

Struktur und Dynamik von Mischbeständen mit Buche, Fichte und Douglasie

*Johannes Sauer, Holger Sennhenn-Reulen, Jürgen Nagel
Abt. Waldwachstum, NW-FVA Göttingen*

Summary

To better understand the differences between pure and mixed stands, it can be helpful to look at the allometric relationships of characteristics of different tree species. As a result of the mixing situation, there may be altered allometrics, which then indicate differences in structure or productivity in mixed stands.

Using the example of horizontal crown extension in different directions, this study analyzes the relationship between mixing and the ratio of DBH and crown width. For the visualization a regression model was parameterized with data from the Northwest German Forestry Research Institute as well as additionally recorded data from newly created plots. The situation of mixture of a single tree is defined by an algorithm, which examines each of the neighboring trees according to different selection criteria (distance, angle, tree height) and classifies a type of mixture for each tree based on the selected competitors. The results show larger crown width for the beech trees in the mixed stands compared to the pure stands given the same diameter. Douglas fir and Norway spruce did not show any differences. Further analysis also concluded that the crowns of beech have a greater asymmetry and that the overlapping of the crowns in mixed stands is greater in all three tree species, especially in older stands.

Kurzfassung

Um die Unterschiede von Rein- und Mischbeständen genauer zu verstehen, kann es hilfreich sein, sich die allometrischen Beziehungen von Kenngrößen verschiedener Baumarten anzuschauen. Hierbei kann es in Folge der Mischungssituation veränderte Allometrien geben, welche dann Hinweise auf Unterschiede in Struktur oder Produktivität in Mischbeständen geben.

Am Beispiel der horizontalen Kronenausbreitung in verschiedene Richtungen wird in dieser Untersuchung ein Zusammenhang von Mischung und dem Verhältnis von BHD und Kronenbreite analysiert. Für die Darstellung wird ein Regressionsmodell mit Daten der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt sowie zusätzlich aufgenommenen Daten aus neu angelegten Versuchsflächen parametrisiert. Die Mischungsform eines Einzelbaumes wird durch einen Algorithmus bestimmt, welcher jeweils die Nachbarbäume nach verschiedenen Auswahlkriterien (Entfernung, Winkel, Baumhöhe) untersucht und aufgrund der so ausgewählten Konkurrenten eine Mischung für jeden Baum klassifiziert. Als Resultat zeigt sich eine größere Kronenbreite bei den Buchen im Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand bei gleichem Durchmesser. Bei den Baumarten Douglasie und Fichte ist dieser Unterschied nicht zu erkennen. Weitere Analysen zeigen zudem, dass die Buchenkronen eine größere Asymmetrie aufweisen und die Überschneidungen der Kronen in Mischbeständen bei allen drei Baumarten, besonders in alten Beständen, größer sind, als in Reinbeständen.

Einleitung

Die hier vorgestellte Untersuchung ist Teil des Graduiertenkollegs „Enrichment of European beech forests with conifers: impacts of functional traits on ecosystem functioning“, welches an der Georg-August-Universität Göttingen in Zusammenarbeit mit der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt stattfindet und von der DFG gefördert wird. Hierbei werden in elf eng miteinander verbundenen Teilprojekten in insgesamt 40 Waldbeständen sowohl die wichtigsten funktionalen Merkmale der Baumarten und jene assoziierter Organismengruppen untersucht, als auch die Mechanismen, die diese mit den Ökosystemfunktionen verbinden. Es wird erwartet, dass die Mischbestände aus Buchen und

Koniferen eine höhere funktionale Diversität aufweisen als Buchenreinbestände und die damit verbundenen Effekte auf die Ökosystemfunktionen bei Beteiligung der Douglasie besonders ausgeprägt sind. Pretzsch und Schütze (2009) sowie Pretzsch et al. (2010) haben einen Mehrzuwachs in Mischbeständen mit Buche und Fichte festgestellt. Der Mehrzuwachs ging bei Pretzsch et al. (2010) vor Allem durch ein besseres Wachstum der Buche aus, welche von der Beimischung der Fichte anscheinend profitieren kann. Die Mischung von Buche mit Douglasie ist bis jetzt zu dieser Fragestellung noch weniger untersucht. Von Thurm et al. (2016) wurde festgestellt, dass die Douglasie hierbei ein besseres Wachstum hat und sich schneller von Trockenstress erholt. In einer weiteren Studie wurde ein anhaltender Mehrzuwachs für Mischbestände mit Buche und Douglasie festgestellt (Lu et al. 2016). Auch die für die Produktivitätsunterschiede von Mischbeständen zugrundeliegenden strukturellen und funktionalen Merkmale wurden untersucht (Forrester et al., 2006; Rothe & Binkley, 2001), so wurde unter anderem herausgefunden, dass sich verschiedene Baumarten mit ihren strukturellen Merkmalen (z.B. Kronenform) ergänzen können oder aber das Gegenteil der Fall sein kann (Pretzsch & Schütze, 2005).

