inst, Res Rep* 5, Springer-Verlag, Heidelberg, 372 S.
- Taub, D.R.; Wang, X.Z. (2008): Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO<sub>2</sub>? A critical examination of the hypotheses. *J. Integrative Plant Biology* 50, S. 1365–1374
- Tjoelker, M.G.; Boratynski, A.; Bugala, W. (2007): *Biology and Ecology of Norway Spruce*. Springer, 496 S.
- Ulrich, B. (1990): Waldsterben: forest decline in West Germany. *Environ. Sci. Technol.*, 24 (4), S. 436–441
- Walther, G.R.; Post, E.; Convey, P.; Menzel, A.; Parmesan, C.; BeeBee, T.J.C.; Fromention, J.-M.; Hoegh-Guldberg, O.; Bairlein, F. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, S. 389–395
- West, G.B.; Enquist, B.J.; Brown, J.H. (2009): A general quantitative theory of forest structure and dynamics. *PNAS* 106(17), S. 7040–7045
- Zuur, A.F.; Ieno, E.N.; Walker, N.J.; Saveliev, A.A.; Smith, G.M. (2009): *Mixed Effects Models and extensions in Ecology in R*. Springer, 574 S.

**Keywords:** Growth trends, long-term research plots, Climate Change, Anthropocene

**Summary:** We are living in the Anthropocene, an epoch characterized by escalating effects of humans on the earth and its ecosystems. Forest ecosystems, which cover more than 30% of the land surface in Europe have been increasingly exposed to climate change for over 100 years. While only two decades ago the »Waldsterben« (forest die-back) seemed to question the survival of forest ecosystems on large areas, presently phenologic observations, NDVI sensing, and inventories indicate rather rapidly growing than collapsing forests in Europe. Here, we show that currently tree size growth, stand volume growth, and accumulation of standing stock of the main tree species in Central Europe proceed about 50%–100% faster than in the past. As forest stands develop faster, their tree number, stand density and mortality are currently 25% lower than in stands of the same age in the past. Stands still follow similar general rules of tree and stand allometry, for example the volume reached at a given stand height did not change, however, given tree and stand values are achieved earlier. In order to better understand the reasons behind the changing stand dynamics we compile concurrent trends of climate change and apply them for scenario analyses with state-of-the-art growth models. Our results indicate that rising temperatures and precipitation together with an extension of the vegetation period hardly explain the accelerated dynamics. Only when atmospheric CO<sub>2</sub>-concentration and N-deposition are added as driving variables, models fully explain the observations. Our study is based on the oldest existing observational plots in Bavaria, continuously surveyed since 1870. Even 300 years after von Carlowitz coined the term »Nachhaltigkeit« by publishing *Sylvicultura Oeconomica* in 1713, and centuries after he and other precursors of forestry triggered long-term observation for substantiation of sustainable behaviour, their plots provide momentous facts for better understanding, modelling, and stewardship for forests in the Anthropocene.