

# Einflüsse von Astarchitektur und Kronenmorphologie auf den Radialzuwachs und die Trockentoleranz von Rotbuche

Katja Kröner<sup>1</sup>, Elena Larysch<sup>1</sup>, Thomas Seifert<sup>1,2</sup>

## Abstract

*In this study, potential relations between crown dimension and branch architecture with radial diameter growth of 67 European beech trees were investigated. Detailed 3D information on the tree structure was derived from point clouds based on terrestrial laser scans. After individual tree segmentation, quantitative structural models were fitted to the 3D point cloud data to quantify the crown structure. Based on this information, different crown dimensional and branching variables were computed. Using regression models, these variables were contrasted with radial growth, analysed through tree ring measurements obtained from core samples. The results suggest that branching patterns significantly influence the radial growth of beech. Specifically, the average cumulated branch length (conduction length) from twig tip to stem base and the average individual branch length significantly influenced radial growth, in addition to water supply, fructification effects and late frost occurrence. Interestingly, when branch architecture variables were added to the regression, the significance of the tree crown dimensional variables diminished. This indicates that the regulation of effect at branch-level dominates over crown-level effects.*

Keywords: Drought reaction, crown architecture, radial growth, QSM, LiDAR

## 1 Einleitung

Bäume sind langlebige ortsgebundene Organismen. Daher sind sie zwangsläufig den Wachstumsbedingungen in ihrer unmittelbaren Umgebung wie dem Mikroklima und biotischen Interaktionen vor Ort ausgesetzt (Deslauriers et al. 2017). Aufgrund der dynamischen Veränderungen der Wachstumsbedingungen in einem Waldbestand entwickelt jeder Baum im Laufe der Zeit eine individuelle Ast- und Kronenstruktur. Diese ist das Resultat kontinuierlicher Anpassungen, insbesondere an das Lichtregime, um den Zugang zu Ressourcen zu optimieren und die Wuchleistung gemäß den aktuellen Bedingungen zu maximieren.

Sobald die Bäume ein bestimmtes Alter und eine gewisse Größe erreicht haben, reflektieren die Kronenarchitektur und die Holz Anatomie diese Anpassungsvorgänge (Piermattei et al. 2020). Es ist wahrscheinlich, dass durch die Anpassung

und resultierende Struktur der Krone und Holz Anatomie auch ökophysiologische Prozesse, wie etwa die Wasserleitung, beeinflusst werden.

Die Buche steht als Baumart während der laufenden Umweltveränderungen insbesondere durch Trockenheit unter Stress (Obladen et al. 2021). Erste Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass unterschiedliche historische Wachstumsverläufe das Potenzial von Buchen bestimmen, auf unmittelbaren Stress zu reagieren, wie jüngste Forschungsergebnisse zu diesen sogenannten Legacy-Untersuchungen zeigen (Bose et al. 2020, Pretzsch et al. 2022). Daraus geht hervor, dass Bäume mit unterschiedlicher Kronendimension und Holzstruktur unterschiedliche Fähigkeiten aufweisen, auf plötzliche Veränderungen der Wachstumsbedingungen, wie Trockenheit, zu reagieren. Von besonderem Interesse, aber noch weitgehend unerforscht, ist die Frage, ob nicht nur Kronendimensionen, sondern auch unterschiedliche Ast- und Verzweigungsarchitekturen verschiedener Individuen einer Art besser geeignet sind, mit extremen Wetterereignissen wie Trockenheit fertig zu werden als andere. In einer orientierenden Untersuchung an einem kleineren Kollektiv (N=67 auf einem Standort) wurde deshalb untersucht, inwiefern die Kronendimension und die Aststruktur den Radialzuwachs von Buchen beeinflussen.

