

Technische Universität Dresden

Fakultät Umweltwissenschaften

Qualitätsaspekte bei Voranbauten von Buche [*Fagus sylvatica* L.] mit variierenden Pflanzverbänden in unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbeständen [*Picea abies* (L.) KARST]

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

vorgelegt von

Diplom-Forstwirtin Birgit Blaschkewitz

geboren am 06.10.1979 in Rodewisch

Gutachter:

Prof. Dr. habil. Sven Wagner, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Dr. habil. Claus-Thomas Bues, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. habil. Sebastian Hein, Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Tag der Verteidigung: 12. Juni 2018

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Qualitätsaspekte bei Voranbauten von Buche [*Fagus sylvatica* L.] mit variierenden Pflanzverbänden in unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbeständen [*Picea abies* (L.) KARST]“

wird hiermit bestätigt.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift (Vorname Name)

Dla mojego męża i dla naszej córeczki.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit hat eine lange Geschichte. In Form der Forschungsvorhaben der damaligen Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF) der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen startete sie mit dem Titel „Wuchsverhalten von Buchenvoranbauten bei variierender Schirm- und Seitendruckkonkurrenz“ im Jahr 2003 und setzte sich ab 2004 unter dem Titel „Wachstum und Qualitätsentwicklung von Einzelbäumen in Buchenvoranbauten“ fort. Der genannten Institution sei für die Finanzierung des Forschungsvorhabens an dieser Stelle gedankt.

Herr Prof. Dr. habil. Sven Wagner hat die ganzen Jahre über an meiner Betreuung festgehalten, was nicht selbstverständlich ist, und mich – insbesondere in den letzten beiden Jahren – unkompliziert unterstützt. Deshalb gebührt ihm mein tiefster Dank.

Herr Dr. Leder von der damaligen Versuchsanstalt (LÖBF) in Arnsberg führte mich gut in die Versuchsfelder ein, dafür sei ihm gedankt. Dass die Herren Prof. Dr. Dr. habil. Claus-Thomas Bues und Prof. Dr. habil. Sebastian Hein die weiteren Gutachten übernahmen und dass Herr Prof. Dr. habil. Andreas Roloff bereit war, der Promotionskommission vorzustehen, hat mich sehr gefreut.

Bei den Außenaufnahmen wurde ich von verschiedenen studentischen Hilfskräften begleitet, die nicht nur die Daten „einsammeln“ halfen, sondern auch mentale Unterstützung in der anstrengenden Phase waren. Genannt seien hier Alexandra Wehnert, Franziska Herold, Silvia Müller, Josephine Diener, Doreen Ille, Doreen und Manuela Leonhardt. Bei Familie Kamann aus Arnsberg konnten wir jedes Mal angenehm herbergen, dafür ein herzliches Dankeschön!

Am Institut half so manche fachliche Diskussion mit meinen damaligen Mit-Doktoranden Franka, Nico, Manuela, Thomas, Sonja und André sowie mit dem Oberassistenten Dr. Holger Fischer über die ein oder andere Hürde hinweg und nicht zuletzt das gemeinsame „soziale“ Engagement am Institut. Die guten praktischen Hinweise des ehemaligen Oberassistenten DFI Herrn Hartig sowie seine Tipps zur Flächensuche in Sachsen waren „Gold wert“. Herr Wollmerstädt trug immer Sorge dafür, dass ich gut ausgerüstet in meine teilweise mehrwöchigen Messkampagnen starten konnte. Den Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Waldbau und Waldschutz sei für das gute Miteinander gedankt, insbesondere Dr. Angelika Mann, Angelika Otto, Christine Lemke und Antje Karge.

Meinen beruflichen Werdegang als Försterin haben meine Eltern die ganzen Jahre über hingebungsvoll und interessiert begleitet, bis hin zur tatkräftigen Unterstützung bei der Datenaufnahme. Meine Schwestern mit Familien und meine Schwägerin mit Familie, einschließlich meiner Eltern, haben vor allem in den letzten zwei Jahren wichtige Funktionen übernommen: Durch ihre Geduld und ihr „Freistellen“ von der Familie konnte ich mich ganz auf das Fertigstellen der Arbeit konzentrieren.

Mein lieber Ehemann Christian hat als aufopferungsvoller Trainer diesen „Dissertations-Marathon“ überhaupt ermöglicht und damit den entscheidenden Anteil an der Beendigung dieses großen Projektes. Unsere kleine Tochter musste damit klar kommen, dass die Mama in Gedanken oft ganz woanders war und dass der Alltag äußerst getaktet ablief. Ihnen beiden widme ich deshalb diese Dissertationsschrift!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Material	10
2.1	Charakteristika der Untersuchungsgebiete	10
2.1.1	Lage	10
2.1.2	Klima.....	11
2.1.3	Geologie, Relief und Boden	11
2.1.4	Vegetation und Waldentwicklung	14
2.2	Auswahl und Beschreibung der Versuchsflächen	15
3	Methoden	21
3.1	Versuchsanlage, Versuchsdesign und Datenaufnahme	21
3.1.1	Festlegung und Datenaufnahme von Versuchsbeständen (Stufe I).....	21
3.1.1.1	<i>Versuchsanlage</i>	<i>21</i>
3.1.1.2	<i>Versuchsdesign</i>	<i>23</i>
3.1.1.3	<i>Datenerhebung und Zustandserfassung auf den Versuchsflächen</i>	<i>31</i>
3.1.2	Auswahl und Datenerhebung von Einzelbuchen (Stufe II).....	45
3.1.2.1	<i>Auswahl von Einzelbuchen</i>	<i>45</i>
3.1.2.2	<i>Datenerhebung an den Einzelbuchen</i>	<i>48</i>
3.2	Methoden zur statistischen Auswertung	61
3.2.1	Allgemeine Einführung.....	61
3.2.1.1	<i>Regression - Verallgemeinerte Lineare Modelle (Generalized Linear Models GLM)</i>	<i>61</i>
3.2.1.2	<i>Gemischte Modelle (Mixed Models MM)</i>	<i>63</i>
3.2.2	verwendete Software	65

3.2.3	Schätzmethoden, Hypothesentests und Modellwahl	65
3.2.3.1	<i>Schätzmethoden</i>	66
3.2.3.2	<i>Hypothesentests und Modellwahl</i>	68
3.2.4	Beschreibung der verwendeten Modelltypen	70
3.2.4.1	<i>lineares gemischtes Modell (LMM)</i>	70
3.2.4.2	<i>gemischtes Modell mit logistischer Link-Funktion (GLMM/CLMM)</i>	72
3.2.5	Beschreibung der Modellvariablen und der Grundstruktur der Modelle	75
3.2.5.1	<i>Beschreibung der abhängigen Variablen</i>	75
3.2.5.2	<i>Beschreibung der Variablen für die festen Effekte</i>	77
3.2.5.3	<i>Beschreibung des Aufbaus der zufälligen Effekte</i>	79
3.2.5.4	<i>Beschreibung der Modellgrundstruktur</i>	81
3.2.6	Überprüfung der Modelle und Modellvergleich zur Auswahl des Endmodells	82
3.2.6.1	<i>Überprüfung der Modelle auf Einhaltung der Modellvoraussetzungen</i>	82
3.2.6.2	<i>Auswahl des Endmodells</i>	93
4	Ergebnisse	94
4.1	Ergebnisse zum Auftreten von kronen- und stammformbasierten Qualitätsklassen	94
4.1.1	Gemeinsame Ergebnisse für die Regionen Nordrhein-Westfalen und Sachsen	94
4.1.2	Ergebnisse für die Region Nordrhein-Westfalen und Modellvalidierung mit der Region Sachsen	99
4.2	Ergebnisse zu einzelnen Wachstums- und Qualitätsmerkmalen	104

4.2.1	Ergebnisse zu Wachstumsgrößen.....	104
4.2.1.1	<i>Ergebnisse zur Höhe</i>	104
4.2.1.2	<i>Ergebnisse zum Wurzelhalsdurchmesser</i>	105
4.2.1.3	<i>Ergebnisse zum hd-Wert</i>	107
4.2.2	Ergebnisse zu Qualitätsmerkmalen.....	110
4.2.2.1	<i>Ergebnisse zur Ästigkeit</i>	110
4.2.2.2	<i>Ergebnisse zur Astreinigung</i>	123
4.2.2.3	<i>Ergebnisse zur Stammform</i>	136
5	Diskussion	148
5.1	Diskussion der Methoden	148
5.1.1	kritische Würdigung der empirischen Methoden	148
5.1.1.1	<i>Versuchsanlage, Versuchsdesign und Auswertemethoden</i>	148
5.1.1.2	<i>Methoden zur Quantifizierung von Konkurrenz</i>	154
5.1.1.3	<i>Genauigkeit bei der Bestimmung des Altbestandseinflusses</i>	161
5.1.2	kritische Würdigung der statistischen Methoden.....	166
5.1.2.1	<i>Modellspezifikation und Variablenselektion</i>	166
5.1.2.2	<i>Multikollinearität</i>	169
5.2	Diskussion der Ergebnisse	172
5.2.1	Kronen- und stammformbasierte Qualitätsklassen.....	172
5.2.1.1	<i>Einfluss des Alters</i>	172
5.2.1.2	<i>Einfluss der Überschirmung</i>	175
5.2.1.3	<i>Einfluss des Standraums</i>	179
5.2.2	Merkmale zu Wachstum und Qualität.....	181
5.2.2.1	<i>Wachstum</i>	181
5.2.2.2	<i>Ästigkeit</i>	184
5.2.2.3	<i>Astreinigung</i>	193
5.2.2.4	<i>Stammform</i>	199

5.3	Synthese	207
5.3.1	Wirkung der Überschirmung	207
5.3.2	Wirkung des Standraums.....	217
5.3.3	Wirkung von Genetik, Pflanzenbehandlung und Standort	224
6	Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen.....	230
6.1	Einführung	230
6.2	Empfehlungen für den Fichtenaltbestand	232
6.3	Empfehlungen für die Pflanzenzahlen im Buchenvoranbau	238
7	Ausblick	246
8	Zusammenfassung.....	249
9	Summary	254
10	Literatur	259
11	Software und Softwarepakete zu R.....	290
12	Tabellenverzeichnis.....	292
13	Abbildungsverzeichnis.....	294
14	Formelverzeichnis	298
15	Abkürzungsverzeichnis	300
16	Anhang.....	301

1 Einleitung

In Deutschland werden sowohl die Waldfläche als auch der Holzvorrat des Oberstandes von den Nadelbaumarten Fichte und Kiefer dominiert (BMEL 2016 S. 15 und S. 30). Dieser Zustand nahm seinen Beginn, weil man seit dem Mittelalter der stark gesteigerten Waldnutzung, die sich in weitreichender Walddevastierung äußerte, ab Ende des 18. Jahrhunderts durch geregelte Forstwirtschaft entgegengetreten war. Daraus resultierten einschichtige Reinbestände aus Fichte oder Kiefer, die im Altersklassenwald bewirtschaftet wurden (MOSANDL 1996), um neben dem Erhalt der Waldfläche an sich auch den gestiegenen Rohholzbedarf durch die Industrialisierung decken zu können (THOMASIVS 1990, RÖHRIG et al. 2006 S. 19ff und S. 26). An einer ökonomisch ausgerichteten Waldstruktur hat sich seither wenig geändert. Allerdings gab es immer wieder – auf einzelne Perioden begrenzt – waldbauliche Ansätze mit anderer Orientierung, die diese Handlungsmuster durchbrachen (SPELLMANN 1996, HEHN 1997). Die Autorin nennt hier z. B. GAYER (1886 zit. n. HEHN 1997) als frühen Vertreter des Mischwaldgedankens. In den zwanziger und dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts sind vor allem ALFRED MÖLLER mit seiner Dauerwaldidee und ALFRED DENGLER mit deren Weiterentwicklung zu nennen, die nach dem zweiten Weltkrieg von u. a. von HERMANN KRUTZSCH fortgeführt und umgesetzt wurde (RÖHRIG 1979, HUTH & WAGNER 2013). In den 1970er Jahren bekamen in der damaligen DDR die Industriemäßigen Produktionsmethoden IPM (THOMASIVS 1996) wieder die Oberhand. Aber auch im westlichen Teil Deutschlands dominierten die Vorratsaufbaubetriebe aus einschichtigen Fichtenreinbeständen (SPELLMANN 1996). Weil die folgenden fünfzehn Jahre durch massive Waldschäden gekennzeichnet waren und sich auch standörtliche Nachteile des Fichtenanbaus bemerkbar machten, begann in dieser Zeit bereits die Umwandlung in andere Bestandestypen (THOMASIVS 1990, THOMASIVS 1996). Davon abgesehen gab es auch schon eher das Bestreben, risikoreiche, standortsfremde Fichtenbestockungen durch Buchenbestockungen abzulösen (SCHÜMANN 1968). Die massiven Waldschäden im Harz Anfang der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts waren der Auslöser für die ökologische Waldentwicklungsplanung des Landes Niedersachsen (Programm LÖWE), welches als Vorreiter für die deutschlandweiten Umbaubemühungen gelten kann

(SPELLMANN 1996, LÜPKE 2004), wenngleich bereits in Süddeutschland die Buche seit den 80er Jahren ins Zentrum umfangreichen waldbaulichen Handelns gerückt war und aktiv in Fichtenreinbestände eingebracht wurde (PALMER 1985). SPELLMANN (1996) und HEHN (1997) nennen als allgemeine Gründe für diese Anstrengungen neben der Stabilisierung von Fichtenbeständen gegen immanente Risiken wie Sturm, Schnee, Rotfäule und Insekten die Erhaltung der standörtlichen Nachhaltigkeit. LÜPKE (2004) ergänzt, dass eine größere Naturnähe und das Senken von atmosphärischem Kohlenstoff zu den Waldumbau-Zielen seit Ende der 1980er Jahre gehört. Diese Motivation läutete die jetzt noch andauernde Ära des naturnahen, ökologischen Waldbaus ein. Nach STANTURF (2005) ist der Waldumbau (Rehabilitation) eine Form der Wiederherstellung des Waldes in einen historischen oder naturnahen Zustand, für welchen die Funktionenerfüllung durch maximale Strukturvielfalt erreicht wird. Seit dem neuen Jahrtausend treten in diesem Konzept verstärkt noch andere Aspekte wie der Klimawandel in den Vordergrund (LÜPKE 2004, WAGNER 2008a). Allmählich wurden Stimmen laut, die eine Rationalisierung für den ökologischen Waldbau forderten – sei es durch eine Trennung der Waldfunktionen auf Bestandesebene und die Verknüpfung mit konkreten Strukturelementen (WAGNER 2004, WAGNER 2007b, HUTH & WAGNER 2013, WAGNER et al. 2013) oder auf Betriebsebene via Segregation größerer Einheiten bzw. mit Begrenzung auf maximal drei Waldfunktionen im Bestand (AMMER & PUETTMANN 2009). Allen ist das Plädoyer für klare Bewirtschaftungsziele mit räumlicher Zuordnung gemein. Die oben genannten Waldumbauziele seit Ende der 1980er Jahre definieren kleinflächig strukturierte, standortgerechte, ökologisch stabile, naturnahe und leistungsfähige Mischwälder in Form von Dauerwald als Garant für Nachhaltigkeit und Multifunktionalität auf ganzer Fläche (RUDOLF 1996). Über die Grenzen dieser Postulate haben sich WAGNER (2004), LÜPKE (2004) und HUTH & WAGNER (2013) eingehend geäußert. Für LÜPKE (2004) ist den genannten Zielen sogar primär eine naturschutzfachliche Ausrichtung immanent. Die notwendige Rationalisierung des Waldumbaus beginnt nach WAGNER (2007a) damit, dem waldbaulichen Tun klare Ziele zuzuweisen (AMMER & PUETTMANN 2009). Dazu formuliert er hilfstellend die Begriffe „Nachhaltumbau“ und „Funktionsumbau“. Er versteht ersteren als einen auf die aktuellen Bedürfnisse gerichteten Waldumbau, was im Falle von Qualitätsholzerzeugung einen hohen Investitionsumfang bedeutet.