In dem hier vorgestellten Teilprojekt wird der Fokus auf die Kronenstruktur und Dynamik der Rein- und Mischbestände gelegt. Ziel ist ein besseres Verständnis von Mehr- und Minderzuwachs in Mischbeständen. Hierzu sollen verschiedene Strukturparameter sowie Allometrien untersucht werden, um im späteren Verlauf des Forschungsprojektes schließlich die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Mischungsformen vergleichen zu können. Ein Unterschied zu den bisherigen Forschungen ist die Betrachtung der drei Baumarten im direkten Vergleich - die Buche mit der heimischen Fichte sowie mit der nicht heimischen Douglasie.

Methoden

Das Untersuchungsgebiet ist der Zuständigkeitsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt – Hessen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Hier her stammen die Daten aus langfristigen Forschungsflächen sowie Wuchsreihenversuchen, welche bisher den Großteil der in dieser Untersuchung eingeflossenen Daten darstellen. Die Anzahl an Flächen und die darin enthaltenen Einzelbäume in Rein- und Mischbestandssituationen beinhaltet Tabelle 2 Tabelle. Die Baumarten werden hierbei mit den Kürzeln B, D und F angegeben. Als Beispiel: BD ist eine Buche, in deren Einflussbereich mindestens eine Douglasie und möglicherweise weitere Buchen, aber keine anderen Baumarten stehen; FB eine Fichte in Mischung mit mindestens einer Buche in ihrem Einflussbereich und ggf. weiteren Fichten. B wäre eine Buche mit ausschließlich Buchen in ihrem Einflussbereich.

Tabelle 2: Übersicht über die Flächenanzahl und die darin enthaltenen Einzelbäume in den ermittelten Mischungssituationen aus der Datenbank der NW-FVA; B = Buche (*Fagus sylvatica*), D = Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*, F = Fichte (*Picea abies*).

Flächen:		Anzahl der Aufnahmen:					
156		239					
Mischung	B	BD	BF	D	DB	F	FB
Anzahl	3963	1324	1218	3756	790	1190	841

Die Zuordnung eines Baumes zu seiner Mischungssituation erfolgt durch die Erfassung der Entfernung, Größe und Art der Nachbarbäume. Die Grenzwerte für die maximale Entfernung und Mindestgröße eines Baumes, um als Konkurrent berücksichtigt zu werden, müssen zunächst festgelegt werden. In Bachmann (1996) ist eine Auflistung verschiedener Suchalgorithmen für die Auswahl von Konkurrenten bei der Ermittlung von Konkurrenzindizes zu finden. Für die Bestimmung der Mischungssituation wurden diese als Grundlage zur Auswahl der maximalen Entfernung eines Nachbarbaumes verwendet. Bei der bisherigen Auswertung fiel die Wahl auf die Verwendung der gemessenen mittleren Kronenradien beider Individuen. Es wird geprüft ob die Entfernung der beiden Bäume größer ist, als die Summe der beiden mittleren Kronenradien (ähnlich der Kennung KR1 in Bachmann, 1996). Die Höhe des Nachbar-

baumes muss mindestens 66% der Höhe des Ausgangsbaumes betragen, ähnlich dem Konkurrenzindex c_{66} (Wensel et al., 1987; Nagel, 1999). Dieses Verfahren wird dann mit dem Algorithmus um jeden Baum in acht Sektoren (in den acht abgeloteten Himmelsrichtungen) angewandt und die Arten der Bäume dabei erfasst. Am Ende steht eine Datenbank von Bäumen mit ihren Nachbarbäumen und deren Arten, welche nach den ausgewählten Kriterien berücksichtigt wurden. Grund für diese implementierte einzelbaumbasierte Mischungsbestimmung ist, dass die Mischung in einigen Beständen nicht sehr homogen ist, beispielsweise durch gruppenweise Mischung. Für die Untersuchung der Strukturunterschiede in Mischungssituationen sind aber vor allem die Bäume interessant, die direkt in Kontakt mit der anderen Art oder aber nur mit ihrer eigenen Art kommen. Zum Beispiel hätte eine Buche in mitten einer Buchengruppe hierbei keinen Kontakt zu einer Douglasie, obwohl sie in einem Buchen/Douglasien Mischbestand steht. Diese Buche wird nach dem obigen Verfahren dann auch als „Buche in Reinbestandssituation (B)“ definiert. In die Auswertung fließen mehrheitlich Daten aus durchforsteten Beständen ein. Der Zeitpunkt der letzten Durchforstung ist hierbei Variabel und wurde nicht gefiltert. Durch das beschriebene Auswahlverfahren der Konkurrenten werden stark freigestellte Bäume jedoch entsprechend weniger in der Datenbank berücksichtigt, falls die Nachbarbäume die festgelegten Bedingungen für Kronenabstände nicht mehr erfüllen. Der mögliche Einfluss von forstlichen Eingriffen ist aber weiterhin nicht auszuschließen.