---

<sup>1</sup> Professur für Waldwachstum und Dendroökologie  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Freigurg im Briesgau  
thomas.seifert@wwd.uni-freiburg.de

<sup>2</sup> Department of Forest and Wood Science,  
Stellenbosch University  
Stellenbosch, Südafrika

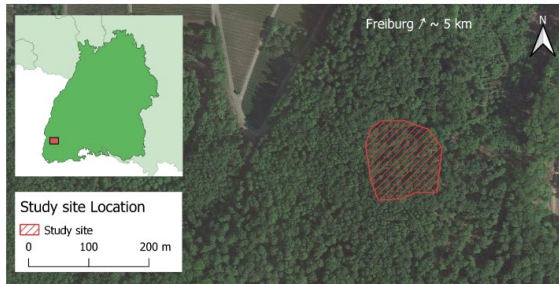


Abbildung 1: Study site close to Freiburg, source: © GeoBasis-DE / BKG (2023)

## 2 Material

In einem 50- bis 80-jährigen Buchenbestand (*Fagus sylvatica* L.) am Schönberg (47°56'48.1"N, 7°46'11.7"E), in der Nähe von Freiburg im Breisgau wurden Proben entnommen. Der Bestand befindet sich auf etwa 380 m über N.N., stockt auf lößüberlagertem Kalkverwitterungslehm und weist einen geschlossen bis gedrängten Bestandeschluss auf. Die durchschnittliche Jahreslufttemperatur beträgt etwa 10,2 °C und die Jahresniederschlagssumme beträgt 967 mm, was gute Wuchsbedingungen für die Buche bedeutet. Entsprechend dominiert die Buche das Bestandebild stark; nur einzelne Exemplare anderer Baumarten, darunter Roteiche, Stieleiche, Bergahorn und Vogelkirsche, sind eingestreut. Der Bestand wurde in der Vergangenheit nach dem Z-Baum-Konzept durchforstet und steht zur Durchforstung an. Die Altersspreitung deutet daraufhin, dass der Bestand aus Naturverjüngung entstanden ist. Weitere Informationen dazu liegen jedoch nicht vor. In Nachbarbeständen in ähnlichem Alter und älter fiel die Buche großflächig aufgrund der Trockenheiten 2018 bis 2022 und daraus folgender Vitalitätsschwäche aus. Der 0,34 ha große Bestand wurde per terrestrischem Laserscanning erfasst und 80 Bäume der Kraft'schen Klassen 1-3 wurden zur Beprobung mit Bohrkernen ausgewählt. Im Verlauf der Untersuchung wurde die Anzahl auf 67 Buchen reduziert, da die Qualität einiger Scans für eine Analyse nicht ausreichend war.

## 3 Methoden

Insgesamt folgte die Methodik dem in Abbildung 2 dargestellten Schema.

### 3.1 Laserscanning und Segmentierung

Die Scandaten wurden mit der Software RiSCAN Pro, Version 2.12.1, verarbeitet, die eine Zusammenführung, Visualisierung und Filterung von Punktwolken ermöglicht (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2021). Die Punktwolken wurden anhand der folgenden Attribute gefiltert: Punkte mit (1) einer Abweichung größer als 20, (2) einem Reflexionsgrad kleiner als -15 oder (3) ohne einen Nachbarpunkt in einem Bereich von 10 cm<sup>3</sup>, wurden gelöscht, um das Rauschen in den Daten zu reduzieren. Anschließend wurden die Punktwolken aller Scanpositionen zu einem Datensatz zusammengeführt und auf einen Punkt pro cm<sup>3</sup> verkleinert, um die Berechnungseffizienz für die nächsten Schritte zu erhöhen.