Beim Nachhaltumbau hingegen rücken ihm zufolge auch die zukünftig möglichen Anforderungen an den Wald in den Fokus, was möglichst breit gefächerte, zukünftige Handlungsoptionen ermöglichen soll. Im Fall der Buche heißt das, Verjüngungsinitalie über eine große Fläche hinweg zu schaffen, allerdings mit sehr geringer wirtschaftlicher Intensität (WAGNER 2007b). In der vorliegenden Arbeit ist der betrachtete Ausschnitt waldbaulichen Handelns der Vorausverjüngung auf den Funktionsumbau zur Qualitätsholzerzeugung begrenzt. Im Allgemeinen ist mit dem Einbringen der Buche in Fichtenreinbestände der Anspruch verbunden, Buchenholz hoher Qualität zu erzielen (SCHÜMANN 1968, FLEDER 1987, MOSANDL 2000, LEONHARDT & WAGNER 2006, NAGEL & SPELLMANN 2008). Es handelt sich also um ein ökonomisch untersetztes Ziel, weil Buchenwirtschaft an sich hohe Wertanteile der Bestände erfordert (FLEDER 1987, HEIN et al. 2007), um nicht allzusehr hinter dem Ertrag von fichtendominierten Betrieben zurückzubleiben (MÖHRING 2004, MÖHRING & WILHELM 2015). Abgesehen davon wurde noch in den 1990er Jahren ein passiver Voranbau als extensive Variante ohne direkte Qualitätserwartung praktiziert (MOSANDL 1996). Mit dem Voranbau geht sowohl ein Baumartenwechsel im künftigen Hauptbestand als auch möglicherweise eine Strukturänderung einher (HANSEN & SPIECKER 2005). Letztere wird über Mischungsart, Mischungsgrad und Mischungsanteil der Baumarten in der Verjüngung erreicht (WAGNER 2007a). In der vorliegenden Arbeit wird nur der Fall reiner Buchenverjüngung untersucht. Das Verfahren des Voranbaus bedient sich neben Wildlingen oder Containerpflanzen meist solchen mit nacktem Wurzelballen, die manuell in die Fichtenbestände gepflanzt werden (WAGNER & LUNDQVIST 2005). Wegen seiner guten wirtschaftlichen Kontrollierbarkeit (MOSANDL 2000) ist es zum Standardverfahren für die Umwandlung von entsprechend alten, einschichtigen und homogenen Fichtenbestockungen geworden (WAGNER & LUNDQVIST 2005), weshalb es Gegenstand dieser Arbeit ist. Als weitere Verfahren sind Naturverjüngung über einzeln eingemischte Buchenüberhälter und Saat zu nennen (MOSANDL & KÜßNER 1999, WAGNER & LUNDQVIST 2005, WAGNER 2007b). Dass das Ziel, wertvolles Buchenholz zu erziehen lohnend ist, belegt die im Gegensatz zur Fichte große Preisspanne zwischen Holz schlechter und sehr guter Qualität (MÖHRING 2004, NAGEL & SPELLMANN 2008). Die qualitätsbestimmenden Merkmale werden verschieden definiert. SCHÜTZ (1998) teilt diese Merkmale in holzanatomisch-technologische und sylvologische ein. Zu den ersteren zählt er

Holzspannungen und Farbkern, unter Umständen auch Drehwuchs. Zu den letzteren rechnet er verallgemeinernd die Stammform. SCHMIDT (2002 S. 11) spricht von obligaten und fakultativen Qualitätskriterien. Seine Klassifizierung ist auf die Modellierbarkeit von Qualitätsmerkmalen ausgerichtet. Insofern sind obligate Kriterien solche, die vom Wachstum des Baumes abhängig und damit modellierbar sind, wogegen fakultative von anderen Faktoren wie Standort oder Herkunft abhängen. In der vorliegenden Arbeit werden der Einteilung von SCHÜTZ (1998) folgend Güte Merkmale untersucht, denen eine waldbauliche Beeinflussbarkeit unterstellt wird. Bei hochwertigem Buchenholz handelt es sich um Stammholz der Güteklasse A, welches nur verwendungsseitig unbedeutende Merkmale aufweist und ansonsten fehlerfrei ist (DFWR/DHWR 2015 S. 3). Das heißt, das Buchenstammholz nur überwallte Äste haben darf, geringfügig drehwüchsig und leicht gekrümmt sein kann. Risse, Fäulen oder Schäden sind ebenso unzulässig wie ein verfärbter, fakultativer Kern großen oder unregelmäßigen Ausmaßes (DFWR/DHWR 2015 S. 25). Darüber hinaus gehört auch Buchenholz der Güte B (DFWR/DHWR 2015 S. 3) zu den zielkonformen Sortimenten bei der Bewirtschaftung von Buchenwäldern. Die Anforderungen an die Ästigkeit, Stammform und Verkernungsanteile sind etwas niedriger als in der Güteklasse A (DFWR/DHWR 2015 S. 3). Nach SEELING (1998) färben sich die Kernsubstanzen des normalerweise hellen Buchenholzes nicht in jedem Fall wie z. B. bei der Eiche. Es werden dafür vielmehr sekundär oxidative Prozesse verantwortlich gemacht (SEELING 1998, WERNSDÖRFER et al. 2005). An Qualitätsholz wird neben der Astreinheit des Stammes und dessen Form eine große Dimension geknüpft (SPIECKER 1991 S. 14, STEPIEN et al. 1998 S. 21, S. 31, NUTTO 1999 S. 3, LANGSHAUSEN 2009 S. 14f). Anders als bei der Eiche spielen absolute Jahrringbreiten (SPIECKER 1991 S. 14, NUTTO 1999 S. 3) nur eine untergeordnete Rolle. Stattdessen wird im Schnittholzbereich weiches Holz mit gewachsenem Gefüge vorgezogen, welches durch einen geringen Anteil an Holzfasern sowie durch große und weite Gefäße gekennzeichnet ist, die sich gleichmäßig über den Jahrring verteilen (NEPVEU 1981). Ein solches Holz zeichnet sich durch weniger Risse und niedrigere Rohdichten aus. Insbesondere Bäume mit eingeklemmten Kronen und folglich geringen Durchmesserzuwächsen bauen aber unerwünschte Wachstumsspannungen im Holz auf (LEWARK 1987 S. 79, SCHÜTZ 1998). Allerdings tritt die Bedeutung dieses Qualitätsmerkmals hinter z. B. der Ästigkeit zurück (LEWARK 1987 S. 79). Qualitativ hochwertiges Buchenholz

mit Stammdurchmessern über 50cm ist im Unterschied zu Holz durchschnittlicher Qualität nach HAPLA & MILITZ (2008) für Messer- und Schäl furniere, Sperrholz und Formteile einsetzbar. Ansonsten findet es noch im Innenausbau und der Musikinstrumentenherstellung Verwendung. Um Treppen, Parkett, Fußböden oder selbst Paletten herstellen zu können, ist mindestens eine mittlere Qualität notwendig (HAPLA & MILITZ 2008). Es ist für die Sinnhaftigkeit der vorliegenden Untersuchung essenziell, dass zwischen äußerlich messbaren Baummerkmalen und der Güte des im Sägewerk eingeschnittenen Holzes Zusammenhänge bestehen (SCHULZ 1961a S. 23, STEPIEN et al. 1998 S. 21). In beiden Untersuchungen wird die herausragende negative Bedeutung von Ästen und astbezogenen Merkmalen wie Beulen auf die Qualität geschildert (SCHULZ 1961a S. 23f, STEPIEN et al. 1998 S. 21). Daneben zeigen die Autoren beider Studien, dass geneigte oder krumme sowie zwieselige Stämme einen schlechten Einfluss auf die Schnittholzqualität haben (SCHULZ 1961a S. 49ff, STEPIEN et al. 1998 S. 21). Wenn es sich um die erwähnte große Preisdifferenzierung bei Buchenholz unterschiedlicher Güte handelt, ist ein Forstbetrieb aus wirtschaftlichen Gründen gut beraten, den Funktionsumbau (sensu WAGNER 2007a) so zu gestalten, dass dieses Ziel erreicht werden kann – allein schon deshalb, weil buchendominierte Betriebe im Vergleich zu fichtendominierten trotz Einbezug von Produktionsrisiken immer noch eine niedrigere Rentabilität aufweisen (MÖHRING et al. 2008). Im Allgemeinen wird für eine Qualitätsholzerziehung als notwendig erachtet, einerseits eine hohe Anzahl an Buchen zu pflanzen und andererseits den Fichtenaltbestand längere Zeit über dem Voranbau zu belassen. Eine hohe Pflanzendichte ist deswegen notwendig, weil damit ein früh einsetzender Dichtstand und ein schnelles natürliches Astabsterben vonstatten gehen (z. B. SPIECKER 2007). Dass eine beschattende Wirkung des Oberstandes positive Konsequenzen auf wichtige Qualitätseigenschaften hat, ist bekannt (z. B. SCHMITT et al. 1995, WAGNER & MÜLLER-USING 1997, MOREL & PLANCHAIS 2000, WEIDIG 2016 S. 170ff).

Es stellen sich im Kern dieser Arbeit daher zwei Fragen, die auf eine Rationalisierung des Verfahrens „Qualitätsholzerziehung von Buche im Voranbau“ ausgerichtet sind.

- 1) Erstens muss der wertproduzierende, aber unter Umständen durch Sturmwurf, Rotfäule oder Insektenbefall risikogefährdete Fichtenaltbestand (THOMASIVS 1990, HANSEN & SPIECKER 2005) in den Blick genommen werden. Der Aspekt der Überschildung lässt sich von drei Seiten beleuchten.
 - a) Zum einen gilt es zu überlegen, ob und welche Auflichtung notwendig und zweckmäßig ist, um gut geformte junge Buchen zu erhalten. Wie in zahlreichen Studien belegt ist, reduziert ein Fichtenschirm deutlich Strahlung, Wasser und Nährstoffe für die Buchenverjüngung (AMMER 2000 S. 59, PETRIŦAN et al. 2011). Müssen Eingriffe in den Altbestand zum besseren Wachstum der Verjüngung vorgenommen werden, ohne dass der maximale laufende Wertzuwachs des Fichtenbestandes erreicht ist (SPELLMANN & WAGNER 1993), bedeutet dies Hiebsoffer die es zu vermeiden gilt (PETERSEN & WAGNER 1999).
 - b) Unter dem Gesichtspunkt des hohen Betriebsrisikos alter Fichtenbestände, ausgedrückt durch eine hohe Wahrscheinlichkeit an Wertverlust (THOMASIVS 1990, EISENHAEUER et al. 2016) stellt sich aber auch die Frage, welche Schirmdichte höchstens notwendig ist, um einen Qualitätsverlust der Buchenverjüngung zu umgehen, nachdem WEIDIG (2016 S. 170ff) die Überschildung an sich als unverzichtbar für eine gute Qualität von Buchenvoranbauten herausgestellt hat.
 - c) Die dritte Frage lässt sich in Bezug auf die notwendige Überschildungsdauer formulieren. Wird eine gerichtete Qualitätsentwicklung im Buchenvoranbau unterstellt ist es von Interesse zu wissen, ab wann sich unter gegebenen Schirm- und auch Seitendruckbedingungen Qualitätsunterschiede überhaupt bemerkbar machen. Bei dieser Sichtweise wird davon ausgegangen, dass die Pflanzenzahl im Voranbau nicht durch Pflegemaßnahmen verändert wird. Diese Fragen berühren Detailspekte zur Rationalisierung des in Rede stehenden waldbaulichen Verfahrens und sind im Gegensatz zu den Ausführungen von WAGNER (2007a) waldbautechnischer Natur.

2) Zweitens ist von Interesse, ob und inwieweit die Überschirmung des Altbestandes in ihrer positiven Wirkung einen sehr hohen Dichtstand in der Buchenverjüngung ersetzen kann (LEONHARDT & WAGNER 2006). Anders ausgedrückt versucht die vorliegende Untersuchung eine Antwort auf die Frage zu finden, welche Pflanzenzahlen auf der Nettopflanzfläche bei gegebener Altbestandesdichte maximal notwendig sind, um eine gute spätere Holzqualität zu erzielen.

Rationalisierungsbemühungen sind allerdings nicht neu. Weil Buchenvoranbauten mit dem genannten Produktionsziel als Teil des Waldumbaus sehr kosten- und kräfteintensiv sind (SPELLMANN 1996, WAGNER 2007a) und sich die Forstbetriebe in den 1990er Jahren wegen des Schwachholzproblems in einer schlechten Ertragslage befanden (SCHÜTZ 1996, SPELLMANN 1996), wurde bereits früh nach einer Rationalisierung auch im Bereich der Bestandesverjüngung gesucht (SCHÜTZ 1996, MOSANDL 2000). Die Überlegungen reichen von Änderung der Produktionsziele bis hin zur Umgestaltung der Verfahren für die künstliche Verjüngung (MOSANDL 2000). Der Autor führt an, dass die Saat in Betracht gezogen werden soll (LEDER et al. 2003) und andererseits die Pflanzenzahlen oft drastisch gesenkt werden könnten. Das hat seine Ursache darin, dass wie in der französischen Forstwirtschaft, die sich durch eine traditionelle Wertholzorientierung im Laubholz vorwiegend aus Naturverjüngung auszeichnet, der künstlichen Buchen-Verjüngung jegliche Qualitätserwartung abgesprochen wurde (BUFFET et al. 1981). Orientiert an der hohen Güte natürlich verjüngter Buchen wurden in Deutschland bis in die 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts sehr hohe Pflanzenzahlen je Hektar verwendet, SCHLÜTER (1960) nennt Zahlen bis zu 23.400 Stck. Bereits OTTO (1985) kritisiert solche hohen Stückzahlen und setzt eine Obergrenze bei 10.000 Stck. Dieselbe Zahl wird von THOMASIU & HELBIG (1976) für die damalige DDR genannt, nachdem vorher teilweise mit Stückzahlen von 13.000 bis 17.000 je Hektar gearbeitet wurde, die sogar das Prädikat „stammzahlarm“ zu tragen hatten (SCHÜMANN 1968). Für Buchenvoranbauten gibt es wenige konkrete Empfehlungen. Bei FISCHER (1968) finden sich Angaben, dass am Saum 5.000 Stck/ha und im Bestand 4.000 Stck./ha im Allgemeinen ausreichend sein müssten. LEDER & WEIHS (2000) empfehlen 5.000 Stck./ha unter Kieferschirm. KOCH (1992) spricht davon, dass in Bayern unter Schirm die sonst geltenden

10.000 Stck./ha auf 6.000 Stck./ha reduziert wurden. KLEIN (1983) wiederum hält 10.000 Stck./ha für Buchenvoranbauten als zielführend in Bezug auf eine gute Qualität. Empirisch hergeleitete Angaben für Stückzahlen in Voranbauten sind in begrenztem Umfang in Form kleinerer Studien verfügbar (LEDER & WEIHS 2000). Lediglich WEIDIG et al. (2015) und WEIDIG (2016 S. 173) leiten 5.000 bis 6.000 Stck./ha aus umfangreichen Untersuchungen als Untergrenze ab und sprechen von optimalen Stückzahlen, wenn sie sich zwischen 8.000 und 10.000 Stck/ha bewegen. Die genannte Arbeit hat jedoch ihren Schwerpunkt bei Voranbauten, deren schützender Altbestandesschirm durch Stürme abhanden kam und die in ihrer Qualität regulär beschirmten Vorausverjüngungen gegenübergestellt werden. Ansonsten ist nur noch die Studie von LINNERT (2009) zu nennen, die sich mit Buchenvoranbauten und deren Qualität beschäftigt. Der Fokus ist in seiner Untersuchung aber auf einen verschieden dicht gehaltenen Fichtenoberstand und seiner Wirkung auf die jungen Buchen gerichtet (LINNERT 2009 S. 21), die ähnlichen Alters sind und im Pflanzverband kaum variieren (LINNERT 2009 S. 27). Die Frage, *wie dicht* Schirm- und Seitendruck zu sein haben um eine vernünftige Qualität der jungen Buchen zu erzielen (LEONHARDT & WAGNER 2006), wurde jedoch bislang noch nicht tiefgreifend untersucht. Aus den bisherigen Ausführungen lassen sich für die vorliegende Arbeit daher folgende Arbeitshypothesen ableiten:

Hypothese 1

Es wird in Bezug auf die Qualitätsholzerziehung davon berichtet, dass sich eine Überschirmung im Gegensatz zur Freifläche (LE TACON 1985, NINGRE 1987 S. 30 positiv auf die entsprechenden Merkmale junger Buchen auswirkt (u. a. KURTH 1946 S. 619f, S. 632f, BROWN 1951 und 1955, SCHMITT et al. 1995, PETERSEN & WAGNER 1999, LEDER & WEIHS 2000, MOREL & PLANCHAIS 2000, LEONHARDT & WAGNER 2006, WEIDIG 2016 S. 170ff). Darüber hinaus wird in der vorliegenden Arbeit unterstellt, dass auch die Intensität der Schirmdichte eine gerichtete Entwicklung qualitäts- und wachstumsrelevanter Merkmale bei den Voranbau-Buchen hervorruft. Dazu zählen das Höhen- und Durchmesserwachstum (u. a. PETERSEN & WAGNER 1999) sowie die Stabilität. Weiterhin wird angenommen, dass der Schirm einen Einfluss auf die Astreinheit und die Astreinigung ausübt, wie es WEIDIG (2016 S. 170) andeutet. Auch der Stammform und der Achsenmorphologie wird eine Reaktion auf die Dichte der Fichtenbestockung

zugesprochen. Damit einhergehend wird die Wahrscheinlichkeit, mit der gut geformte Exemplare auftreten, mit einer veränderten Überschirmungsintensität hypothetisch in Verbindung gebracht.