Zusätzlich werden aus acht neu angelegten Versuchsflächen im Rahmen des Graduiertenkollegs Rein- und Mischbestände dieser Arten vermessen, um detaillierte Strukturuntersuchungen an den Bäumen zu ermöglichen. Die Verbindung der langfristigen Versuchsflächen mit den neuen Flächen soll dabei helfen, das Zuwachsverhalten und die Entwicklung der Mischbestände besser zu verstehen, da dies mit einmaligen Aufnahmen auf den neuen Versuchsflächen noch nicht möglich ist. Entscheidend für die Auswertung der Kronenstruktur sind Aufnahmedaten mit Kronenablotungen, des Kronenansatzes sowie der Höhe der maximalen Kronenbreite. Kronenablotungen werden normalerweise bei den regelmäßigen Versuchsflächenaufnahmen aufgrund des Aufwands nur auf ausgesuchten Flächen durchgeführt und dort alle 10-15 Jahre, da bei zu geringen Zeitintervallen die Unterschiede zwischen den Messungen sehr gering ausfallen, was dem Aufwand nicht gerecht werden würde. Die für dieses Projekt neu angelegten Versuchsflächen bestehen aus sogenannten „Quintetts“, also drei Reinbeständen: Buche, Douglasie, Fichte, sowie die beiden Mischungsformen: Buche/Douglasie und Buche/Fichte. Die Flächen sind so angelegt, dass es einen Gradienten im Bezug zur Standortsgüte gibt – im nördlichen Teil Niedersachsens eher sandige und trockene Böden (Heidegebiete) und im Solling sowie Harz bessere Standortbedingungen was die Nährstoffversorgung und Niederschlagsmengen angeht. Innerhalb eines Quintetts befinden sich dann die einzelnen Bestände in geringer Entfernung voneinander (wenige hundert Meter), um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Datenaufnahme und Auswertung:

Die Aufnahme der Kronenparameter erfolgt auf den acht Quintetts in Tradition der bestehenden Daten aus der NW-FVA, um diese in den schon vorhandenen Datensatz aufnehmen zu können. Unter den Standardparametern wie Standkoordinaten, BHD und Höhe werden die Kronen mithilfe eines Kronenspiegels in acht Himmelsrichtungen abgelotet (Röhle, 1986; Pretzsch et al., 2015). Zusätzlich wird von den Bäumen der Kronenansatz und die Höhe maximaler Kronenbreite erfasst. Die Auswertung der Daten aus der Datenbank, sowie der neu aufgenommenen erfolgt mit R (CORE TEAM 2015).

Ergebnisse

In Abbildung 1 ist der Zusammenhang von BHD und mittlerer Kronenbreite (arithmetisches Mittel aus den acht abgeloteten Kronenradien multipliziert mit 2) dargestellt. Die Grafik zeigt hierbei den Unter-

schied zwischen den verschiedenen Baumarten sowie auch zwischen Rein- und Mischbeständen der jeweiligen Baumarten. Es ist zu sehen, dass die Douglasien (violette Farben) sowie die Fichten (blaue Farben) zwischen Rein- und Mischbestand keinen sichtbaren Unterschied in ihrer Kronenbreite zeigen. Hingegen ist bei den Buchen in den beiden Mischungsformen (orangene Farben) bis zu einem BHD von 63 cm eine signifikant größere Kronenbreite zu erkennen als bei den Buchen im Reinbestand (rot). Zwischen den Baumarten ist, wie zu erwarten, ein großer Unterschied zu erkennen, sodass bei den Buchenkronen die größten Kronenbreiten auftreten und die Douglasie größere Kronenbreiten als die Fichte hat. Die im oberen Teil horizontal ausgerichteten Boxplots veranschaulichen die Datenlage der verschiedenen Baumarten und Mischungen. Hier unterscheiden sich vor allem die Daten der Fichten, da ein Großteil vergleichsweise große BHDs haben (30-50 cm), während bei Buche und Douglasie auch viele Daten mit kleineren BHD existieren (15-50 cm).