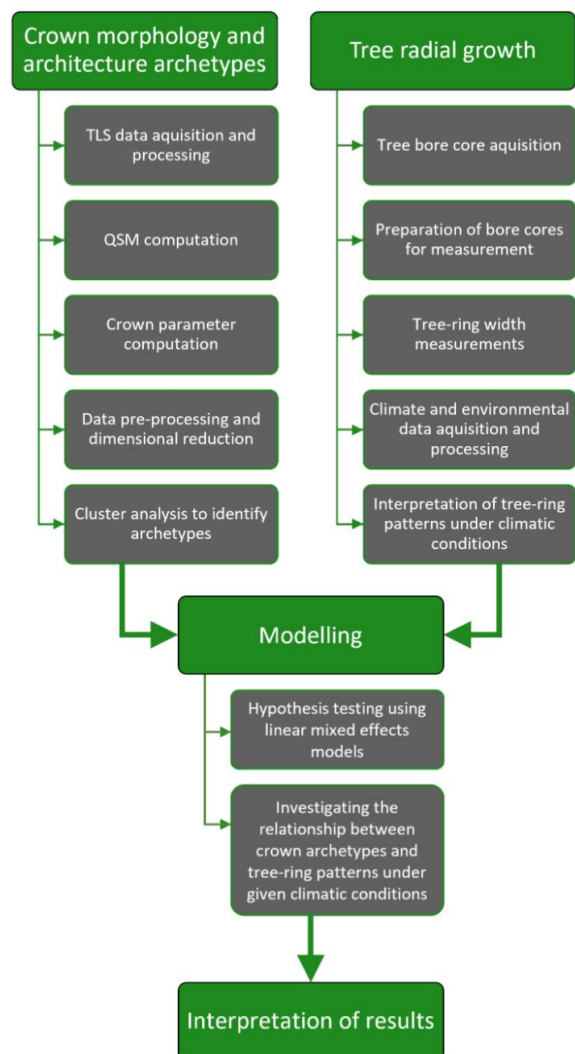


Abbildung 2: Flowchart of the applied methods

Anschließend wurden einzelne Bäume aus der Punktwolke des Bestandes mithilfe der Software CloudCompare, Version 2.12.beta, manuell segmentiert (Girardeau-Montaut 2022).

### 3.2 Quantitative Strukturmodelle

Quantitative Strukturmodelle (QSMs) wurden verwendet, um die Aststruktur der Bäume im Detail zu rekonstruieren. Hierzu kam die Software *TreeQSM*, Version 2.4.1, (Raumonen 2022) unter der Programmierumgebung *MATLAB* zum Einsatz. QSMs bieten umfassende Informationen zu den topologischen, geometrischen und volumetrischen Eigenschaften des Baumes. *TreeQSM* nutzt die Informationen aus der TLS-Punktwolke und passt Zylinder an die Baumstruktur an. Die wesentlichen Schritte in diesem Prozess sind (1) die Unterteilung der Punktwolke in kleine Bereiche bzw. *Flicker*, die zur Rekonstruktion der Baumoberfläche und Identifikation der Verzweigungspunkte (Bifurkationen) genutzt werden. Anschließend werden (2) die letzteren verwendet, um Segmente ohne Verzweigungen zu finden und daraus Äste zu bilden. Die Segmente werden an den Verzweigungspunkten verbunden und folgen dabei dem längsten möglichen Pfad, um realistische Verzweigungen zu rekonstruieren. Die anfänglichen Flicker werden in Stamm und Zweige unterteilt. Zum Schluss werden (3) Zylinder an die Stamm- und Astoberflächen mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate angepasst und (4) Daten über Baum- und Zweigeigenschaften berechnet (Raumonen 2022). Abbildung 3 veranschaulicht die Punktwolke eines Baumes und das resultierende QSM.



Abbildung 3: Point cloud (left) and resulting QSM (right)

### 3.3 Jahrringanalyse

Die Jahrringbeprobung erfolgte mithilfe eines Zuwachsbohrers (Typ Haglöf). Die Proben wurden im Labor auf Objektträger aufgebracht, getrocknet, geschliffen und schließlich am Auflichtmikroskop vermessen. Die Analyse stützte sich auf bewährte Methoden der Jahrringanalyse und wurde mit der Analysesoftware *PAST 4* durchgeführt. Die Datierung wurde an lokaler Referenzchronologien überprüft.