Hypothese 2

In der forstlichen Literatur gibt es vielerlei Belege dafür, dass sich ein enger Standraum negativ auf Wachstums- aber meistens positiv auf Qualitätsgrößen junger Bäume auswirkt (u. a. KURTH 1946 S. 611 und S. 638, MUHLE & KAPPICH 1979, KLEIN 1983, WEIDIG 2016 S. 170). Diesen Ansätzen folgend wird für die Buchen der vorliegenden Arbeit angenommen, dass über die Pflanzenzahl im Voranbau sowohl Wachstum und Stabilität als auch Astreinheit, Astreinigung, Stammform, Zwieseligkeit und die Kronenmorphologie beeinflusst werden können. Weil der Altbestand in seiner Wirkung simultan betrachtet wird, ist davon auszugehen, dass über die Oberstandsichte auch die Stärke der Konkurrenz im Unterstand reziprok beeinflusst werden kann (COLLET & CHENOST 2006).

Hypothese 3

Es wird davon ausgegangen, dass Konkurrenz einen wesentlichen waldbaulichen Steuermechanismus darstellt (AMMER 2008). Weil es sich bei der Konkurrenz nicht nur um einen räumlichen, sondern auch einen zeitlich gerichteten Prozess handelt (WELDEN & SLAUSON 1986, AMMER 2017) wird angenommen, dass in älteren Buchenvoranbauten die Wirkungen des Fichtenschirms und des Pflanzverbandes deutlicher hervortreten als in jüngeren (NICOLINI & CARAGLIO 1994, NICOLINI 1998 und 2000). Daraus ergibt sich die Vermutung, dass die Einflussfaktoren Schirm- und Seitendruck über eine längere Zeit hinweg in definierter Dosis bzw. Stärke (AMMER & DINGEL 1997) wirken müssen, um eine gerichtete und waldbaulich steuerbare Entwicklung im Buchenvoranbau hervorzurufen.

2 Material

2.1 Charakteristika der Untersuchungsgebiete

2.1.1 Lage

Die Untersuchungsfragen sind in den zwei Untersuchungsgebieten Sauerland und Elbsandsteingebiet bearbeitet worden. In den nachfolgenden Kapiteln werden der Einfachheit halber die Bezeichnungen der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Sachsen mit den Abkürzungen NRW und SAX verwendet.

Das Sauerland liegt im Südosten Nordrhein-Westfalens an der Grenze zu Hessen. Es bildet das gleichnamige Wuchsgebiet und untergliedert sich in sieben Wuchsbezirke. Die bearbeiteten Flächen liegen alle im Wuchsbezirk Nordsauerländer Oberland. Damit bildet es die geologische und klimatische Abgrenzung zur nördlich gelegenen Westfälischen Bucht (GAUER & ALDINGER 2005 S. 205ff). Es wird im Süden von der Ruhr begrenzt und liegt im Gebiet zwischen Arnsberg, Meschede, Brilon, Marsberg, Rüthen und dem Möhnesee.

Das Elbsandsteingebiet liegt im Osten Sachsens an der Landesgrenze zur Tschechischen Republik. Von der Elbe durchschnitten, ist es in einen rechts- und linkselbischen Teil gegliedert (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 171). Nach der forstlichen Standortsgliederung bildet es das Wuchsgebiet Elbsandsteingebirge, das aus zwei Wuchsbezirken besteht. Naturräumlich wird das Elbsandsteingebiet als „Sächsische Schweiz“ bezeichnet (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 193) und gliedert sich in die Mesochoren Vordere Sächsische Schweiz, Linkselbisches Bergland der Sächsischen Schweiz, Zentrale Sächsische Schweiz und die Hintere Sächsische Schweiz (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 200). In der vorliegenden Arbeit interessiert der linkselbische Teil, genauer das linkselbische Bergland, welches sich im Gebiet zwischen Bahretal – Langhennersdorf – Cunnersdorf – Kleingießhübel und der Staatsgrenze befindet. Diese Mesochore bildet den mittleren Teil des Wuchsbezirkes 4602 Obere Sächsische Schweiz (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 176).

2.1.2 Klima

Die klimatischen Grundcharakteristika sind für die beiden Wuchsbezirke den Tabellen von WOLFF et al. (2003) entnommen und in der folgenden Übersicht aufgeführt:

Tabelle 2-1: Klimatische Kenngrößen nach Wuchsbezirken.

Entnommen aus WOLFF et al. (2003)

klimatische Kenngröße			Wuchsbezirk Nordsauerländer Oberland	Wuchsbezirk Obere Sächsische Schweiz
mittlere Lufttemperatur 1961-1990	Jahr	[°C]	7,6	7,7
	Mai-Sept.	[°C]	13,6	14,6
mittlere Dauer Lufttemperatur 10°C		Tage	148	154
mittlere Jahresschwankung Temperatur		[°C]	15,7	18,6
mittlere Januartemperatur		[°C]	-0,2	-1,8
mittlere Julitemperatur		[°C]	15,5	16,7
mittlere Niederschlagshöhe	Jahr	[mm]	1018	777
	Mai-Sept.	[mm]	441	384
klimatische Wasserbilanz	Jahr	[mm]	504	150
	Vegetationsperiode	[mm]	31	-66
minimale klimatische Wasserbilanz	Vegetationsperiode	[mm]	-34	-105

Die klimatischen Unterschiede beruhen im Wesentlichen darauf, dass das Klima im Nordsauerländer Oberland anhand der Temperaturschwankungen als stark subatlantisch und in der Oberen Sächsischen Schweiz als schwach subkontinental eingestuft werden kann (WOLFF et al. 2003 S. 11). Das äußert sich für die Obere Sächsische Schweiz in höheren Sommer- und niedrigeren Wintertemperaturen (vgl. Tabelle 2-1) und darüber hinaus in geringeren Niederschlagsmengen, was zu einer deutlich schlechteren klimatischen Wasserbilanz führt. Die oben gemachten Angaben beziehen die Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 ein. Die klimatische Wasserbilanz ist in der Periode von 1991 bis 2005 insgesamt kaum verändert, nur im Winterhalbjahr tritt gegenüber der vorangegangenen Periode ein leichter Rückgang auf BERNHOFER et al. 2008 S. 135ff).

2.1.3 Geologie, Relief und Boden

Die Beschreibung dieser Punkte ist für das Wuchsgebiet Sauerland aus GAUER & ALDINGER (2005 S. 205f) entnommen. Das Sauerland gehört zur nordöstlichen Abdachung des Rheinischen Schiefergebirges. Es gliedert sich in Sättel und

Mulden, die von Südwesten nach Nordosten verlaufen. Sie sind ihrerseits wieder in kleinere Untereinheiten gegliedert. Schwach karbonhaltige Schichten aus dem Mitteldevon sind im Raum Brilon zu finden. Ansonsten finden sich im nördlichen Teil des Sauerlandes, in dem die untersuchten Flächen liegen, Tonschiefer sowie Sand- und Schluffsteine aus dem Oberkarbon mit vereinzelt vorkommenden Grauwacken. Im Raum Warstein und Brilon wird der Untergrund von oberdevonischen Massenkalken gebildet. Außerdem sind pleistozäne Lössablagerungen am Nordrand des Gebietes anzutreffen. Flüsse haben sich stark in die Landschaft eingeschnitten, sodass eine tiefe Zertalung entstanden ist. Insgesamt handelt es sich um ein flachwelliges bis kuppiges Hügelland. Die mittlere Höhenlage im Wuchsgebiet befindet sich zwischen 300 und 550 m ü. NN im submontanen Bereich. Im Untersuchungsgebiet dominieren locker gelagerte Braunerden mittlerer Nährkraft, die zum Teil je nach Grundgestein stärker podsoliert sind. Sind mächtigere Lössdecken vorhanden, tragen sie Parabraunerden. Sobald es sich um Lössfließerden über tonreichem Untergrund bzw. um Hochflächenlehm handelt, tragen sie auch Pseudogleye.

Das Elbsandsteingebirge wird der Mesoregion sächsische Mittelgebirge zugeordnet, wenngleich die Höhenlage von 300 bis 500m ü NN dies nicht erwarten lässt, aber die sehr charakteristische, felsige und formenreiche Oberflächengestalt mit tief eingeschnittenen Tälern führte dazu. (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 193, SCHWANECKE & KOPP 1996, S. 170). Die Sächsische Schweiz ist geologisch gesehen Teil des unteren Tafelstockwerks und gehört regionalgeologisch zur sächsischen Kreidesenke, einem Ausläufer des böhmischen kreidezeitlichen Meeres mit Sandstein-, Kalkmergel- und Tonablagerungen aus dem Cenoman und Turon. (BERNHARDT & MANNSFELD 1995, S. 193, KOWALKE 2000 S. 55f). Sie wird vom variskischen Grundgebirge des Paläozoikums begrenzt, im Südwesten von der Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Antiklinalzone mit Paragneisen und im Nordosten vom Lausitzer Granit-Granodiorit-Massiv. Der westliche Teil der Sächsischen Schweiz wurde im Tertiär gekippt. Das Lausitzer Granit-Granodiorit-Massiv schob sich im rechtseibischen Teil gegen Ende der Kreidezeit auf den Sandstein der Sächsischen Schweiz auf (RICHTER 1995 S. 12-15). Im Tertiär begann die Zerschneidung des Gebiets durch die Elbe und ihre Nebenflüsse, die die Hohlformen schufen (KOWALKE 2000 S. 57). In dieser Zeit und im darauf folgenden Quartär verwitterte das

Grundgebirge, sodass sich der Schutt teilweise in die Hohlformen des Elbsandsteingebirges ablagerte (KOWALKE ebd.). In diese Phase fällt auch das Vordringen des Elster-Inlandeises der Zwickauer Phase bis in die Sächsische Schweiz hinein. Daher sind im linkselbischen Gebiet Lössderivate und Schuttdecken als äolische Ablagerungen der Weichselkaltzeit zu finden; sie bilden die Lössgrenze in Richtung Mittelgebirge. (RICHTER 1995 S. 16-19). Daraus resultiert auch der teilweise höhere Lehmgehalt des Quadersandsteins im Wuchsbezirk Obere Sächsische Schweiz, die standortskundlich im Rosenthaler Sandstein-Mosaikbereich zusammengefasst sind und daneben noch Sandsteinfelsen und Tafelberge enthalten (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 176f). Vom Relief her gesehen ist das hier in Rede stehende linkselbische Bergland nach Nordosten geneigt und damit „...die ausklingende östlichste Forstetzung der Erzgebirgsnordabdachung“ (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 201). In dieser Mesochore liegt der Krippen-Bach, der von Süden zunächst nach Nordwesten, anschließend in nordöstliche Richtung fließt und kurz vor Bad Schandau in die Elbe mündet. An den östlich und westlich vom Krippen-Bach gelagerten Relief-Strukturen liegen die Untersuchungsflächen. Der Krippen-Bach hat im Laufe der Zeit ein Sohlental in die Schichtstufe eingegraben. Diese landschaftlichen Bausteine bilden bis zur klimatischen Höhengrenze vom unteren Bergland eine eigene Mikrochore. Die westlich benachbarten Mikrochore ist ein Tafelsgebiet mit dem Großen Zschirnstein (563m ü NN) (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 177), die östlich benachbarte ein Flachrelief mit welligen Hochflächen südlich von Reinhardtsdorf (BERNHARDT & MANNSFELD 1995, S. 200).

Den Hauptanteil bodenbildenden Substrats macht im Wuchsgebiet mit 90% der Sandstein aus, Löss-Substrate sind zu 4% anzutreffen und nur 6% entfallen auf paläozoische Festgesteine (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 174). Die Lössleinwehungen aus dem Periglazial, die in den Ebenheiten zu finden sind, konzentrieren sich im linkselbischen Bergland auf das Gebiet um Rosenthal und östlich von Reinhardtsdorf bis zum Elbeufer. Auf lössbeeinflussten Substraten haben sich Braunerden und Braunstaugleye oder Staugleye ausgebildet. Die Sandsteinsubstrate tragen meist Braunpodsole, auch Podsol-Ranker, Fels- und Blockböden sind zu finden (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 177). Die Talsohlen der Biela, des Cunnersdorfer Baches und des Krippen-Baches sind mit Gleyen ausgekleidet (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 198). Als Besonderheit sind im

Wuchsgebiet die vielen Hang-, Steilhang-, und Felsbereiche anzusehen, die ca. 50% der Standorte ausmachen (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 174).

2.1.4 Vegetation und Waldentwicklung

Für das Sauerland sind die nachstehenden Angaben aus GAUER & ALDINGER (2005 S. 206) übernommen. Die heutige potenzielle natürliche Vegetation(hpnV)¹ wird im Sauerland vom artenarmen Hainsimsen-Buchenwald in verschiedenen edaphisch und höhenbestimmten Formen dominiert. Das sind u. a. der Rasenschmielen-Hainsimsen-Buchenwald, der Flattergras-Buchenwald und der Waldmeister-Buchenwald. Obwohl die Fichte ursprünglich nicht vorhanden war, wird sie wegen ihrer hohen Konkurrenzkraft der hpnV zugerechnet. Daher besteht im montanen Bereich die hpnV aus Fichten-Buchenwäldern. Das Sauerland ist historisch ein Gebiet mit einem hohen Waldanteil und einer vergleichsweise dünnen Besiedlung ohne eine großflächige agrarische Nutzung. Die Wälder von Landesherren und Geistlichen sind heute zusammenhängende, große Landeswaldgebiete.

Im linkselbischen Bergland des Elbsandsteingebirges setzt sich die hpnV hauptsächlich aus verschiedenen edaphischen Ausbildungsformen und Höhenformen des bodensauren Hainsimsen-Eichen-Buchenwaldes zusammen. Sie decken eine Standortsamplitude von terrestrischen und wechselfeuchten, basenarmen Standorten ab (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 200). In dicht zertalten Gebieten mit Rücken und Riedeln, die sich westlich an den Elblauf anschließen, besteht die hpnV aus dem (Hoch)kollinen Eichen-Buchenwald. Mit steigender Meereshöhe kommt auf den terrestrischen Standorten mittlerer Nährkraft an den Unter- und Mittelhängen sowie auf Flachreliefs und kleinen Plateaus des südlichen Berglandes der Submontane Eichen-Buchenwald vor (nach BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 200 und SCHMIDT et al. 2002 Abb. 10). Mit zunehmender Höhenlage und abnehmender Substratmächtigkeit würde auf grundwasserfernen, flachgründigen Standorten der Tafelsgebiete und Bergfelsgebiete der Kiefern-Eichenwald in der edaphischen Ausprägung Typischer Kiefern-Eichenwald vorkommen.

Das linkselbische Bergland weist zusammen mit der Hinteren Sächsischen

¹ Die potenzielle natürliche Vegetation (PNV) folgt der Definition von SCHMIDT et al. (2002 S. 8f), die die ursprünglich von TÜXEN (1956, zit. n. SCHMIDT et al. ebd.) geschaffene Beschreibung erweitert. Demnach werden nicht nur Schlusswaldgesellschaften, die sich bei abruptem Aufhören der anthropogenen Landnutzung einstellen würden, einbezogen sondern um Pionier- und Zwischenwaldstadien ergänzt.

Schweiz die höchsten Waldanteile auf, die größtenteils aus Fichten bestehen. Die Bewaldung erlitt in den 1980er Jahren schwere Schäden durch SO₂-Immissionen aus tschechischen Kraftwerken (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 172). Die anderen beiden Mesochoren sind auf Grund der höheren Lössanteile in ebeneren Gefilden auch agrarisch genutzt (BERNHARDT & MANNSFELD 1995 S. 199ff, SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 172). Zu erwähnen sind noch die Sandsteinbrüche und die touristische Nutzung der Sächsischen Schweiz als Wander- und Klettergebiet. Im Jahr 1990 wurde ein Nationalpark eingerichtet (SCHWANECKE & KOPP 1996 S. 172).

2.2 Auswahl und Beschreibung der Versuchsflächen

Um die Untersuchungsfragen (vgl. Kapitel 1) adäquat bearbeiten zu können, ist es notwendig, zunächst den standörtlichen Rahmen festzulegen und weiterhin mögliche Störfaktoren (BÄTZ et al. 1975 S. 21) auszuschalten.