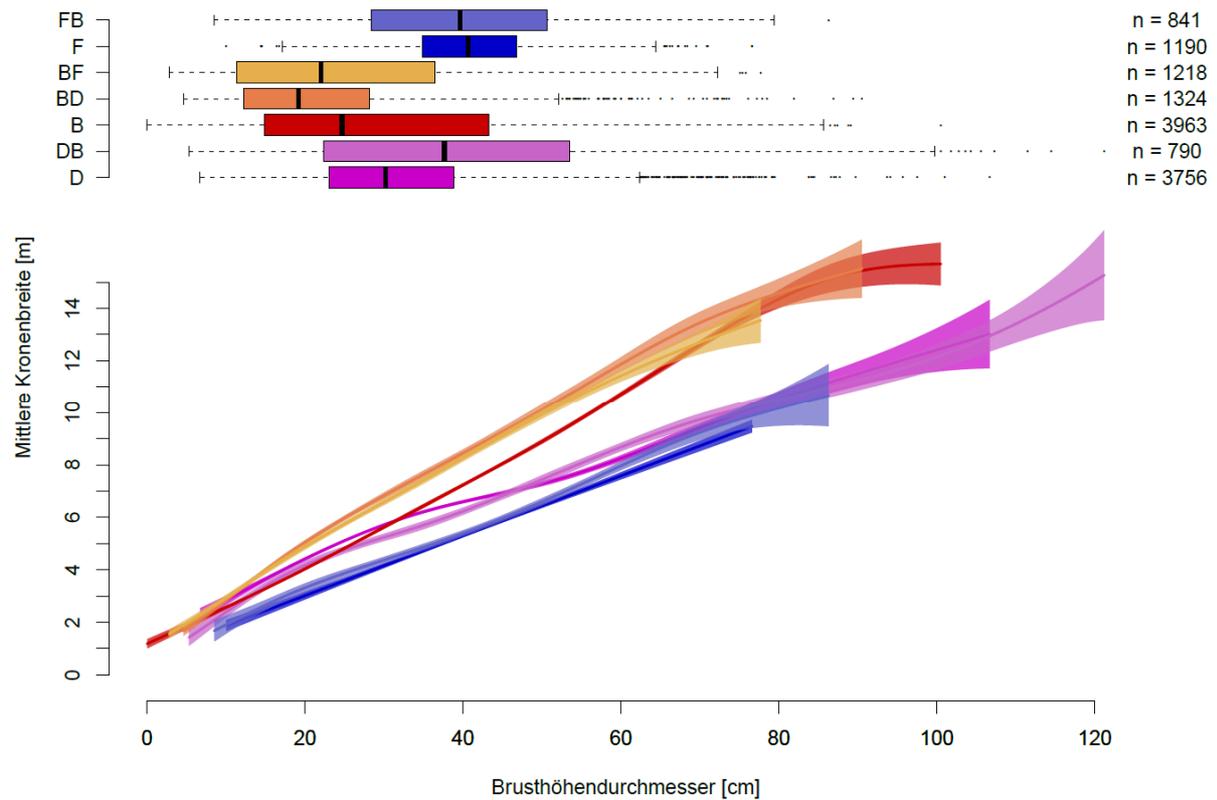
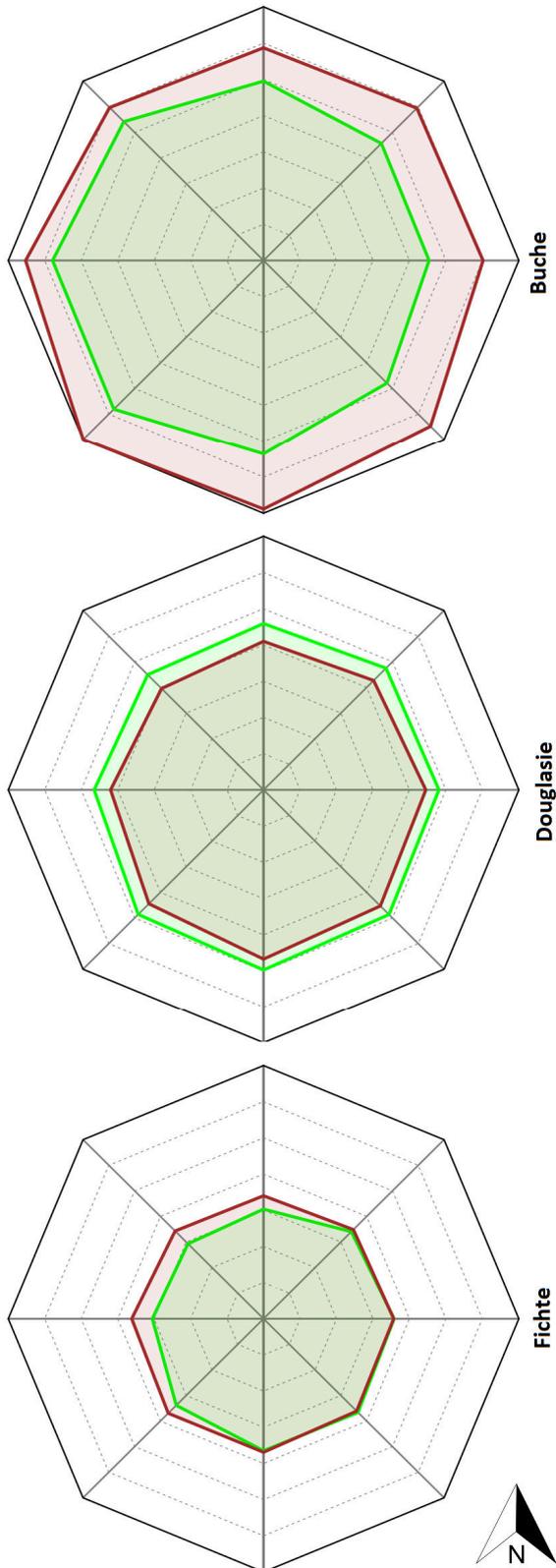


Abbildung 1: modellierter Zusammenhang von BHD und mittlerer Kronenbreite, aufgeteilt in die verschiedenen Mischungsformen. Die Parameter des additiven Regressionsmodells (mit Annahme normalverteilter Residuen) mit monoton steigendem Effekten wurden mithilfe der Funktion scam aus dem R-Paket SCAM (Pya & Wood, 2015) geschätzt.