Da sich die aktuelle Astarchitektur im Laufe der Jahre verändert haben könnte, wurden nur Jahrringe aus dem Zeitraum von fünf Jahren vor bis zwei Jahre nach dem Laserscanning im Jahr 2020 zur weiteren Analyse herangezogen. Dies ermöglichte die Annahme, dass das Radialwachstum im Untersuchungszeitraum mit der Kronendimension und den Asteseigenschaften korrespondierte.

### 3.4 Klimatische Daten

Für die Identifizierung von Dürreereignissen wurde der Standardisierte Niederschlags-Evapotranspirationsindex (SPEI) verwendet. Die Klimadaten für die Indexberechnung stammten aus dem Open Source Klimadatenzentrum des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2023). Die Daten für das Untersuchungsgebiet wurden aus Rastern der monatlichen gemittelten täglichen Lufttemperatur (in 2 m) und monatlich aufsummiertem Niederschlag extrahiert. Für die Indexberechnung wurde das R-Paket *SPEI* verwendet (Beguiria und Vicente-Serrano, 2023). Zunächst wurde die monatliche potenzielle Evapotranspiration (PET) mittels der *Thornwaite*-Funktion des Pakets berechnet, basierend auf der Lufttemperatur und dem Breitengrad des Untersuchungsgebiets. Anschließend wurde die klimatische Wasserbilanz durch Subtraktion der PET vom monatlichen Niederschlag ermittelt. Die Funktion *spei* wurde verwendet zur Berechnung der 12-Monats-SPEI (SPEI12) als der Summe der BAL-Werte der letzten 11 Monate vor dem aktuellen Monat. Dadurch passt sich der Index an bodenwasserspeicherbedingte Lag-Effekte des untersuchten Systems anpasst. Es wurde dann die SPEI Werte der Monate Mai, Juni und Juli verwendet, in denen die Buche am sensibelsten auf Wasserentzug reagiert.