- Die Bestände liegen in der Klimastufe Mittlere feuchte Lagen und im kollinen bis submontanen Höhenbereich zwischen 250 bis 550m ü NN und stocken auf terrestrischen Standorten mittlerer bis ziemlich armer Trophie. Damit liegt der Fokus auf der submontanen bis montanen Buchenwaldstufe, die für den Waldumbau hohe Priorität besitzt (MURL 1991 S. 11f, Cramer et al. 2004 S. 8f, Eisenhauer et al. 2016).
- Die Baumart im Oberstand ist einheitlich die Gemeine Fichte. In den letzten fünf Jahren vor der Aufnahme hat der Oberstand keine Sturmwürfe und nur geringfügige Hiebsmaßnahmen erfahren. Das Mindestalter des Oberstandes beträgt 60 Jahre.
- Die Buchenvoranbauten sind nicht als kleinflächige passive Voranbauten angelegt und haben mindestens Horstgröße. In den Buchenflächen haben noch keine Pflegemaßnahme oder keine Ästungsmaßnahmen stattgefunden. Die Mindeststandzeit der Buchen beträgt fünf Jahre seit der Pflanzung.
- Die Morphologie der jungen Buchen ist nicht durch Verbiss modifiziert worden. In Gebieten, in denen die Buche diesbezüglich einem hohen Risiko ausgesetzt ist oder war, haben die Flächen im verbissgefährdeten Entwicklungsstadium unter Zaunschutz gestanden bzw. stehen sie unter diesem Schutz.

Die aufzunehmenden Daten zur Wuchsleistung und Qualitätssicherung von Buchenvoranbauten gewinnen erst durch eine dynamische Betrachtungsweise an Aussagekraft und Verallgemeinerungsfähigkeit. Das setzt voraus, dass Erhebungen nicht nur eine Momentaufnahme durch ein statisches Zeitfenster

abbilden, sondern mögliche Entwicklungstendenzen aufzeigen. Da im begrenzten Bearbeitungsrahmen der Untersuchung Wiederholungsaufnahmen über mehrere Jahre hinweg nicht möglich waren, wurde auf einen Chronosequenzansatz zurückgegriffen (SCHRÖDER 2004, S. 26f, MÜNDER 2005, S. 7). Dieser wird so verstanden, dass sich die unterschiedlich alten Voranbauten in verschiedenen Entwicklungsstufen befinden und als Bestände gedacht werden, die auf gleichen Standorten nebeneinander stocken. Sie bilden als einmalig aufgenommene Wuchsreihe eine zeitlich nacheinander stattfindende Entwicklungsdynamik ab (WENK et al. 1990 S. 116f, PRETZSCH 2002 S. 77ff). Dieses Vorgehen findet auch in waldbaulichen Erhebungen Anwendung (FISCHER 2000).

In Nordrhein-Westfalen erfolgte die Vorauswahl geeigneter Flächen durch die Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF 2003), in Sachsen wurden passende Flächen aus der Forsteinrichtungsdatenbank FESA vorgefiltert (LFP 2004), die vor Ort im Rahmen dieser Arbeit abgeprüft werden mussten. Bei den geeigneten Flächen handelt es sich um Wirtschaftsflächen des Stadtwaldes Meschede, Reviere Meschede und Eversberg sowie des Stadtwaldes Warstein und des Forstamtes Arnsberg, die teilweise zum Versuchsflächennetz der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF)² gehören. Die sächsischen Flächen liegen in den Revieren Kleingießhübel und Cunnorsorf des damaligen Forstamtes Cunnorsdorf, heute Forstbezirk Neustadt des Staatsbetriebes Sachsenforst. Einen Überblick zu den wichtigsten Kenndaten verschafft Tabelle 2-2, in der auch die in dieser Arbeit verwendete Versuchsflächenkennung ersichtlich ist.

² Alle Angaben zu Eigentümer- und Organisationsbezeichnungen für die nordrhein-westfälischen Flächen entsprechen dem Stand im Jahr 2003.

Tabelle 2-2: Versuchsflächenübersicht mit Angaben zur Lage, zum Standort, zum Fichtenaltbestand und zum Buchenvoranbau.

Datenquellen: Die Ziffern in Klammern bedeuten 1 – Unterlagen Forstbetrieb, 2 – Angaben LÖBF, 3 – www.geoportal.sachsen.de letzter Zugriff am 18.09.2017, 4 - www.tim-online.nrw.de letzter Zugriff am 10.02.2013 – 5 eigene Aufnahmen – 6 eigene Berechnungen

Bezeichnung		Lage				Standort				Oberstand Fichte	Unterstand Buche						
Versuchsfläche Parzelle	Probefläche	nördliche Breite [°] (3, 5)	östliche Länge [°] (3, 5)	Eigentümer (1, 2)	(SBS: Waldteil), Abl., UA, Tfi. (1, 2)	Mesorelief (5)	Hangneigung (5)	Hangrichtung (5)	Feuchtigkeitsstufe (1, 4)	Alter [a] (1, 2)	Standzeit [a] (1, 2)	Pflanzverband [m] (1, 2)	Stückzahl pro Hektar (6)				
20	3 4 4 2	51	23	8	17	Stadtwald Meschede	37 c	Rücken	0		mäßig wechselfeucht	70	20	1,2 x 0,8	10.417		
21	12 10 5 4 4 4 5	51	23	8	21		150 a ² und 150 a ³	Oberhang	9 5-7 6	134	SO	mäßig frisch bis trocken	82	18	0,8 x 1,5 bis 1,0 x 1,5	8.333 bis 6.666	
22	1 2 3	51	23	8	17		36 b	Rücken	0-5 (3)	330	NNW	mäßig wechselfeucht	66	20	1,0 x 1,5	6.666	
23	1 2	51	23	8	15	Forstamt Arnsberg	40	Oberhang	7	329	NNW	mäßig wechselfeucht, mäßig frisch bis trocken	74	18/16	1,5 x 1,5	4.444	
24	1 1 2 2 4 1	51	24	8	20	Stadtwald Warstein	43	Plateau	0		mäßig frisch bis trocken	102	13	2,0 x 0,8	6.250		
25	2 4 5	51	24	8	19		75	Mittelhang	5-10 5-10 (8) 5-10	340 333 340	NNW	mäßig frisch bis trocken	114	12/13	2,0 x 0,8 und 1,2 x 0,8	6.250 und 10.417	
26	4 4 6 6 2	51	25	8	10	Forstamt Arnsberg	196	Mh/Rücken	7 5-10	50 320	NO NW	mäßig wechselfeucht	82	8	2,0 x 1,0	5.000	
27	1 2	51	25	8	10		199	Unterhang	8-10	322	NW	mäßig frisch bis trocken	82	8	2,0 x 1,0	5.000	
28	1	1				SBS Forstbezirk Neustadt	B212 a ⁶	Plateau	0-5		NNW	terrestrisch mittelfrisch	93	20	2,0 x 0,5	10.000	
29	1	1	50	51	14		08	B212 a ⁹	Mittelhang	5-25	332	NNW	terrestrisch frisch bis mittelfrisch	102	9	2,0 x 0,5	10.000
30	1	1	50	51	14		07	E401a ⁹	Mulde	/	/	/	terrestrisch frisch bis mittelfrisch	102	11	2,0 x 0,5	10.000
31	1 2	1 1	50 50	51 51	14 14		08 08	E402a ⁶	Mittelhang	7	110	OSO	terrestrisch mittelfrisch	97	10	2,0 x 0,5	10.000

Für die Buchen-Voranbauten existieren nur für die sächsischen Flächen Angaben zu den Herkünften. Das Saatgut entstammt bei den Flächen No. 28 und 31 von mecklenburg-vorpommerischen Beständen in Bansin bzw. Rostock-Rövershagen und bei den Flächen No. 29 und 30 aus der Sächsischen Schweiz (Lohmen bzw. Cunnersdorf und Lohmen). Für den aufstockenden Altbestand liegen ertragskundliche Kennwerte aus eigenen Aufnahmen in den Jahren 2004 und 2005 vor. Die Erfassungsmethoden sind in Kapitel drei detailliert beschrieben. Die Daten bildeten die Basis, die Bestände zu ertragskundliche Werte zu ermitteln und zu bonitieren.

Die folgende Übersicht enthält die genannten Informationen. Die Bonitierung ist nach der Oberhöhe vorgenommen. Das führt zwar dazu, dass der Bestand meist in eine niedrigere Ertrags- oder Leistungsklasse eingestuft wird als bei der Mittelhöhenbonitierung. Da die Höhe des Grundflächenmittelstammes jedoch bei Durchforstungen rechnerischen Verschiebungen unterliegt (ASSMANN 1961 S. 141, MITSCHERLICH 1970 S. 96, KRAMER 1988 S. 95, PRETZSCH 2002 S. 309), ist die hier verwendete Bonitierung nach der Grundflächenmittelhöhe der 100 stärksten Bäume als repräsentativer für die Verhältnisse im Bestand anzusehen (MITSCHERLICH 1970 S. 96). In der Übersicht wird ein Reduktionsfaktor KRAMER (1990) verwendet, der von 1,0 verschieden ist, wenn der Grundflächen-Bestockungsgrad nicht mit dem der jeweiligen Tafel konform geht.

Tabelle 2-3: Ertragskundliche Kennwerte und Bonitierung der Versuchsflächen³

Die Werte sind mit den Programmen BwinPro 6.2 (NAGEL et al. 2003) für die Versuchsflächen in NRW und im Programm BwinPro-S 6.3 (RÖHLE et al. 2007, Setup vom 25.01.2010) für die Versuchsflächen in SAX berechnet worden. Die Referenz-Ertragstabellen sind die von WIEDEMANN (1942, zit. n. DÖBBELER et al. 2003 S. 12f) für die Fichtenbestände in NRW und die von WENK et al. (1985, zit. n. DÖBBELER et al. 2007) nach dem M-System für die Fichtenbestände in SAX (DÖBBELER et al. 2007 S. 13). Der Anteil an Fichte beträgt in den Flächen 22 und 29 jeweils 0,99, in allen anderen Flächen 1,0. Der Grundflächen- und Volumenzuwachs bezieht sich jeweils auf einen Zeitraum von 5 Jahren. Fehlende Höhenwerte an lebenden Bäumen auf der Fläche werden für die Bestände in NRW mit der logarithmischen Funktion $h=b_0+b_1 \cdot \ln(d)$ (DÖBBELER et al. 2003 S. 71f, HANSEN & NAGEL 2014 S. 136f) und für die Bestände in SAX mit der Funktion nach MICHAJLOW $h = 1.3 + \exp(b_0 + b_1/d)$ (DÖBBELER et al. 2007 S. 73) geschätzt.

Versuchsfläche	Parzelle	Probefläche	Alter [a]	Bezugsfläche OST [ha]	Stammzahl [N/ha]	D _g [cm]	h _g [m]	G [m ² /ha]	Vfm/ha [m ³ Dh m.R.]	Efm/ha [m ³ Dh o.R.]	d ₁₀₀ [cm]	h ₁₀₀ [m]	EKL nach Oberhöhe	LKL dGZ 100 [m ³ /ha]	Fi-Anteil	G Tafel [m ² /ha]	B° (G/ha)	Red.	iG [m ² /ha*a]	iV [m ³ Dh m.R./ha*a]	
Versuchsflächen in Nordrhein-Westfalen, Wuchsbezirk "Nordsauerländer Oberland", Aufnahmejahr 2004																					
20	3	3	70	0,187	80	47,6	25,5	14,3	150,4	120,3	47,6	25,5	II.0	9,7	1,00	41,1	0,4	0,4	1,3	21,2	
	4	1		0,194	113	43,6	24,9	16,9	176,7	141,4	45,1	25,1	II.2	9,4	1,00	40,7	0,4	0,5	1,9	29,9	
	4	2		0,187	155	43,7	25,1	23,3	244,4	195,5	46,4	25,2	II.1	9,5	1,00	40,8	0,6	0,8	3,0	48,0	
21	12	1	82	0,189	292	41,7	26,8	39,8	455,2	364,2	47,2	27,8	II.1	9,5	1,00	42,5	0,9	1	3,3	53,1	
	10	2		0,186	285	41,6	26,7	38,7	440,5	352,4	49,7	28,1	II.0	9,7	1,00	42,8	0,9	1	3,3	53,5	
	5	3		0,168	167	46,1	27,4	27,9	318,6	254,9	50,0	27,9	II.1	9,5	1,00	42,5	0,7	0,9	3,0	47,9	
	4	4		0,191	110	48,3	27,2	20,1	225,4	180,3	49,1	27,3	II.2	9,2	1,00	41,9	0,5	0,7	2,2	34,2	
	4	5		0,181	248	42,2	25,8	34,8	380,2	304,1	49,1	26,8	II.3	9,0	1,00	41,4	0,8	1	3,1	49,5	
22	1		66	1,450	172	44,7	26,6	26,9	300,1	240,1	48,7	27,5	I.3	11,5	0,99	42,2	0,6	0,8	3,2	56,1	
	2																				
	3																				
23	1		74	0,998	303	39,8	27,9	37,7	455,3	364,3	46,7	28,4	I.6	10,8	1,00	43,6	0,9	1	3,8	64,3	
	2																				
24	1	1	102	0,410	361	44,5	31,7	56,2	758,3	606,6	53,8	33,3	I.5	10,9	1,00	45,6	1,2	1	2,9	51,3	
	1	2		0,164	110	48,3	27,2	20,1	225,4	180,3	50,5	33,5	I.5	11,0	1,00	45,8	0,8	1	2,7	49,3	
	2	2																			
25	2	2	114	0,172	423	43,5	31,4	62,9	848,2	678,6	53,3	33,6	I.9	10,1	1,00	43,3	1,5	1	2,4	42,6	
	4			1,120	170	45,8	33,1	27,9	392,7	314,1	51,0	34,3	I.6	10,6	1,00	44,3	0,6	0,8	2,0	35,6	
	5																				
26	4	1	82	0,090	389	39,6	30,5	47,8	636,5	509,2	47,6	32,0	I.0	12,2	1,00	46,9	1	1	3,8	66,4	
	4	2		0,090	333	39,6	30,5	41,1	548,8	439,1	47,3	32,4	0,9	12,4	1,00	47,2	0,9	1	3,8	67,6	
	6	1		0,205	259	40,0	29,4	32,6	417,8	334,3	47,5	32,5	1,2	11,9	1,00	46,3	0,7	0,9	3,3	58,2	
	6	2		0,204	294	40,4	30,1	37,8	494,1	395,2	47,1	31,2	1,2	11,6	1,00	46,0	0,8	1	3,5	60,4	
27	1		82	0,564	65	44,3	29,7	10,1	127,2	101,8	50,1	31,1	I.3	11,5	1,00	45,8	0,7	0,9	3,3	56,8	
	2																				
Versuchsflächen in Sachsen, Wuchsbezirk 4602 "obere sächsische Schweiz" Aufnahmejahr 2005																					
28	1	1	93	0,251	203	39,8	28,3	25,3	324,1	269,0	43,6	29,0	II.6	10,3	1,00	44,8	0,6	0,8	3,4	52,1	
29	1	1	102	0,529	295	41,4	28,3	39,7	506,0	420,0	48,7	30,1	II.7	10,0	0,99	45,4	0,9	1,0	3,7	60,0	
30	1	1	102	0,181	127	47,3	32,3	22,4	315,6	262,0	49,3	32,9	I.9	11,9	1,00	49,1	0,5	0,7	2,1	36,2	
31	1	1	97	0,201	179	45,5	32,7	29,0	416,8	345,9	49,4	33,5	I.5	12,9	1,00	49,8	0,6	0,8	2,5	44,5	
				2	0,200	80	47,3	33,0	14,1	201,7	167,4	47,3	33,0	I.7	12,5	1,00	49,3	0,3	0,4	1,1	18,5

³ Die Bonitierung im Programm BWinPro6.2 liefert dieselben Werte wie in der neueren Version Forest Simulator BWINPro Version 7.7.05 unter der Einstellung für die Modellregion Nordwestdeutschland BC4.

Die Bestände in beiden Untersuchungsgebieten haben gute bis sehr gute Wuchsleistungen – die relativen Bonitäten bewegen sich zwischen 0.9 bis II.3 in NRW und I.9 bis II.7 in SAX. Die absolute Leistungsstufe weist im Alter 100 für die Bestände in NRW Werte von 9,0 bis 12,4 Vfm Dh m.R./ha und in SAX von 10,0 bis 12,9 Vfm Dh m.R./ha aus. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die für NRW verwendete WIEDEMANN'sche Tafel im Gegensatz zur DDR-Fichtenertragstafel nicht mit unterschiedlichen Ertragsniveaus arbeitet und dass beide Tafeln ein bestimmtes Durchforstungskonzept unterstellen, das der mäßigen (Nieder-)Durchforstung in der WIEDEMANN'schen Tafel und das der gestaffelten Niederdurchforstung in der DDR-Fichtenertragstafel. Weiterhin ist die relative Bonität bzw. Ertragsklasse nicht nur von den großräumigen Niederschlags- und Wärmeverhältnissen abhängig, sondern auch von genetischen Faktoren, vom Standort, vom verfügbaren Standraum bei der Bestandesbegründung, vom Lokalklima, von der Exposition und der Bestandesbehandlung (MITSCHERLICH 1970 S. 97, KRAMER 1988 S. 119f). Insofern kann die Bonitierung nur grobe Richtwerte liefern. Anhand des Bestockungsgrades ist aber erkennbar, dass die Bestände im Vergleich zur jeweiligen Tafel unterschiedlich starke Eingriffe erfahren haben. Die Bestockungsgrade B° variieren in NRW von 0,4 bis 1,5 sehr, in SAX von 0,3 bis 0,9 weniger stark.