Relative Kronenbreite im Rein- und Mischbestand

- Reinbestand
- Mischbestand



Eine weitere Darstellung der Kronenradien ist in Abbildung 2 in Form einer Draufsicht der gemittelten relativen Kronenradien in jeder der acht Himmelsrichtungen erstellt worden. Die Kronenradien wurden hierbei mit dem BHD relativiert, um eine Verschiebung aufgrund unterschiedlicher BHDs der Bäume aus den Datensätzen zu minimieren, denn wie man in Abbildung 1 sehen kann, ist das Verhältnis Kronenbreite/BHD annähernd linear. In dieser Grafik wird nochmals der Unterschied zwischen Rein- und Mischbestand deutlich und zudem ist hier auch die Information enthalten, ob es eine Asymmetrie der Kronen gibt. Die Buchen haben mit ihren größeren Kronenradien auch eine eher asymmetrische Krone im Vergleich mit Douglasien und Fichten. Diese ist im Mittel weiter in die südwestliche Himmelsrichtung ausgedehnt. Vorhanden ist dieser Effekt in Rein- und Mischbestand, wobei im Reinbestand eine verstärkte Ausdehnung in Richtung Westen zu erkennen ist. Bei der Douglasie und Fichte ist der gleiche Effekt weniger stark zu erkennen, da die Kronen weniger groß sind. Jedoch zeigen auch diese eine gewisse Asymmetrie bei der Kronenausdehnung. Besonders auffällig sind die größeren Kronenradien der Buche in Mischbeständssituation, welche sich deutlich von den Kronenradien in Buchen-Reinbeständen unterscheiden.

Abbildung 2: gemittelte relative Kronenradien der Baumarten Buche, Douglasie und Fichte in den acht Himmelsrichtungen aufgeteilt nach Rein- und Mischbestand.