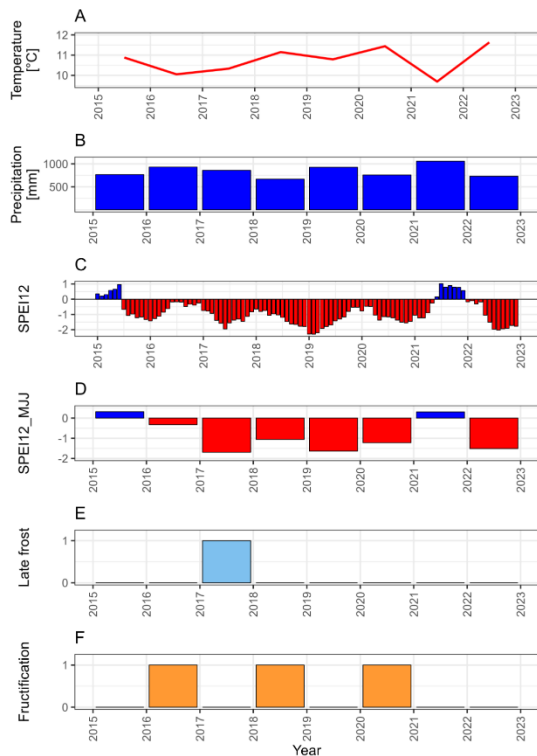


Abbildung 4: Climate, fructification and late frost

Zur Identifizierung von Spätfrostereignissen wurden Rasterdaten der minimalen täglichen Lufttemperatur (2 m) aus dem DWD-Klimadatenzentrum verwendet (DWD, 2023). Nach dem DWD Spätfrost wurde definiert als Frost, der nach Beginn der Vegetationsperiode auftritt. Daher wurde zunächst der Zeitpunkt des Blattaustriebs von *Fagus sylvatica* auf der Grundlage der täglichen durchschnittlichen Lufttemperatur mit dem R-Paket *LWFBrook90R* modelliert (Schmidt-Walter et al., 2023), welches das *Soil Vegetation Atmosphere Transport* (SVAT) Modell *LWFBROOK90* implementiert (Hammel und Kennel, 2001 ein ähnlicher Ansatz wie der von Bascietto et al. (2019) angewendet. Alle Tage zwischen dem 15. April und dem 15. Mai, an denen die Temperatur unter  $-0^{\circ}\text{C}$  fiel, wurden ermittelt. Anschließend wurden die Dauer (Anzahl der aufeinanderfolgenden Frosttage) und die Intensität (kälteste Temperatur) der Frostereignisse untersucht.

Fruktifikationsereignisse wurden anhand der Informationen des jährlichen Waldzustandsberichts Baden-Württemberg (siehe beispielsweise Meining et al. 2018) identifiziert.

### 3.5 Statistische Auswertung

Es wurden diverse Variablen berechnet, um die Kronendimension (Kronenmorphologie) und die

Astarchitektur (Kronenarchitektur) zu erfassen. Neben der Baumhöhe und dem Brusthöhdurchmesser wurden insgesamt 14 Kronendimensionsvariablen und zehn Variablen zur detaillierten Beschreibung der Astarchitektur berechnet.

Eine Clusteranalyse wurde verwendet, um die Beobachtungen innerhalb eines Datensatzes in Untergruppen zu unterteilen, die distinkt unterschiedliche morphologische Eigenschaften aufwiesen. Diese Cluster sollten die verschiedenen Archetypen der Kronenmorphologie und -architektur widerspiegeln.

Mithilfe von Regressionsmodellen wurden die einzelnen Kronen-Variablen sowie Fruktifikations- und Klimadaten mit dem Radialzuwachs (Jahringbreite) als unabhängige Variable in Beziehung gesetzt. Hierbei wurden die Einzelbäume ohne Berücksichtigung der Archetypen betrachtet, um nicht durch die vorherige Clustering spezifische Einflussvariablen zu verdecken. Insgesamt wurden drei lineare gemischte Modellfamilien genutzt, die die geklumpfte Datenstruktur in hierarchischen Zufallsfaktoren erfassen. Die Abhängige Variable war der Radialzuwachs. Die Modellfamilien wurden hierarchisch aufgebaut, wobei das komplexeste Modell mit allen unabhängigen Variablen (Klima, Fruktifikation, Spätfrost, Kronenmorphologie und -architektur) schrittweise in weniger komplexen Modelle überführt wurde. Dabei wurde das Modell sequentiell zuerst um die kronenmorphologischen Variablen und dann um die kronenarchitektonischen Variablen reduziert.

Alle Analysen wurden unter Verwendung der Statistiksoftware R durchgeführt (R Core Team 2022). Bei kollinearen Variablen wurden jeweils diejenigen entfernt, die eine schwächere Korrelation zur Effektgröße aufwiesen. Die Modellbeurteilung erfolgte anhand des AIC, des Bestimmtheitsmaßes und des Residuenverhaltens.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Klimatische Einordnung der untersuchten Jahre

Die Temperatur und Niederschlagswerte sowie der daraus ermittelte SPEI-Index (Abb. 4) zeigen, dass mit Ausnahme der Jahre 2015 und 2022

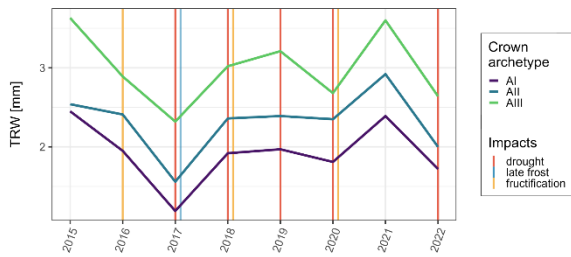


Abbildung 6: Radial Growth (tree ring width) of the three morphological archetypes over the years.