3 Methoden

3.1 Versuchsanlage, Versuchsdesign und Datenaufnahme

3.1.1 Festlegung und Datenaufnahme von Versuchsbeständen (Stufe I)

3.1.1.1 Versuchsanlage

Ausgehend von den formulierten Arbeitshypothesen soll die kleinflächige Umweltsituation für Einzelpflanzen im Voranbau konstruiert und mit Wachstums- sowie Qualitätsgrößen in Verbindung gebracht werden (Kap. 1). Dafür ist ein zweistufiges, geschachteltes Verfahren (split-plot-design) konzipiert worden (JEFFERS 1960, S. 13f, BÄTZ et al. 1972, S. 65f), mit dessen Hilfe Aussagen zu Qualität und/oder Wachstum sowohl

- für die Morphologie im Buchen-Voranbau (Stufe I, Abschnitt 4.1) als auch
- für Einzelmerkmale von Buchen (Stufe II, Abschnitt 4.2) möglich sind.

Die nachstehende Übersicht für die Stufe I zeigt, wie die Versuchsflächen den systematisch variierten Prüffaktoren Bundesland, Standzeit in Jahren und Pflanzenverteilung/Pflanzendichte der Voranbauten zugeordnet sind. Innerhalb der engen und regelmäßig bepflanzten Voranbauten wird zusätzlich die Überschildung über der gesamten Probefläche systematisch variiert (BÄTZ et al. 1972, S. 21).

Tabelle 3-1: Schema der Versuchsanlage (Stufe I) mit Zuordnung der Versuchsdesigns

		Bundesland						
		Nordrhein-Westfalen (NRW)			Sachsen (SAX)			
		Altersstufe in Jahren			Altersstufe in Jahren			
Bepflanzung	Über-schirmung	5 – 10	11 – 15	16 – 20	5 – 10	11 – 15	16 – 20	
		eng und regelmäßig	räumdig			20_4.1 21_4.4	30_1.1	
licht-locker	26_4.1 26_4.2		24_1.1 24_1.2 24_2.1	20_3.3 21_5.3 21_4.5			28_1.1	
geschlossen-gedrängt	26_6.1 26_6.2		24_4.1 25_2.2	20_4.2 21_12.1 21_10.2		31_1.2		
weit und regelmäßig oder ungleichmäßig		27_1 27_2	25_4 25_5	22_1 22_2 22_3 23_1 23_2	29_1			Versuchs-design II

Die Zellen der Übersicht enthalten Ziffernfolgen für die Probeflächen nach folgendem Schema:
 Versuchsfläche_Parzelle.Probefläche.

Dieses Tableau entspricht einem dreifaktoriellen Versuch und die abgestufte Überschirmung kann als teilweise Spaltanlage aufgefasst werden. Da nicht alle Faktorstufenkombinationen des Schemas belegt sind, wird es als nichtorthogonal bezeichnet (BÄTZ et al. 1972, S. 146ff). Das für einen Versuch bindende *ceteris-paribus*-Prinzip hält Einflussfaktoren, die nicht geprüft werden sollen, konstant (BÄTZ et al. 1972, S. 21). Es handelt sich dabei um Auswahlkriterien für Bestände, die a priori festgelegt worden sind (vgl. Kapitel 2). Auf den so ausgewählten Flächen kommen unterschiedliche Versuchsdesigns zum Einsatz, die an die Situation der jeweiligen Bestände angepasst sind.

- Das Versuchsdesign I arbeitet mit rechteckigen Probeflächen (SCHRÖDER 2004 S. 29f, MÜNDELER 2005 S. 8) und
- das Versuchsdesign II mit Probekreisen, die im Gitternetz über die Fläche gelegt werden (WEIDIG 2016 S. 31f).

Alle Buchen, die in Probeflächen/Probekreisen liegen, bilden die Basis für die Auswahl von Einzelbäumen der Stufe II der Versuchsanlage (vgl. Abschnitt 3.1.2).

3.1.1.2 Versuchsdesign

Bei den Versuchsdesigns handelt es sich um Stichprobenverfahren, mit deren Hilfe die Probeflächen auf den vorausgewählten Versuchsflächen ermittelt werden.

Dabei werden die

- stratifizierte Auswahl (stratified sampling) (LOETSCH & HALLER 1964 S. 115ff) und
- die systematische Stichprobe (systematic sampling) (LOETSCH & HALLER 1964 S. 163, ZÖHRER 1980 S. 66ff)

verwendet. Die Vorbedingung für eine stratifizierte Stichprobe sind hinsichtlich eines Einflussfaktors in sich homogene, klar abgrenzbare Flächeneinheiten, die sich untereinander stark unterscheiden (ZÖHRER 1980 S. 66ff). Die systematische Stichprobe ist in der Lage, die Verhältnisse auf räumlich heterogenen Flächen effektiv zu erfassen. Dadurch wird eine hohe Streubreite und Bandbreite an Kombinationen der unabhängigen Größen Überschildung und Standraum mit ihrer Wirkung auf die Qualitätsentwicklung erzielt (ZÖHRER 1980 S. 74ff).

Schlussendlich ist die Wahl der Versuchsdesigns in dieser Arbeit auf unterschiedliche Bestandessituationen hinsichtlich der Pflanzenverteilung und -dichte abgestimmt (vgl. Tabelle 2-2). In der vorliegenden Untersuchung dienen folgende, hierarchisch gegliederte Kriterien dazu, gefundenen Versuchsbeständen entsprechend dem Standraum der jungen Buchen und seiner Variation auf der Fläche das passende Versuchsdesign zuzuordnen:

- 1) Der Voranbau ist hinsichtlich des Standraums homogen. Es sind erkennbare Reihenstrukturen bzw. ein erkennbarer Dreiecksverband vorhanden.
 - a) Der Pflanzverband ist hinreichend eng, sodass die Probefläche eine ausreichende Anzahl an Probebuchen beinhaltet und gleichzeitig bei einer verhältnismäßig geringen Ausdehnung einheitliche Überschirmungsverhältnisse gewährleistet sind.
 - i) Im Voranbau kommen kaum natürlich verjüngte Baumarten vor. Es dominiert die intraspezifische Konkurrenz unter den Probebuchen.
→ **Versuchsdesign I**
 - ii) Der Voranbau ist an vielen Stellen mit anderen Baumarten aus Naturverjüngung vermischt. Eine ausreichend große Probefläche, die solche interspezifische Konkurrenz ausschließt, kann nicht etabliert werden. → **Versuchsdesign II**
 - b) Der Pflanzverband ist so weit, dass eine Probefläche mit einer notwendigen Anzahl an Probebuchen eine so große Flächenausdehnung annimmt, dass die Überschirmungsverhältnisse darüber nicht mehr als einheitlich angesehen werden können. → **Versuchsdesign II**
- 2) Die Voranbaufläche ist nicht regelmäßig mit Buchen bepflanzt. Es gibt Teilbereiche mit niedriger Dichte und Flächenausschnitte ohne Buchenbestockung. Die Fläche ist von solchen Bereichen mehrfach durchzogen. Ausreichend große, in sich homogene Probeflächen können nicht angelegt werden. → **Versuchsdesign II**

In der folgenden Übersicht sind die Verfahrensstufen des Versuchsdesigns gegenübergestellt. Neben Informationen zur Gestaltung des Stichprobendesigns sind auch überblicksartig gruppiert die jeweils erhobenen Parameter angegeben. Das Vorgehen, wie die Einzelbuchen der Stufe II ausgewählt worden sind, wird in Abschnitt 3.1.2 besprochen. Einzelheiten zu den Probeflächengrößen, zum Probekreisraster und zur Anzahl der Plots enthält Tabelle 16-1 im Anhang.

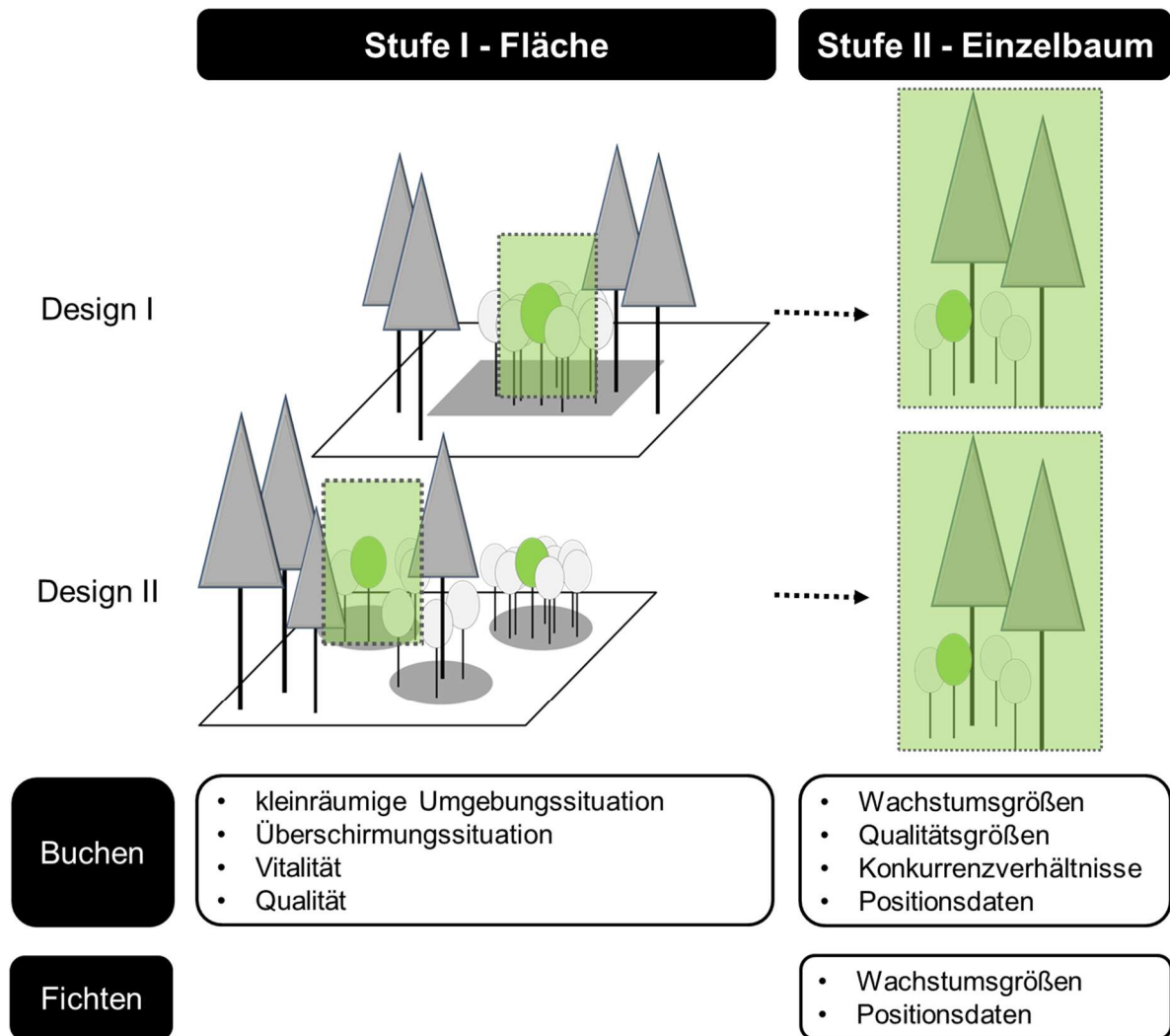


Abbildung 3-1: Darstellung der geschachtelten Versuchsanlage nach Versuchsdesigns mit Angabe der gemessenen Merkmale getrennt für den Buchen-Voranbau und den Fichten-Altbestand.

Unabhängig von der Wahl des Versuchsdesigns soll für die Auswertung der Einzelbaumdaten in Stufe II der Einfluss des Altbestandes räumlich möglichst vollständig abgebildet und Randeffekte vermieden werden. Aus diesem Grund ist es nicht ausreichend, nur Fichten auf der Probefläche bzw. den Probekreisen zu erfassen. Vielmehr ist ein Umfassungstreifen notwendig, der in Anhalt an SCHRÖDER (2004 S. 30) und MÜNDER (2005 S. 9) auf 15m festgesetzt ist. Beide haben um ihre Intensivmessfelder im Buchen-Voranbau einen solch breiten Streifen eingemessen, auf dem alle Bäume des Oberstandes erfasst sind. Diese Breite leiten sie von der halben Oberhöhe des Fichten- bzw. Kiefernaltbestandes ab.

Ökologie, Bodenordnung und Forsten LÖBF, Zweigstelle Arnsberg heute „Schwerpunktaufgabe Waldbau und Forstvermehrungsgut“ des Lehr- und Versuchsforstamtes Arnsberger Wald von Wald und Holz NRW.

Die rechteckigen Probeflächen im Buchen-Voranbau sind mit eingemordetem Theodolit und Rollmaßband auf 0,5 Gon und 1 cm genau eingemessen. Dabei liegen zwei Seiten des Rechtecks parallel zu den Pflanzreihen und in der Mitte zwischen erster Probeflächenpflanzreihe und erster Außenreihe. Die Außenreihe bezeichnet hierbei die erste Buchenreihe, die sich nicht in der Probefläche befindet. Eine solche Probefläche wird im Folgenden auch als Kernfläche bezeichnet. Sie gleicht den Intensivmessfeldern, die SCHRÖDER (2004 S. 30) und MÜNDER (2005 S. 8) in Buchenvoranbauten ausscheiden. Die Grenzlinien ihrer Intensivmessfelder orientieren sich jedoch nicht an der Reihenstruktur des Voranbaus. Alle Buchen auf der so ausgeschiedenen Fläche zählen zum Kollektiv der Probanden, das durch eine kombinierte Nummer von Reihe und Baum identifizierbar ist. Die Kernfläche ist in einigen Fällen in regelmäßige Subflächen unterteilt, die gleich bei der Einmessung mit angelegt worden sind. Fehlt diese Einmessung, so sind im Nachgang anhand von groben Lageplänen der Probebuchen, die während der Aufnahme gemacht worden sind, gedachte Subflächen in die Kernflächen projiziert. In der Fläche 2641 und 2642 sind anhand der von der LÖBF gemessenen Stammfußkoordinaten die Subflächen rechnerisch hergeleitet. Die folgende Abbildung vermittelt einen Eindruck von der Kern- und Rahmenfläche, die zusammen die Gesamtfläche bilden.