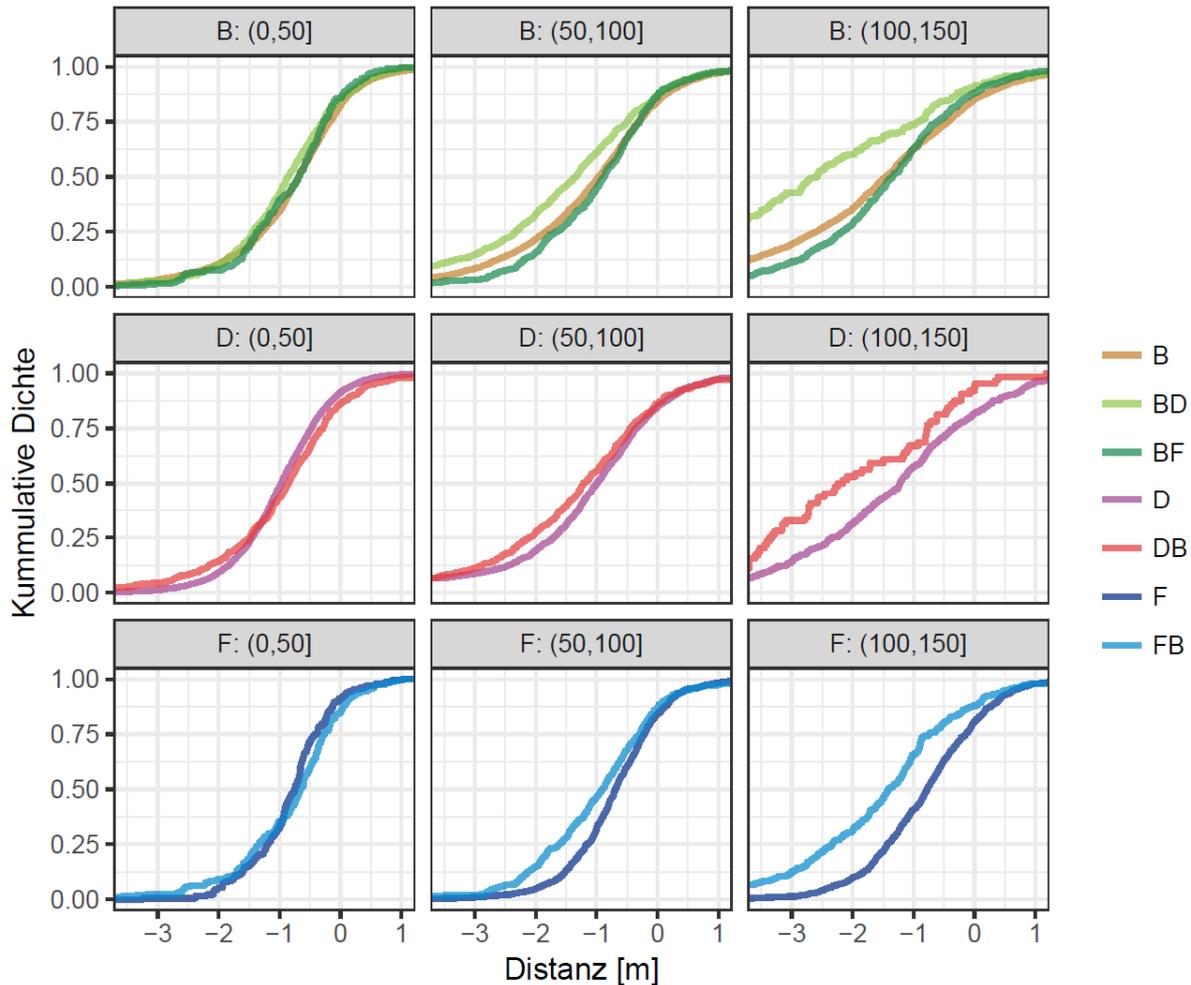


Abbildung 3: kumulative Dichtefunktionen für die Kronenabstände, aufgeteilt nach Baumart und in die drei Altersbereiche 0-50 Jahre, 50-100 Jahre und 100-150 Jahre.

Bei der Betrachtung von Beständen mit bekannten Kronenradien wurde der Abstand zwischen den Kronen ermittelt und in Abbildung 3 als kumulative Dichtefunktion aufgetragen. Besonderes Interesse galt den negativen Kronenabständen (Distanz < 0), da dies eine Überschneidung oder ein Ineinandergreifen der Kronen bedeutet. Die Grafik zeigt, dass in den 0-50 Jahre alten Beständen kein Unterschied zwischen Rein- und Mischbestand in Bezug auf den Kronenabstand herrscht und dass sich dieser aber bei den älteren Beständen durchaus herausstellt. So ist bei den Buchen im Alter 100-150 Jahren der negative Kronenabstand häufiger in einem Buchen-Douglasien Mischbestand als im Buchenreinbestand oder in Mischung mit Fichte. Bei der Douglasie und Fichte zeigen auch jeweils die Mischbestände in den älteren Klassen eine größere Kronenüberlappung.

Bei der Betrachtung der Kronenabstände in Form einer Häufigkeitsverteilung in Abbildung 4 ist die Fichte im Reinbestand (F) über die drei Altersgruppen hinweg deutlich erkennbar immer mit den geringsten Kronenüberschneidungen vertreten (zu erkennen an der dunkelblauen Linie, welche unter den anderen verläuft und maximal -2 m bis -2,5 m Kronenüberschneidung aufweist). Hingegen ist die Buche, umgeben von Douglasie (BD) im hohen Alter (100-150 Jahre) mit den größten Kronenüberschneidungen vorhanden – dasselbe gilt für das Gegenstück Douglasie, umgeben von Buche (DB). Die Spitze bei der F Linie ist höher als bei den anderen Baumarten und Mischungsformen, während die BD und DB Linien vergleichsweise flach verlaufen, was auf eine größere Variation der Kronenabstände hinweist.