überwiegend Jahre mit Wasserstress im Untersuchungszeitraum vorherrschten.

Fruktifikationsereignisse traten in den Jahren 2016, 2018 und 2020 auf, während Spätfrost lediglich im Jahr 2017 verzeichnet wurde. Die zeitliche Frequenz und Koinzidenz von Trockenheitsphasen, Fruktifikation und Spätfrostereignisse waren recht hoch.

## 4.2 Morphologische Archetypen

Die Clusteranalyse erbrachte drei distinkte morphologische Archetypen wie in Abbildung 5 dargestellt. Diese unterschieden sich deutlich in verschiedenen Merkmalen. Während die Baumhöhen lediglich beim Typ II etwas geringer waren, hatte die Buche des Typs III die größten Stammdurchmesser und entsprechend die größten Kronendurchmesser, allerdings kürzere Kronen als die Buchen des Typs II, die oftmals Sekundärkronenbildung aus Wasserreisern aufwiesen, die aber schon so etabliert waren, dass sie zur Krone gezählt wurden. Die Sonnenkronenanteile der Typen I und III waren deutlich höher als die des Typs II und unterschieden sich auch in der Astarchitektur. Während die durchschnittlichen Leitungslängen der Typen I und II ähnlich lang waren, waren die des Typs II deutlich kürzer, wiesen aber mehr Nodien auf, an denen Verzweigung

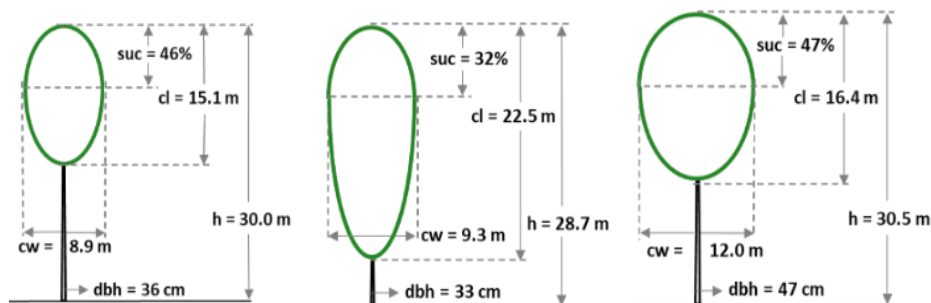


Abbildung 5: Three morphological archetypes of beech were identified on the site: Type I: short-crowned trees (left), Type II: long-crowned trees with slender crowns, often with secondary crowns (center) and Type III: broad-crowned trees with the larger stem diameters (right). Apart from stem diameter (dbh), total tree height (h) further variables such as crown width (CW), crown length (CL and sun crown % (suc) are shown.

stattfand. Die Jahrringbreite war erwartungsgemäß bei allen morphologischen Archetypen in den Jahren mit guter Wasserversorgung (2015, 2021) am besten und brach am meisten in Jahren mit Trockenheit und Spätfrost ein. Trockenheit und Fruktifikation schienen ähnlich zu wirken und zeigten sich verstärkende Effekte. Erwartungsgemäß wiesen die breitkronigen Bäume des Typs III die größten Zuwächse auf. Interessant war, dass die langkronigen Bäume des Typs II, die eher hatten Zwischenständerhabitus im Bezugszeitraum mehr Zuwachs zeigten als die des TP I mit breiten, aber kurzen Kronen.

## 4.3 Modellierung der kombinierten Effekte

In der Regressionsmodellierung (Tab. 1) des vollen Modells zeigte sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,40 (marginal) und 0,73 (conditional). Damit wird ein substanzieller Teil nur durch die zufälligen Effekte beschrieben.