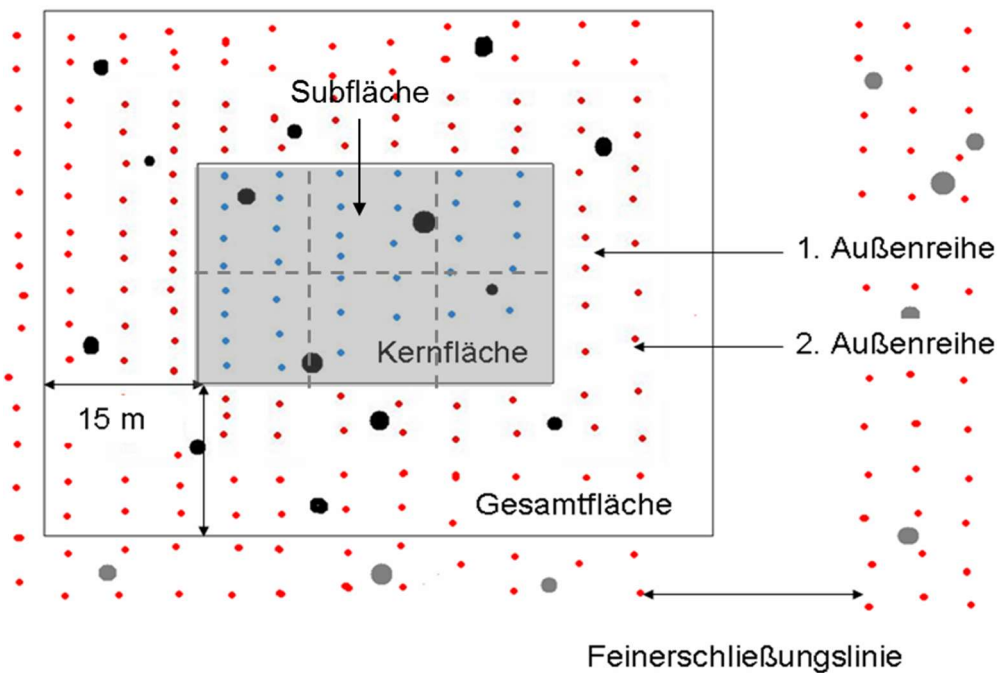


Abbildung 3-2: Probeflächenanlage nach Versuchsdesign I

Beispielfoto Versuchsfläche 20 (oben), schematische Grafik (unten): schwarze Punkte: beprobter Altbestand; graue Punkte: nicht aufgenommene Altfichten; blaue Punkte: Probanden-Kollektiv der Voranbau-Buchen auf der Kernfläche; rote Punkte: nicht aufgenommene Buchen-Pflanzreihen; Außenreihen im Voranbau bezogen auf eine nicht bepflanzte Feinerschließungslinie (Rückegasse) im Bestand

Versuchsdesign II – Anlage eines Probekreistrasters im Voranbau

In Beständen mit inhomogenen Verhältnissen ist ein systematisches Raster an Probekreisen etabliert worden (LOETSCH & HALLER 1964 S. 163, ZÖHRER 1980 S. 74ff, WEIDIG 2016 S. 31f). Dieses Raster verwendet eine Startlinie, von welcher aus in regelmäßigem Abstand im gleichen Abgangswinkel gedachte, parallel verlaufende Transektlinien eingemessen werden. Wiederum sind auf diesen Transekten die Mittelpunkte der Probekreise im gleichen Abstand zueinander platziert und markiert. In dieser Arbeit beträgt das Raster entweder 6 x 7, 6 x 8 oder 7 x 10 Meter. Um einseitige, verzerrte Daten zu vermeiden, wie sie bei systematischen Rastern vorkommen können, liegt in dieser Arbeit die Strategie von ZÖHRER (1980 S. 79) zugrunde. Dabei sind die Plots (Probekreise) zweier benachbarter Transekte um die Hälfte des Probekreisabstandes, also 3m bzw. 3,5m, versetzt platziert. Es ergibt sich deshalb eine Dreiecksverteilung (ZÖHRER 1980 S. 79). Mit Hilfe von Kompass, Fluchtstange und Maßschnur von 6m Länge sind die Probekreismittelpunkte auf 1 Grad und 1cm genau eingemessen und mit Transekt- und Plotnummer eindeutig markiert worden. Die Positionen der Probekreismittelpunkte sind Ungenauigkeiten unterworfen, die aus Peilungsfehlern mit dem Kompass resultieren. Eine genauere Variante, die Einmessung mit einem Theodolit, scheidet jedoch wegen der nicht vorhandenen Sicht wegen des Buchenunterstandes aus. Mit fortschreitender technischer Entwicklung ist es mittlerweile auch möglich, mit Hilfe von GPS-gestützten Positionsdaten auf ähnlich gearteten Flächen die Probekreismittelpunkte mit hinreichender Genauigkeit festzulegen (WEIDIG 2016 S. 148ff). Der Plotradius in dieser Arbeit beträgt in Anhalt an OTT (2003 S. 19) und eigene Voruntersuchungen (WAGNER & LEONHARDT 2004 S. 12) auf 2,52 m festgesetzt, sodass die Kreisfläche eines Plots 19,95 m² beträgt. Der verwendete Radius bewegt sich damit in dem Rahmen, den PRETZSCH (2002 S. 104) für Verjüngungserhebungen als geeignet ansieht. Um die Plotgrenze exakt festzulegen, ist im Anhalt an (LOETSCH et al. 1973 S. 319) mit Hilfe einer Fluchtstange, die in den Plotmittelpunkt gesteckt wird, und einer daran befestigten Schnur der Länge 2,52 m gearbeitet worden. Alle Buchen, deren Stammfußpunkt sich innerhalb des Radius' befinden, zählen zum Probandenkollektiv und sind eindeutig mit hierarchisch aufgebauten Ordnungsnummern (Parzelle-Transekt-Plot-Baumnummer) durch Schlaufenetiketten bezeichnet.

Der aufzunehmende Fichten-Altbestand definiert sich aus derjenigen Flächenausdehnung, die sich aus den Probekreismitelpunkten, die sich an den Transektlinienrändern befinden, herleitet. Diese Punkte markieren die Aufhängung für das Einmessen der 15m breiten Rahmenfläche. Alle in dieser so festgelegten Gesamtfläche befindlichen Bäume des Oberstandes gehören zum Aufnahmekollektiv. Die folgende Abbildung zeigt schematisch eine Fläche mit Probekreisraster und Rahmenfläche für den Altbestand.

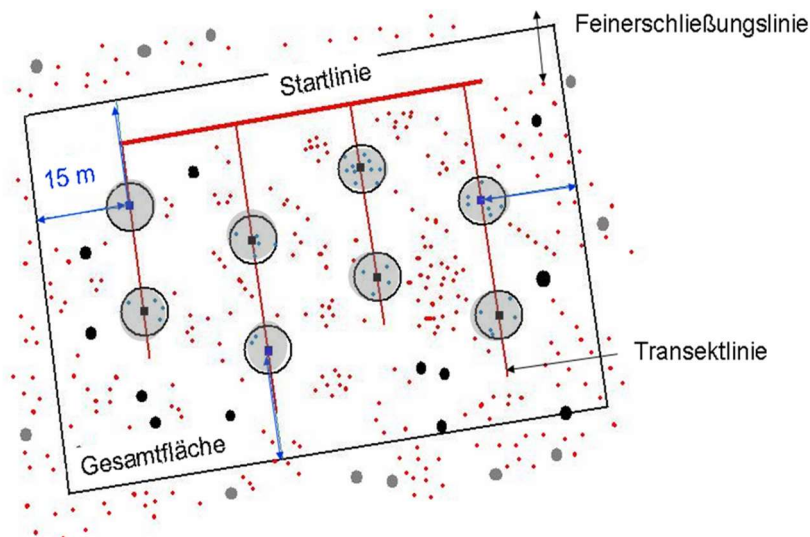


Abbildung 3-3: Anlage eines Probekreisrasters nach Versuchsdesign II

Beispielfoto Versuchsfläche 23 (oben), schematische Grafik (unten): schwarze Punkte: beprobter Altbestand; graue Punkte: nicht aufgenommene Altfichten; blaue Punkte: Probanden-Kollektiv der Voranbau-Buchen auf den Plots; rote Punkte: nicht aufgenommene Buchen; schwarz-eckig: Plotmittelpunkt; blau-eckig: Randplot als Bezugspunkt für Umfassungstreifen; Feinerschließungslinie (Rückegasse) nicht bepflanzt

3.1.1.3 Datenerhebung und Zustandserfassung auf den Versuchsflächen

Datenerhebung an den Bäumen im Oberstand

Der Altbestand ist auf der Gesamtfläche aufgenommen worden (vgl. voriger Abschnitt). Die folgende Übersicht bietet zunächst einen Überblick über die im Oberstand erhobenen Größen und die zur Erhebung verwendeten Messgeräte mit der jeweiligen Messgenauigkeit:

Tabelle 3-2: Aufnahmegrößen für den Altbestand

Messobjekt	Messgröße	Messgenauigkeit	Messinstrument
Versuchsfläche	Inklination	5°	Spiegelkompass
	Deklination	5°	RECTA BLUME-LEISS
Eckpunkte Probeflächen, Eckpunkte Umfassungstreifen, Transektlinien, Position von Bäumen Position von Stubben	Horizontalwinkel	0,5gon	Theodolit
	Distanz	0,1m	VERTEX, Transponder
Stubben	Baumart		
	Erntejahr		
	Stockdurchmesser	0,5cm	Kluppe
Bäume	Baumart		
	Vitalität		
	Brusthöhendurchmesser	1mm	Umfangmaßband
	Höhe	0,1m	VERTEX, Transponder
	Kronenansatzhöhe	0,1m	VERTEX, Transponder

Neben Deklination und Inklination der Gesamtfläche liegen Daten für die Stammverteilung aller aufstockenden Fichten und anderen Baumarten im Oberstand vor. Das Aufnahmekollektiv setzt sich sowohl aus lebenden Bäumen als auch abgestorbenen Käferbäumen und Stubben bis zu einem Alter von 10 Jahren zusammen. Mit Hilfe eines eingenordeten Theodoliten und dem Höhen- und Abstandsmessgerät VERTEX, welches mit Sender und Transponder auf Infrarotbasis arbeitet, sind im Polygonzugverfahren die Polarkoordinaten der Bäume bzw. Stubben sowie die Eckpunkte der rechteckigen Probeflächen (Kernflächen, siehe Abschnitt 3.1.1.2) und die Transektlinien (Probekreisrasterflächen, a.a.O.) erhoben worden. Der Messbezugspunkt für die Distanzmessungen liegt am Stamm bei 1,3m in Brusthöhe; auch bei Stubben ist dies berücksichtigt. Die die Distanzmesswerte sind im Nachgang um die

Hangneigung korrigiert worden. Die Durchmesserwerte von Stubben sind gemittelte Werte von am Schnittbild kreuzgekluppten Durchmessern. Bei allen noch stehenden Bäumen sind der Brusthöhendurchmesser, die Höhe und die Kronenansatzhöhe aufgenommen worden, dessen Krone nicht durch andere Bäume verdeckt ist. Die Kronenansatzhöhe definiert sich als Untergrenze der Lichtkrone, wobei der erste Quirl mit drei grünen Ästen als Grenze angesetzt wird (DÖBBELER ET AL. 2003 S. 75).

Datenerhebung in den Buchenvoranbauten

Das Kollektiv der aufzunehmenden Buchen setzt sich aus allen Individuen innerhalb der Kernflächen und allen Bäumen innerhalb der Probekreise zusammen (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Die folgende Übersicht enthält die Aufnahmegrößen inhaltlich gruppiert, die Bezugsobjekte und die jeweilige Datenskala (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 21f).

Tabelle 3-3: Aufnahmegrößen an den Probe-Buchen im Voranbau

Aufnahmeparameter	Bezugsobjekt	Datenskala
Charakterisierung der kleinräumigen Umgebungssituation		
Überschirmung durch den Oberstand	Einzelbuche	kategorial – ordinal
Anzahl an vorhandenen Buchen	Probefläche, Probekreis	metrisch
Anzahl an ausgefallenen Buchen	Probefläche (Flächen 20+21)	metrisch
Standraumveränderungen	Einzelbuche	kategorial – ordinal
interspezifische Konkurrenzsituation in der Verjüngungsschicht	Einzelbuche	kategorial – nominal
Vitalitätszustand		
Vitalität	Einzelbuche	kategorial – ordinal
Schädigungen	Einzelbuche	kategorial – nominal*
Wuchsform	Einzelbuche	kategorial-ordinal
Höhenklasse	Einzelbuche	kategorial-ordinal
soziologische Stellung	Einzelbuche	kategorial-ordinal
Qualität		
Kronenform	Einzelbuche	kategorial-ordinal
Stammform	Einzelbuche	kategorial-ordinal

Charakterisierung der kleinräumigen Umgebungssituation der Probebuchen

Die Einschätzung der kleinräumigen Umgebungssituation für jede Probebuche zielt zunächst hauptsächlich darauf ab, in der Summe eine Variationsbreite der Einflussgrößen Überschirmung und Standraum zu erhalten. Wenn die Hypothesen der Untersuchung lauten, dass die Qualität als abhängige Responsegröße von den unabhängigen Effektgrößen Überschirmung (Arbeitshypothese 1) und Standraum (Arbeitshypothese 2) maßgeblich beeinflusst wird, muss die Kontinuität dieser Effektgrößen gewährleistet sein. Deshalb ist es wichtig, für jede Probe-Buche einzuschätzen, ob sich die kleinräumige Situation der Umweltbedingungen abrupt geändert hat (Standraumveränderungen) oder allmählich überprägt worden ist (interspezifische Konkurrenz im Voranbau). Wenn die kleinräumige Umgebungssituation jeder Probebuche gründlich erfasst wird, bestehen anschließend Möglichkeiten, bei der Modellkonstruktion das Auswertungskollektiv um solche Buchen zu bereinigen, deren Umgebungsbedingungen sich kurzfristig geändert haben.

Überschirmung durch den Oberstand

Für die Modellbildung, in der die einzelbaumbezogene Qualität als abhängige Variable später ausgewertet werden soll, sind Konkurrenzwerte des Oberstandes von Interesse, die für jede Einzelbuche separat angesprochen werden. Insofern sind flächige Werte wie der bestandesbezogene Kronenschlussgrad (BURSCHEL & HUSS 2003 S. 76) dazu nicht geeignet. Vielmehr hat jede Buchen-Verjüngungspflanze eine Einschätzung erhalten, wie stark der direkt über der Pflanze befindliche Himmelsausschnitt von Fichtenaltbäumen überschirmt wird. Der räumlich betrachtete Teil ist vergleichbar mit einem Lichtschacht über einer Einzelbuche. In der vorliegenden Untersuchung wird deshalb trefflicher von „Altbaumnähe“ gesprochen. Zweckmäßiger Weise ist die Variable „Altbaumnähe“ dreifach gestuft. Die folgende Übersicht gibt Aufschluss darüber, wie diese Altbaumnähe verstanden werden kann und wie sich die einzelnen Stufen voneinander abgrenzen:

Tabelle 3-4: Charakterisierung der kleinräumigen Überschirmungsverhältnisse: Altbaumnähe

Stufenzuordnung	Stufenbezeichnung	Beschreibung des Aufnahmemerkmals „Altbaumnähe“
1	ohne Überschirmung	direkt über der Buche freier Himmelsraum
2	geringfügig überschirmt	über der Buche Lücke im Kronendach von bis zu einer Kronenbreite
3	direkt überschirmt	über der Buche Berühren oder tiefes Ineinandergreifen der Zweige bzw. unmittelbare Schirmstellung einer Fichte

Zur Veranschaulichung des Index' der Altbaumnähe sind exemplarisch hemisphärische Fotos gezeigt, die den Himmelsausschnitt im 90° Zenitwinkel direkt über einer Verjüngungspflanze abbilden und die den einzelnen Stufen der Altbaumnähe zugeordnet sind.



Abbildung 3-4: Charakterisierung der Variable „Altbaumnähe“ als kleinräumige Überschirmungssituation für eine Einzelbuche anhand hemisphärischer Fotos.

Der bei der Altbaumnähe betrachtete Himmelsausschnitt ist im gutachterlich eingezeichneten blauen Kreis enthalten. ©Blaschkewitz 2004, aufgenommen mit einer Nikon®-Kamera, ausgestattet mit einem Canon® Fisheye-Objektiv auf niedrigempfindliche, hochauflösende Schwarzweiß-Filme der Marke AGFA®, Typ ORTHO 25.

Ein ähnliches kategoriales Maß zur Einschätzung der Strahlungssituation über einer Verjüngungspflanze ist der crown illumination index CII, der mit einer Einteilung nach direktem vertikalen und/oder lateralem direkten Licht arbeitet (KEELING & PHILLIPS 2007).

*Anzahl an vorhandenen und ausgefallenen Buchen –
Herleitung der Standraum-werte*

Für jede Kernfläche und jeden Probekreis wird durch die Ansprache jeder Buche mit einzelnen Aufnahmemerkmalen auch ihre Anzahl erfasst. Dies geschieht unabhängig von ihrem Vitalitätszustand, sodass sowohl lebende als auch absterbende, tote und vollkommen zerstörte Bäume als Probanden gelten (vgl. Abschnitt Vitalität). Dieses Vorgehen hat zum Ziel, möglichst nahe an die Pflanzenzahlen zu kommen, die bei Begründung der Buchenkulturen auf die Flächen gepflanzt worden waren. In jungen Voranbauten, in denen noch keine Mortalität stattgefunden hat, entspricht die Summe aus lebenden, toten, absterbenden und zerstörten Buchen dieser Begründungspflanzenzahl. Anders verhält es sich in Voranbauten, die bereits eine längere Standzeit aufweisen und mit höheren Pflanzenzahlen begründet worden sind. Hier haben durch den seit längerer Zeit eingetretenen Dichtschluss bereits intensive Mortalitätsprozesse stattgefunden, sodass unklar ist, ob sich abgestorbene Bäume nicht bereits vollkommen zersetzt haben. Deswegen ist in diesen Kunstverjüngungen versucht worden, die Anzahl an ausgefallenen Pflanzen zu rekonstruieren. Die Voraussetzung dafür ist eine deutlich erkennbare regelmäßige Bepflanzung im Verband, worin offensichtliche Fehlstellen innerhalb einer Pflanzreihe leicht anhand der vollständigen Nachbarreihen auszumachen sind. Für alle von dieser Voraussetzung abweichenden Voranbauten ist eine Rekonstruktion der Ursprungspflanzenzahl nicht möglich. Beispielsweise können für Buchenflächen, die nach dem Probekreisraster aufgenommen sind, Fehlstellen in der Pflanzfläche nicht eindeutig als Ausfälle identifiziert werden. Es hätte sich genauso gut um nicht bepflanzte Bereiche handeln können, die z. B. durch das Vorhandensein starker Wurzeln, größerer Steine oder Reisiganhäufungen von vornherein freigelassen worden waren. Auch die Orientierung an benachbarten Reihen ist wegen der inhomogenen Befpflanzung nicht möglich.