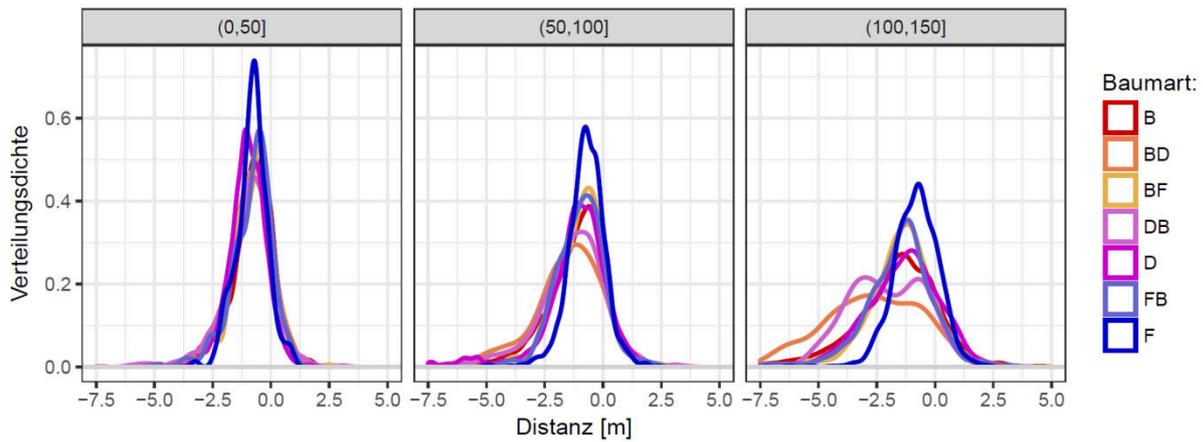


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Kronenabstände nach Baumarten und Mischung sowie drei Altersbereichen aufgeteilt.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen einen ersten Einblick in die Datenlage und stellen die bisherigen Datensätze im Bezug zu der Auswirkung von Mischung bei den drei Baumarten Buche, Douglasie und Fichte dar. Ähnlich wie in der Publikation von Pretzsch (2014) ist eine unterschiedliche Kronengröße in Abhängigkeit von der Mischungsform zu erkennen. Die in Abbildung 1 vorgenommene Auswertung des Zusammenhangs von BHD und Kronenbreite gibt für die darauffolgenden Grafiken die Information, dass der Zusammenhang annähernd linear verläuft, sodass die in Abbildung 2 vorgenommene Relativierung der Kronenradien sinnvoll durchzuführen ist. Der Zusammenhang von BHD und Kronenbreite bei den Buchen in Mischung zeigt eine breitere Krone bei gleichem BHD, wobei auch eine Absenkung dieses Effektes bei größerem BHD zu erkennen ist. Dieser Rückgang des Effektes ist jedoch möglicherweise auch durch die geringe Datenlage bei großem BHD gegeben, welches sich zudem in den vergrößerten Konfidenzintervallen an den Enden der Linien zeigt. Um ein sehr starkes Abfallen der Regressionslinie aufgrund dieser ungenauen Schätzung bei geringer Datenlage zu vermeiden wurde ein SCAM für die Modellierung verwendet, mit der Bedingung monoton steigend zu sein.

Die in Abbildung 2 gezeigten mittleren Kronenradien zeigen durch ihre Asymmetrie eine mittlere Ausrichtung in unterschiedliche Himmelsrichtungen. Genau betrachtet kann man einen Unterschied bei den Buchen und Douglasien erkennen, da hier die Douglasien eher nach Südsüdost ausgerichtet sind, während die Buchen nach Südsüdwest ausgerichtet sind. Auch in den Arbeiten von Vorreyer (1997), de Wall (1995) und Biber (1996) wurden diese Asymmetrien entdeckt und damit begründet, dass die Bäume sich vorzugsweise zum Licht ausbreiten (Dippel, 1988), also in Europa nach Süden. Die Douglasienkronen standen in den untersuchten Beständen aber häufig über den Buchenkronen und waren so dem Wind stärker ausgesetzt. Deshalb wurde hier angenommen, dass aufgrund des hier vorherrschenden Westwindes die Douglasienkronen in Richtung Osten geformt sind, während die eher plastischen Buchenkronen den gewonnenen Platz nutzen und ihre Kronen dann in Richtung Südwesten ausrichten (Biber, 1996; Vorreyer, 1997).

Bei der Verbindung der Ergebnisse zeigt sich, dass die größeren Kronen bei den Buchen in Mischung mit Douglasie und Fichte mit einer erhöhten Überschneidung mit den Nachbarbäumen einhergeht. Ähnliches wurde auch bei Pretzsch (2014) mit einer erhöhten Kronenschirmfläche in Buchen/Fichten Mischbeständen sowie bei Dieler & Pretzsch (2013) mit einer erhöhten Kronenüberschneidung in Buchen-Mischbeständen im Vergleich zu Buchen-Reinbeständen gefunden. Diese größere Überschneidung könnte ein Hinweis darauf sein, dass der vertikale Kronenraum in Mischbeständen effektiver ausgenutzt wird, da die Kronenformen der verschiedenen Baumarten sich ergänzen (Pretzsch, 2014).