Dennoch lassen sich etwa 40 % durch die fixen Effekte erklären. Nach Ausschluss kollinear Variablen umfasste das volle Modell neben dem Brusthöhendurchmesser (BHD), welcher die allgemeine Baumgröße repräsentiert, auch Trockenheit, Fruktifikation, eine Wechselwirkung zwischen Trockenheit und Fruktifikation, Spätfrost sowie die mittlere Astlänge und die mittlere Leitungslänge von den Astspitzen bis zum Boden. Bei Hinzunahme der mittleren Leitungslänge und der mittleren Astlänge als Variable, wurde das Kronenvolumen als signifikanter Prädiktor ersetzt (Tab. 1). Ein Fruktifikationsereignis im Vorjahr wirkte ebenfalls nicht signifikant auf das Radialwachstum des Betrachtungsjahres.



Tabelle 1: Regressionsparameter

Prediktorvariable	Schätzwert	CI-	CI+	p-Wert
Intercept	0,14	-0,02	-0,29	0,083
BHD	0,5	0,09	-0,26	0,009
SPEI12_MJJ	0,24	0,19	-0,39	<0,001
Fruktifikation Jahr t	-0,17	-0,27	-0,07	0,001
Interaktion Fruktifikation t mit SPEI12_MJJ	-0,16	0,32	-0,01	0,043
Spätfrost	-0,6	-0,75	-0,44	<0,001
Kronenvolumen Mittlere	-0,05	0,34	0,25	0,761
Leitungslänge Spitze bis Boden	0,27	0,05	0,49	0,015
Mittlere Astlänge	-0,47	-0,74	-0,21	<0,001

## 5 Diskussion

In dieser orientierenden Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Astarchitektur einen Einfluss auf das Radialwachstum von Buchen ausübt, der unabhängig von der Baumgröße ist. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass bei Buchen insbesondere Trockenheit und Fruktifikation sowie die Interaktion dieser beiden Variablen eine bedeutende Rolle spielen. Die negative Auswirkung eines Spätfrostereignisses lässt sich ebenfalls aus den Resultaten ableiten. Neben diesen klimatischen Faktoren haben zwei Astarchitekturmerkmale einen signifikanten Einfluss auf das Radialwachstum: Die mittlere Leitungslänge wirkt positiv, während die mittlere Astlänge einen negativen Effekt auf das Radialwachstum ausübt. Somit wird erstmalig für Buchen gezeigt, welchen Einfluss die Astarchitektur auf das Baumwachstum haben kann.

Interessant war, dass die Ergebnisse zeigen, dass, wenn Astarchitekturmerkmale herangezogen wurden, andere Kronenparameter nicht mehr signifikant zur Erklärung des Radialzuwachs beitragen.

Ein weiteres interessantes Resultat war, dass Zwischenständer mit langer schlanker Krone im trockenheitsgeprägten Betrachtungszeitraum besser wuchsen als Bäume mit breiten aber kurzen Kronen.

Diese Studie dient lediglich als erste Orientierung, denn die Ergebnisse lassen sich nicht für verschiedene Standorte und waldbauliche Behandlungen generalisieren. Dazu ist die Datengröße nicht ausreichend groß. Es wurde nur ein Al-

ter auf einem Standort beprobt. Zudem ist im Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2022 eine bislang einmalige mehrjährige Trockenperiode auf dem Standort abgebildet. Ein einzelnes Trockenjahr hätte möglicherweise zu anderen Relationen geführt. Daher sollten zukünftige Untersuchungen die Ansätze dieser orientierenden Untersuchung aufgreifen und größere Baumzahlen auf verschiedenen Standorten und mit verschiedener waldbaulicher Historie miteinbeziehen.

Sollten sich die Ergebnisse dieser Studie nach Ausweitung des Untersuchungsdatensatzes weiter bestätigen, ließen sich waldbauliche Möglichkeiten zur Anpassung existierender Buchenbestände ableiten, bei denen gezielt Archetypen gefördert werden, die resilienter auf Trockenheit reagieren. Dies sollte in Verbindung mit waldbaulichen Verfahren gedacht werden die im Rahmen der Durchforstung auch gezielt solche Morphotypen fördern.