Für die Auswertung bildet die Gesamtzahl an Buchen die Basis, um Standraumwerte und Dichtewerte anhand der Flächengrößen der Kernflächen und der Plots rechnerisch herzuleiten. Die nachstehenden Formeln zeigen die Berechnung beider Größen entsprechend RÖHRIG et al. (2006 S. 174).

$$\text{Stdr}[m^2] = \frac{A[m^2]}{n_{Bu}}$$
$$D \left[\frac{1}{m^2} \right] = \frac{n_{Bu}}{A[m^2]}$$

Formel 3-1: Beziehung zwischen Pflanzzahl, Fläche und Standraum

Es bedeuten A die Flächengröße einer Kernfläche oder eines Plots, n_{Bu} die Gesamtzahl an gepflanzten Buchen, Stdr der mittlere Standraum und D die Dichte an Buchen auf der Bezugsfläche. Die Übersicht 16-1 im Anhang enthält diese Informationen für die einzelnen Flächen.

Die beiden raumbezogenen Größen Standraum und Pflanzdichte drücken aus, dass die Konkurrenzwirkung im Voranbau um Wuchsraum besteht und somit auf Ressourcen gerichtet ist (BEGON et al. 1991 S. 211ff). WENK et al. (1990 S. 207) und ASSMANN (1961 S. 99) definieren den Begriff „Standraum“ als räumliches Pendant zur Standfläche. Es entspricht nach WENK et al. (1990 S. 207) dem nicht von Baumkronen ausgefüllten Raum, der auf die Baumnachbarn aufgeteilt wird. Deswegen wird im Folgenden vereinfachend von *Standraum* gesprochen, obwohl es sich um eine zwei- und nicht dreidimensionale Größe handelt.

Standraumveränderungen

Der Begriff „Standraumveränderung“ beinhaltet, inwieweit sich der Standraum einer Buche, der mit ihrer Pflanzung im Pflanzverband „festgesetzt“ wird, im Nachhinein verändert hat (WEIDIG 2016 S. 15). Dabei ist von entscheidender Bedeutung, ob die Reste der benachbarten, aber abgestorbenen Buchen im Voranbau noch auffindbar sind. Es handelt sich also um Veränderungen, die in einen Zeitraum bis ca. 10 Jahre vor der Datenerhebung zurückreichen. Solche Situationen treten auf den Flächen dann auf, wenn entweder durch Windwurf bzw. Schneebruch oder durch Hiebsmaßnahmen im Altbestand Fällungsschäden in der Verjüngung entstanden sind. Im Zuge dieser Ernteeingriffe war es auch in vereinzelt Fällen nötig geworden, aus erntetechnischen und forsttechnischen Gesichtspunkten heraus blind endende Stichgassen in die bepflanzte Fläche hinein anzulegen, um das Holz nach Würfeln oder Brüchen vorzuliefern. Nachträglich sind Veränderungen auf der Fläche durch noch liegendes Kronenmaterial von Altfichten, liegende Ganzbäume und anhand von Wurzelstöcken zu erkennen. Im Voranbau sind Standraumveränderungen durch abgebrochene oder stark schräg stehende Buchen ohne Nachbar sowie durch abgebrochene Buchen-Äste und Rindenverletzungen an den jungen Bäumen auszumachen. Während der Datenaufnahme wurde für jede Buche vermerkt, ob

sich die ursprünglichen Standraumverhältnisse nachträglich veränderten oder nicht. Nur im letzteren Fall gelangen sie als Probanden in die Auswertung.

Interspezifische Konkurrenzsituation

Den kleinräumig teilweise hohen Mischungsanteilen anderer Baumarten in der Verjüngung wird insofern Rechnung getragen, als dass für jede Buche die interspezifische Konkurrenzsituation erfasst wird. Die nachstehende Liste enthält die vorgefundenen Arten und ihre wissenschaftliche Bezeichnung:

- Gemeine Eberesche Sorbus aucuparia, [L.],
- Bergahorn Acer pseudoplatanus [L.],
- mitteleuropäische Birkenarten Betula pendula [ROTH.] bzw.
Betula pubescens [ERH.],
- Weiden
zumeist Salweide Salix spec. [L.],
Salix caprea [L.],
- Eichen Quercus robur [L.] bzw.
Quercus petraea [(MATT.) LIEBL.],
- Gemeine Fichte Picea abies [KARST. (L.)],
- Weißtanne Abies alba [MILL.] und
- Stechpalme Ilex aquifolium [L.].

Außerdem fand sich teilweise wuchernde Bodenvegetation in Form von Brombeere *Rubus fruticosus agg.*

Im Sinne dieser Arbeit wird die Grenze, ab wann von interspezifischer Konkurrenz gesprochen wird, nicht mit Hilfe eines Konkurrenzindex‘ sondern gutachterlich eingeschätzt. Bereits dann, wenn sich die Zweige von Buche und anderer Verjüngungsbaumart gegenseitig seitlich berühren oder wenn die andere Baumart beginnt, von unten in die Krone der Buche zu wachsen, steht letztere in interspezifischer Konkurrenz. Die vorliegende Untersuchung wertet nur Buchen aus, die in innerartlichem Wettbewerb zueinander stehen.

Untersuchung des Vitalitätszustandes der Probebuchen

Für die Qualitätsholzerziehung ist es entscheidend, dass die Bäume, die in Zukunft werthaltige Stammteile enthalten sollen, von Beginn an gesund und unbeschädigt sind sowie einen guten allgemeinen Vitalitätszustand aufweisen. Je nach Überschirmungsintensität und Dichtstand im Voranbau kann sich unter hohem Konkurrenzdruck durch den Fichtenaltbestand der Habitus der schattenertragenden Buchen verändern (WAGNER et al. 2010). Innerartliche Konkurrenz ist bei der Qualitätsholzerziehung gewünscht, sie soll den Effekt erzielen, in Dickungen eine schnelle Astreinigung herbeizuführen (MOSANDL et al. 1988, SPIECKER 2007). Dies geht auch mit Absterbeprozessen im Voranbau und mit Veränderungen im soziologischen Gefüge der Buchen untereinander einher (KURTH 1946 S. 603ff). Selbst wenn immer wieder von Umsetzungsvorgängen berichtet wird, wonach auch zunächst vitale Bestandesmitglieder in untere soziologische Klassen wie „beherrscht“ und „unterdrückt“ abrutschen (LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 338), besteht für von vornherein vitale Bäume im Voranbau eine höhere Wahrscheinlichkeit, in der Jungbestandesphase wuchskräftig zu sein. Aus diesem Grund werden die Probebuchen nach ihrem Vitalitätszustand ausgewählt.

Vitalität

Die Vitalität bringt ganz allgemein zum Ausdruck, ob eine Buche wuchskräftig ist. Wenn eingeschätzt werden soll, ob ein Bestandesmitglied vital ist, bestehen etliche Möglichkeiten, wie fein der Maßstab dafür gewählt werden soll. Im botanischen Sinn können z.B. Triebblängen rückgemessen, Kurztriebe gezählt (ROLOFF 1986 S. 66 und S. 82f) oder die lebende bzw. abgestorbene Biomasse von ganzen Bäumen oder von Kronenteilen mittels Trockengewichtsermittlung bestimmt und verglichen werden (AMMER 2000 S. 39, PETRIȚAN et al. 2010). In der vorliegenden Untersuchung wird eine grobe Einteilung verwendet, die ohne technische Hilfsmittel arbeitet und nur den Gesamtzustand beurteilt. Insofern wird davon ausgegangen, dass vitale Bestandesglieder bis auf die natürliche Astreinigung keine sichtbaren sonstigen Absterbeerscheinungen aufweisen, unabhängig von kleineren Schäden (vgl. „Schädigung“). Bäume mit bereits absterbenden Zweigen im Lichtkronenbereich, fehlender Belaubung oder absterbenden oberen Kronenteilen bei aber noch lebendem Kambium gelten als nicht vital. Komplet abgestorbene Individuen werden als tot bezeichnet. Eine gesonderte Kategorie bilden die Buchen, die abrupt zerstört worden sind, insbesondere durch

Kronenteile gefällter Fichten des Oberstandes. Insofern werden in der vorliegenden Untersuchung nur lebende, unzerstörte Buchen ausgewertet.

Schädigungen

Die Vitalität einer Probebuche wird zwar von ihrer allgemeinen Wuchskraft hergeleitet, die ihrerseits aber durch Schädigungen beeinflusst werden kann. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Schäden bei der Inventur mit zu erfassen. Beachtet werden muss dabei, dass im vorangehenden Abschnitt als lebend bezeichnete Buchen durchaus Schäden aufweisen können. Eine Buche ist im Sinne dieser Arbeit geschädigt, wenn sie Fege- oder Nageschäden durch Rehwild oder Kurzschwanzmäuse *Microtidae* aufweist, wenn sie von Spechten geringelt wird⁴ Die Schäden durch weiße, wachswollbedeckte Läuse der Gattung *Coccoidea* traten nicht wie bei ALTENKIRCH et al. (2002 S. 294) beschrieben, am Stamm, sondern an den Blattunterseiten auf. Es wird angenommen, dass es sich trotzdem um die Buchenwollschildlaus *Cryptococcus fagisuga* handelt, die als Saftsauger leben. Verbissene Buchen sind im Sinne dieser Arbeit als solche klassifiziert, wenn Seiten- und/oder Terminaltriebe verbissen sind, unabhängig vom Verursacher. Nur Buchen, die ohne Schädigungen aufgenommen worden sind, fließen in die spätere Auswertung ein.

Wuchsrichtung der Sprossachse

Junge Buchen zeigen in Bezug auf das Strahlungsangebot eine Wachstumsreaktion, die sich unter anderem in der Wuchsform widerspiegelt. Bei einer Überschildung, die geringere Strahlungsmengen im Unterstand bedingt, bildet sich bei jungen Buchen Plagiotropie aus – die Pflanze wächst nicht mehr lotrecht bzw. orthotrop, sondern zunehmend flach weiter und nutzt so diffuses Licht besser aus (WAGNER & MÜLLER-USING 1997, MOREL & PLANCHAIS 2000, WAGNER et al. 2010). Bei der Ansprache der Wuchsform wird in dieser Arbeit jeweils das oberste Viertel der Spross-/Stammachse betrachtet und zwar zu einem Zeitpunkt, an dem die Buchen den Jahrestrieb der laufenden Vegetationsperiode

⁴ Dabei handelt es sich um ein charakteristisches Fraßbild mit punktförmigen Rindenverletzungen, die in geringen Abständen nebeneinander wie ein Ring um den Stamm herum angeordnet sind und auch mehrmals an einem Baum auftreten können, wie es in der vorliegenden Arbeit beobachtet wurde. Nach GATTER (1972) kann es sich dabei um die Tätigkeit von Spechten handeln, die an arm- bis beinstarken Bäumen, auch Buchen, Ringelungen anlegen, um besonders im Frühjahr den Baumsaft zur Nahrungsaufnahme zur Verfügung zu haben.

bereits verholzt haben, sodass dieser nicht weich ist und deshalb nicht vom Baum herabhängt.

Tabelle 3-5: Klassifizierung und Beschreibung des Aufnahmemerkmals „Wuchsform“

Stufenzuordnung	Stufenbezeichnung	Abgrenzungskriterium nach der Sprossachse
0	orthotroper Wuchs	vertikale Abweichung des obersten Viertels der Sprossachse um weniger als 45° von der Lotrechten bei vollständiger Verholzung aller Triebe
1	plagiotroper Wuchs	vertikale Abweichung des obersten Viertels der Sprossachse um mehr als 45° von der Lotrechten bei vollständiger Verholzung aller Triebe

Es werden in die Analyse sowohl orthotrop als auch plagiotrop wachsende Buchen in die Auswertung einbezogen.

soziologische Stellung und Höhenklasse

Beginnt sich eine Buchenkultur zu schließen und zur Dickung zu werden, fangen die Bäume an, sich gegenseitig mit ihren Zweigen zu durchdringen. Es bildet sich eine Soziologie heraus, in der die einzelnen Bestandesglieder in unterschiedlicher räumlicher vertikaler Beziehung zueinander stehen. Im Anhalt an andere Autoren (ASSMANN 1961 S. 92, LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 325, KURTH 1946 S. 603ff, PETRIȚAN & LÜPKE 2009) werden in der vorliegenden Arbeit Buchen aus Voranbauten, die sich bereits in Dickungsschluss befinden, in fünf Klassen eingeteilt. Dafür wird hier die Baumklassen-Einteilung nach KRAFT (1884 zit. n. RÖHRIG et al. 2006 S. 221f) verwendet, welche die Kronenbeschaffenheit und die Höhenrelation von Bäumen untereinander beschreibt. Dieses Baumklassensystem ist einfach und beschränkt sich auf die soziologische Stellung ohne Gütemerkmale einzubeziehen, wie es die Systeme nach HECK (1898, zit. n. RÖHRIG et al. 2006 S. 221f) oder nach IUFRO tun (RÖHRIG et al. a.a.O.). Weil dieses System für Bestandesglieder im Fichtenhochwald entwickelt wurde (RÖHRIG et al. a.a.O.), muss es in Bezug auf die Buchen im Voranbau modifiziert werden. Im Voranbau ist die Kronenbeschaffenheit schlechter zu beurteilen als im Hochwald, noch dazu wenn es sich um junge Laubbäume mit disticher Verzweigung nach dem Architekturmodell von TROLL (1937 S. 523 und 696f) handelt. Daher fließt noch die Durchmesserrelation der Buchen untereinander mit ein, weil diese namentlich in Dickungen bei gleicher Höhe stark streuen können (ASSMANN 1961 S. 92). In Verjüngungsbeständen besteht der Vorteil, dass die Durchmesserrelation leicht

einzuschätzen ist. Dies bedeutet, dass Bäume, die im Vergleich zu deutlich Vitalen gleich hoch aber wesentlich schlanker sind, Kennziffern für eine untergeordnete soziologische Stellung erhalten.

Vor allem in den lückigen Buchenflächen, in denen mit weitem Pflanzverband (Versuchsdesign II) oder in sehr jungen Voranbauten ist es in der vorliegenden Untersuchung oftmals der Fall, dass sich die Buchen untereinander noch nicht oder gerade erst seitlich berühren und folglich keine soziologische Schichtung ausgebildet worden ist. Trifft dies zu, sind zwei *Höhenklassen* eingeführt worden. Die beiden Klassen grenzen sich so ab, dass für jede Versuchsfläche die mittlere Höhe der 20% höchsten Buchen abgeschätzt und halbiert wurde. Liegt die Höhe eines Baumes unter dieser Grenze, zählt er zur Höhenklasse 2 – andernfalls zur Höhenklasse 1 (LEONHARDT & WAGNER 2006). Folglich ist diese Einteilung mit absolut unterschiedlichen Grenzwerten zwischen oberer und unterer Höhenklasse je nach Versuchsfläche bzw. Probekreisrasterfläche belegt. Ähnlich verwenden PETRIȚAN & LÜPKE (2009) relative Höhengrenzen von Bäumen in Bezug zur Maximalhöhe auf einem Probekreis.

Die nachstehende Übersicht beschreibt die soziologische Stellung solcher Buchen näher, die in dieser Arbeit ausgewertet werden. Bäume mit niedrigerer Höhen- oder soziologischer Klasse werden davon ausgeschlossen.

Tabelle 3-6: begriffliche Abgrenzung der oberen soziologischen Stellung aufgenommenener Buchen nach dem Versuchsdesign

Versuchsdesign	soziologische Stellung	Beschreibung
Höhenklasse bei fehlendem Dichtschluss		
II	obere Höhenklasse	Die Probebuche ist größer als die halbe Höhe des Mittelwerts der 20% höchsten Buchen auf der Fläche.
soziologische Klassen bei Dichtschluss in Anlehnung an KRAFT (1884)		
I	vorherrschend	Die Krone der Probebuche ist außergewöhnlich kräftig entwickelt und überragt teilweise die anderen Bestandesglieder. Der Durchmesser ist in Relation zu den anderen Bestandesgliedern groß dimensioniert.
	herrschend	Die Krone der Probebuche ist verhältnismäßig gut entwickelt. Die Probebuche ist mit den meisten Buchen gleichwüchsig, ihre Äste durchdringen die Krone benachbarter Bäume teilweise vollständig. Der Durchmesser ist wesentlich größer als bei gering mitherrschenden Buchen, die ansonsten eine ähnliche Höhe wie die herrschenden Buchen haben.