In alle Auswertungen fließt das beschriebene Auswahlverfahren für die Konkurrenten mit ein, da dies ausschlaggebend für die Markierung eines Baumes als Reinbestandsbaum oder Mischbestandsbaum ist. So verändern sich zum Beispiel die Ergebnisse mit den Kronenabständen wenn man die Grenzwerte für maximale zulässige Entfernungen zu einem Konkurrenten erhöht oder verringert. Der verwendete Grenzwert, hier der des mittlere gemessene Kronenradius beider Bäume, ist aber noch nicht Endgültig festgelegt. Bei alternativen Abständen sollte aber bedacht werden, dass bei der Kronenstruktur eher ein direkter Einfluss von Beschattung und auch mechanische Interaktion zwischen den Bäumen eine Rolle spielt und der Abstand der Konkurrentenerfassung nicht zu groß gewählt werden sollte. Als geplante Verbesserung ist noch eine Einbeziehung der Himmelsrichtung eines Konkurrenten in Arbeit, da ein größerer Baum in südlicher Richtung einen stärkeren Einfluss auf die Lichtverhältnisse hat, als wenn dieser im Norden stehen würde. Zudem sollen im Allgemeinen die bisher gefundenen Effekte mit der Untersuchung weiterer Allometrien ergänzt werden, um so ein umfassenderes Bild zu bekommen und schließlich die dreidimensionale Besetzung des Kronenraumes in Rein- und Mischbeständen besser verstehen zu können. In Frage kommen die Einbeziehung der Kronenlänge, die Ausformung der maximalen Kronenbreite und damit verschiedene Kronenformmodelle sowie die Astabgangswinkel. Denn bei der Betrachtung der hier vorgestellten Ergebnisse ist noch nicht klar in welchem Ausmaß die Kronen bei einer Überlappung ineinandergreifen, oder aber zum Beispiel den Kronenraum durch ihre Artsspezifische Kronenform effektiver nutzen können. Durch das Auswahlverfahren werden unterständige Bäume nicht als Konkurrenten berücksichtigt, sodass wir hier vor allem Fälle haben, in denen die Kronen miteinander in Kontakt stehen. Jedoch kann dieser Kontakt sehr unterschiedlich aussehen. Ähnlich wie die Kronenmodelle, welche von Pretzsch (2009) beschrieben wurden, ist geplant, aus den aufgenommenen Kronenparametern Modellkronen für die drei Baumarten in Rein- und Mischbeständen zu erstellen. Anschließend sollen diese im dreidimensionalen Raum für eine Analyse der Überschneidungsvolumen und deren räumliche Position dienen. Hiermit können dann Annahmen zur Art der Raumnutzung der verschiedenen Baumarten in Abhängigkeit ihrer Nachbarn getroffen werden. Mit diesen speziell angepassten Kronenmodellen könnte eine Erfassung der dreidimensionalen Kronenstruktur, auch für bereits schon länger vorhandene Versuchsdaten aus Nordwestdeutschland, möglich gemacht werden.

Danksagung

Dank für die Förderung dieser Untersuchung und der Möglichkeit zu promovieren geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft und des Weiteren an die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt für die Aufnahme und Bereitstellung der langfristigen Versuchsdaten und der netten Unterstützung sowie an die Georg-August-Universität Göttingen für die Organisation und Leitung des Graduiertenkollegs.

Literatur

- Bachmann, M. (1996). Indizes zur Erfassung der Konkurrenz im Bergmischwald-eine Methodenstudie. Bericht Jahrestagung Sektion Ertragskunde im DVFFA: S, 249-265.
- Biber, P. (1996). Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. Forschungszentrum Waldökosysteme.
- Dieler, J., & Pretzsch, H. (2013). Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. *Forest Ecology and Management*, 295, 97-108.
- Dippel, M. (1988). Wuchsleistung und Konkurrenz von Buchen-Lärchen-Mischbeständen im südniedersächsischen Bergland.
- Forrester, D. I., Bauhus, J., Cowie, A. L., & Vanclay, J. K. (2006). Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. *Forest Ecology and Management*, 233(2-3), 211-230.
- Lu, H., Mohren, G. M., den Ouden, J., Goudiaby, V., & Sterck, F. J. (2016). Overyielding of temperate mixed forests occurs in evergreen-deciduous but not in deciduous-deciduous species mixtures over time in the Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 376, 321-332.

- Nagel, J. (1999). Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Frankfurt am Main: Sauerländer.
- Pretzsch, H., & Schütze, G. (2005). Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands. *Plant Biology*, 7(6), 628-639.
- Pretzsch, H. (2009). Forest dynamics, growth, and yield. In *Forest Dynamics, Growth and Yield* (pp. 1-39). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pretzsch, H., Block, J., Dieler, J., Dong, P. H., Kohnle, U., Nagel, J., ... & Zingg, A. (2010). Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science*, 67(7), 712.
- Pretzsch, H. (2014). Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 327, 251-264.
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., ... & Du Toit, B. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), 466-479.
- Pyä, N., & Wood, S. N. (2015). Shape constrained additive models. *Statistics and Computing*, 25(3), 543-559.
- Rothe, A., & Binkley, D. (2001). Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(11), 1855-1870.
- Röhle, H. (1986). Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien. *Forstarchiv*, 57, 67-71.
- Team, R. C. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Thurm, E. A., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2016). Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management*, 376, 205-220.
- Vorreyer, C. (1997). Untersuchungen von Buchen- und Douglasienkronen in Mischbeständen (Doctoral dissertation).
- de Wall, K. (1995). Struktur und Leistung von Buchen-Douglasien-Mischbeständen im Wuchsbezirk "Unterer Solling" (Doctoral dissertation).
- Wensel, L., Meerschaert, W., & Biging, G. (1987). Tree height and diameter growth models for northern California conifers. *Hilgardia*, 55(8), 1-20.