## 6 Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Dr. Christopher Morhardt, der den Bestand per TLS im Rahmen eines Projektes der Gesellschaft für Holzforschung e.V. aufnahm, der hier auch für die Unterstützung gedankt sei. Zudem gebührt unser Dank Herrn David Hansen, der als wissenschaftliche Hilfskraft die Bäume per Hand aus dem Punktwolken segmentierte sowie der Gemeinde Schallstadt, die uns die Versuchsfläche langfristig für Forschungszwecke zur Verfügung stellte. Zusätzlich geht unser besonderer Dank auch an Dr. Julian Frey und Zoe Schindler für nützliche R-Skripte, die uns die Arbeit deutlich vereinfachten sowie Herrn Dr. Dominik Stangler für seine Expertise bei der Jahrringmessung.

## 7 Literatur

- Bascietto, M.; Bajocco, S.; Ferrara, C.; Alivernini, A.; Santangelo, E. (2019): Estimating late spring frost-induced growth anomalies in European beech forests in Italy. *International journal of biometeorology* 63(8), 1039-1049. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01718-w>
- Beguiría, S.; Vicente-Serrano, S. M. (2023): SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.8.1.
- Boessenkohl, B. (2022): rwd: Select and Download Climate Data from 'DWD' (German Weather Service). R package version 1.6.0.

- Bose, A. K.; Gessler, A.; Bolte, A.; Bottero, A.; Buras, A.; Cailleret, M.; ... Rigling, A. (2020): Growth and resilience responses of Scots pine to extreme droughts across Europe depend on predrought growth conditions. *Global Change Biology* 26(8), 4521-4537. <https://doi.org/10.1111/gcb.15153>
- Deslauriers, A.; Fonti, P.; Rossi, S.; Rathgeber, C. B. K.; Gričar, J. (2017): Ecophysiology and Plasticity of Wood and Phloem Formation. In: Amoroso, M- M.; Daniels, L. D.; Baker, P. J.; Camarero, J. J. (Eds.), *Dendroecology: Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies* (pp. 13–33) Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_2)
- DWD (2023): Climate Data Center: Free access to many climate data of the DWD. <https://opendata.dwd.de/climateenvironment/CDC/>
- Girardeau-Montaut, D.; (2022): CloudCompare: A 3D point cloud and mesh processing software, Version 2.12 beta. <https://www.danielgm.net/cc/>
- Hammel, K.; Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Frank.
- Meining, S.; Puhmann, H.; Hartmann, P.; Hoch, R. (2018): Waldzustandsbericht 2018. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- Obladen, N.; Dechering, P.; Skiadaresis, G.; Tegel, W.; Keßler, J.; Höllerl, S.; ... Seim, A. (2021): Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by 2018-2019 hot droughts in central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108482.
- Piermattei, A., Von Arx, G., Avanzi, C., Fonti, P., Gärtner, H., Piotti, A., ... & Crivellaro, A. (2020). Functional relationships of wood anatomical traits in Norway spruce. *Frontiers in plant science*, 11, 683.
- Pretzsch, H.; Ahmed, S.; Jacobs, M.; Schmied, G.; Hilmers, T. (2022): Linking crown structure with tree ring pattern: methodological considerations and proof of concept. *Trees* 36(4): 1349–1367. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02297-x>
- Raunonen, P. (2022): TreeQSM: Reconstruction of Quantitative Structure Models for trees from point cloud data, version 2.4.1. <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>
- R Core Team (2022): R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 3.6.1). <https://www.R-project.org/>
- Schmidt-Walter, P.; Trotsiuk, V.; Meusburger, K.; Zacios, M.; Meesenburg, H. (2020): Advancing simulations of water fluxes, soil moisture and drought stress by using the LWF-Brook90 hydrological model in R. *Agricultural and Forest Meteorology* 291, 108023. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108023>