Qualitätserfassung der Probebuchen

Um die Qualität einer jungen Buche ganzheitlich einschätzen zu können, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die waldbaulichen Baumklassensysteme sind weniger geeignet, weil sie nicht für Verjüngungen entwickelt worden sind. Autoren, die Kulturen und Dickungen in Bezug auf ihre qualitativen Eigenschaften untersuchen, typisieren die Morphologie der Kronen und der Stämme, um sie anschließend Klassen zuzuteilen (GOCKEL 1994 S. 26, FISCHER 1998 S. 20 und 2000, OTT 2003 S. 21, OTT et al. 2003). In der vorliegenden Untersuchung wird diesem Ansatz gefolgt, die Klassen jedoch abgewandelt. Die folgende Abbildung zeigt typisierte Kronen- und Stammformen, die als Einstufungshilfe dienen (LEONHARDT & WAGNER 2006). Das System wird auch von Weidig (2016 S. 112) für die Einschätzung von jungen Buchen verwendet. Die Ellipsen heben die Merkmale hervor, nach denen die 5 Kronenformen unterschieden wurden. Ziffern verschlüsseln die Kronenform und Buchstaben die Stammform.

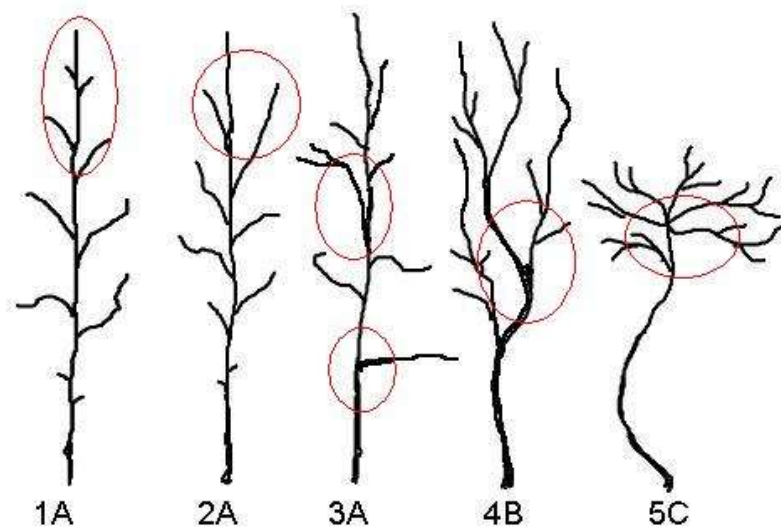


Abbildung 3-5: Klassifizierung der Kronen- und Stammformen nach GOCKEL (1994) und FISCHER (2000). (LEONHARDT & WAGNER 2006)

- | | |
|----|----------------------------------------------|
| 1A | wipfelschäftig und feinastig, geradschaftig, |
| 2A | tendenziell wipfelschäftig, geradschaftig, |
| 3A | steilastig, starkastig, geradschaftig, |
| 4B | mehrfach verzweigt, leicht krummschaftig, |
| 5C | verbuscht, grobastig, stark krummschaftig |

Die hier dargestellten Kombinationen stellen lediglich eine Auswahl dar; tatsächlich gab es alle dieser Verknüpfungen auf den Flächen. Um eine objektive Einstufung zu gewährleisten, sind die Qualitätsklassen in Anhalt an BÖRNER et al. (2003) mit folgenden Kriterien unterlegt, die anfänglich probenhalber nachgeprüft wurden, um die eigene Einschätzung zu eichen:

Tabelle 3-7: Definition und Beschreibung der Kronen- und Stammformen

Kronenform		
Stufen- zuordnung	Bezeichnung	Beschreibung
1	wipfelschäftig, monocorm	Die vorhandenen Seitentriebe konkurrieren nicht mit dem Terminaltrieb.
2	monocorm, verzweigt, Tendenz zum Zwiesel	Der stärkste zum Terminaltrieb konkurrierende Seitentrieb weist weniger als 50% der Länge/des Durchmessers der Hauptachse auf.
3	steilastig, starkastig	Der stärkste zum Terminaltrieb konkurrierende Seitentrieb weist mehr als 50% und weniger als 75% der Länge/des Durchmessers der Hauptachse auf.
4	zwieselig	Der stärkste zum Terminaltrieb konkurrierende Seitentrieb weist mehr als 75% der Länge/des Durchmessers der Hauptachse auf.
5	verbuscht, aufgelöst	Es existieren mehrere Seitenachsen, die mehr als 50% des Durchmessers der Hauptachse aufweisen.
Stammform		
Stufen- zuordnung	Bezeichnung	Beschreibung
A	überwiegend gerade	Die Stammachse weicht in ihrem Wuchsverlauf bis 22,5° aus der Lotrechten ab.
B	bogig, knickig	Die Stammachse weicht in ihrem Wuchsverlauf um 22,5° bis 45° aus der Lotrechten ab. Mehrfaches Auftreten ist möglich.
C	stark gekrümmt	Die Stammachse weicht in ihrem Wuchsverlauf mehr als 45° aus der Lotrechten ab. Mehrfaches Auftreten ist möglich.

Um zwieselige Buchen handelt es sich in Anhalt an NINGRE (1997) und NINGRE & COLIN (2007) erst dann, wenn nach den genannten Kriterien die Zwieseläste mindestens vier Jahre alt sind bzw. die Pflanze diese Verzweigungsform mindestens vier Jahre lang beibehalten hat, ohne dass sich ein Ast als Leittrieb herauskristallisiert. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich in der vorliegenden Untersuchung um einen Baum mit der Kronenform „steilastig, starkastig“.

Für die Ansprache der Stammform liegen hier die unteren 40-50% der Stammachse zugrunde; unabhängig davon, ob dort lebende Äste vorhanden sind. Diese relative Grenze ist notwendig, um Voranbauten unterschiedlicher natürlicher Altersstufen⁵ bei verschiedener Standzeit und variierendem Pflanzverband in der Auswertung direkt miteinander vergleichen zu können: Als

⁵ Zu den natürlichen Altersstufen zählen nach RÖHRIG et al. (2006 S. 209) Jungwuchs, Jungbestand (Dickung, Gertenholz), Stangenholz, schwaches, mittleres und starkes Baumholz.

Extreme stehen sich Voranbauten mit noch nicht eingetretenem Dichtschluss und solche mit bereits fortgeschrittener Astreinigung nach Dichtschluss gegenüber.

Die 15 möglichen Kombinationen der Kronen- und Stammformen müssen im Rahmen der Auswertung auf vier Qualitätsklassen reduziert werden, um zu repräsentativen Aussagen zu gelangen. Die vier Qualitätsklassen sind folgendermaßen definiert:

Tabelle 3-8: Definition und Beschreibung der Qualitätsklassen als Kombination aus Kronen- und Stammform

Angabe der Qualitätsstufenziffern in Klammern

Qualität		Stammform			
Kronenform	Stufe	Bezeichnung	A überwiegend gerade	B bogig, knickig	C stark gekrümmt
		1	wipfelschäftig, monocorm	sehr gut (1)	sehr gut (1)
2		monocorm, verzweigt, Tendenz zum Zwiesel	sehr gut (1)	sehr gut (1)	gut (2)
3		steilastig, starkastig	gut (2)	gut (2)	unzureichend (4)
4		zwieselig	zwieselig (3)	zwieselig (3)	unzureichend (4)
5		verbuscht, aufgelöst	unzureichend (4)	unzureichend (4)	unzureichend (4)

In dieser Einteilung steigt mit schlechter werdender Kronenform der Einfluss einer schlechten Stammform, so haben monocorme Buchen trotz stark gekrümmter Stämme immer noch eine gute Qualität währenddessen steil- bzw. starkastige bei einer solchen Schaftform bereits als unzureichend eingestuft werden. Die Kategorie „zwieselig“ wird auch in den vier Qualitätsstufen beibehalten, wobei Zwiesel mit starker Schaftkrümmung eine Qualitätsstufe schlechter eingeordnet sind.

3.1.2 Auswahl und Datenerhebung von Einzelbuchen (Stufe II)

3.1.2.1 Auswahl von Einzelbuchen

Die Versuchsflächen (Kernflächen) und Probekreise im Raster grenzen das Kollektiv der potenziell zu untersuchenden Buchen hinsichtlich des kategorial gestuften Merkmals „Qualität“ von den anderen Buchen im Voranbau räumlich ab ($N_{NRW}=5.033$, $N_{SAX}=1.317$). Die auszuwertenden Buchen müssen weiterhin lebend, ohne Schädigungen und Standraumveränderungen sein sowie der oberen

soziologischen Schicht bzw. Höhenklasse angehören⁶ (LINNERT 2009 S. 31) und nur mit anderen Buchen in konkurrenzbedingter Wechselbeziehung stehen. Die so ermittelten Kollektive in $N_{NRW}=2.359$ und $N_{SAX}=730$ repräsentieren solche Buchen, die auf Grund ihrer Vitalität für einen Forstbetrieb wirtschaftlich relevant sind und deren Morphologie nicht von Störgrößen überprägt sind.

Diese Probanden bilden wiederum die Grundgesamtheit für eine Stichprobenziehung einzelner Buchen, welche hinsichtlich ihrer qualitativen Eigenschaften genauer untersucht werden sollen (Stufe II). Es handelt sich insgesamt folglich um eine geschachtelte Versuchsanlage, ein Split-Plot-Design (JEFFERS 1960 S. 14, BÄTZ et al. 1972, S. 151ff).

Weil der unterschiedliche qualitative Zustand als Zielgröße der Untersuchung festgesetzt ist (Kap. 1), deckt das endgültige Einzelbaumkollektiv die vier Qualitätstypen (vgl. Tabelle 3-8) gleichmäßig ab. Der qualitative Zustand wird wie in Stufe I der Versuchsanlage über verschiedene Zeitdimensionen hinweg erfasst, sodass eine Entwicklungstendenz ableitbar ist. Allerdings liegt in Stufe II nicht die Einteilung nach der ursprünglichen Chronosequenz (vgl. Abschnitt 2.2), sondern nach der Einzelbaumhöhe zugrunde. Dadurch bekommen die Einflüsse in der kleinräumigen Umgebung eines Baumes – unterschiedliche Standraum- und Schirmverhältnisse – mehr Gewicht als es das Alter bzw. die Standzeit ausdrücken. Die Baumhöhe ist dagegen eine Resultierende aus Wirkungen des Standorts über die Zeit hinweg (WENK et al. 1990 S. 29f und S. 42ff). Am Ende des Auswahlprozesses einzelner Buchen ist das Tableau aus Höhen- und Qualitätsklassen wie folgt belegt:

Tabelle 3-9: Einzelbuchen nach Qualitätstyp und Höhe, ausgewählt in Stufe II des Split-Plot-Designs.

($N=186$, $N_{NRW}=154$, $N_{SAX}=32$).

Höhenklasse [m]	Qualitätsklasse Einzelbaumkollektiv			
	sehr gut	gut	zwieselig	unzureichend
< 2,51	16	16	13	18
2,51-4,50	10	10	11	11
4,51-6,50	10	10	12	9
> 6,50	11	11	11	7

⁶ Das Auswahlkollektiv in Sachsen enthält auch Buchen der unteren Höhenklasse.

Die Stichprobe ist in folgenden zwei Schritten hergeleitet, weil die Einzelbaumhöhe bei der eigentlichen Datenaufnahme in der Stufe I des Versuchs nicht vorlag. Die angewendete Methode ist die der stratifizierten Zufallsstichprobe, teilweise als Ziehung ohne Zurücklegen (JEFFERS 1960 S. 92ff, BÄTZ et al. 1972 S. 66f, ZÖHRER 1980 S. 66ff).

- Im Auswahlkollektiv ($N_{\text{NRW}}=2.359$ und $N_{\text{SAX}}=730$) wurden stichprobenartig Buchen bestimmt, an denen die Höhe zu messen war. Es handelt sich um eine Hilfsstichprobe. Damit die Baumhöhe in dieser Stichprobe alle Stufen der Überschirmung (Altbaumnähe) und des Standraums über das Alter repräsentiert, wurden innerhalb dieser Faktorstufenkombinationen per Zufallsauswahl $n_{\text{NRW}}=112$ bzw. $n_{\text{SAX}}=58$ Bäume bestimmt (LINNERT 2009 S. 31). Wenn möglich, wurde in dieser Auswahl die Versuchsfläche mit berücksichtigt, um möglichen kleinstandörtlichen Differenzen nicht ein unangemessen hohes Gewicht zu verleihen.
- Die Verteilung der gemessenen Höhen bildet die Grundlage für die Einteilung in vier Höhenklassen (vgl. obige Tabelle). Außerdem wurden für jede Faktorstufen-Versuchsflächenkombination, hier genannt Zellen, Mediane der Höhenmesswerte gebildet. Innerhalb dieser Zellen wurde erneut eine Stichprobe gezogen, die unmittelbar nebeneinander liegende Baumreihen oder Probekreise vermied. Alle auf diese Weise bestimmten Buchen wurden auf den Flächen aufgesucht und dahingehend überprüft, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussten. Dies traf dann zu, wenn die Höhe eines potenziellen Auswahlbaumes – als Radius um diesen herum verwendet – größer war als der Abstand zu einem benachbarten Baum, der ebenfalls vorausgewählt worden war. In einigen Fällen mussten Bäume ersetzt werden, in anderen Situationen war kein Ersatz möglich. Somit handelte es sich schlussendlich um $n_{\text{NRW}}=154$ bzw. $n_{\text{SAX}}=32$ Probebuchen, an denen umfangreiche Einzelmessungen durchzuführen waren.

3.1.2.2 Datenerhebung an den Einzelbuchen

Die erhobenen Daten an den Einzelbuchen dienen dem Zweck, deren kleinräumige Situation hinsichtlich des Überschirmungsdrucks und dem innerartlichen Wettbewerb der Bäume im Voranbau abzubilden. Die Parameter „Altbaumnähe“ und „Standraum“ (vgl. Abschnitt 3.1.1.3) aus der Stufe I, die für die Probebuchen auf Flächenausschnitten in Voranbauten aufgenommen wurden, werden in der Stufe II für die Einzelbuchen durch metrisch skalierte, stetige Konkurrenzindices ersetzt bzw. ergänzt.

Messung von Qualitäts- und Wachstumsparametern am Einzelbaum und Ableitung von Sekundärvariablen

An den Einzelbuchen wurde eine Vielzahl an Messgrößen erhoben, die als primäre Variablen bezeichnet werden und sich in Wachstums- und Qualitätsparameter einteilen lassen. Als Grundlage diente das Aufnahmeschema der Arbeitsgruppe „Qualitätsansprache“ der Sektion Waldbau im DVFFA (BÖRNER et al. 2003) welches durch aufgenommene Wachstumsparameter und Kronenablotungen Ergänzung fand. Die genannten Autoren arbeiten mit festen Schaftabschnitten von 1,5m Länge für die Aufnahme von astbezogenen Merkmalen und mit 3,0m Länge für die Messung der Krümmung. Weil sich in der vorliegenden Untersuchung die Höhen der Einzelbäume im Rahmen von 1,68m bis 11,70m bewegen, wurde vor der Aufnahme der Qualitätsparameter festgelegt, für welche Baumhöhen welche Schaftabschnitte anzusprechen waren. Dies war auch deshalb notwendig, weil für alle Messungen, die sich außer Handreichweite vom Boden aus gesehen befanden, die Reichweite mit Hilfe einer Einholmleiter oder einer Mehrzweckleiter vergrößert wurde. So konnte bis in eine Höhe von 4,50m gestiegen werden. Eine Einholmleiter „Tiroler Steigtanne“ eignete sich nur für Bäume, die statisch in der Lage waren, diese zu tragen. Die aufzunehmenden Schaftabschnitte gliedern sich nach der Baumhöhe wie folgt:

-
- Baumhöhe bis 4,49m 1,5m-Abschnitt
 - Baumhöhe 4,50m bis 5,99m 1,5m-Abschnitt,
3m-Abschnitt
 - Baumhöhe ab 6,00m 1,5m-Abschnitt,
3m-Abschnitt,
4,5m-Abschnitt

Die nachstehende Übersicht beinhaltet alle Messgrößen, die am Einzelbaum aufgenommen wurden. Zusätzlich ist angegeben, welche Merkmale in welchen Schaftabschnitten gemessen wurden. Fehlt diese Art der Signierung, bezieht sich die Ansprache und Erhebung auf den gesamten Baum. Baumhöhen und Ansatzhöhen z. B. von Ästen wurden mit Hilfe von Teleskopmessstangen oder mit Hilfe eines Zollstocks erhoben, die Genauigkeit betrug 1cm. Wurzelhalsdurchmesser konnten entweder mit der Schieblehre oder bei dickeren Bäumen mit dem Umfangmaßband auf 1mm genau bestimmt werden. Für die Astwinkelmessung eignete sich ein am Lehrstuhl für Waldbau der TU Dresden entwickeltes Gerät (WEIDIG 2016 S. 90), Horizontaldistanzen wurden mit einem Rollmaßband auf 1cm genau gemessen. Ein Kompass mit 360°-Einteilung diente dazu, einen auf dem Boden liegenden rechtwinklig geklappten Zollstock, dessen Spitze am Stammfuß platziert war, auf die vier Haupthimmelsrichtungen auszurichten. Diese Sektoren dienten der Kronenablotung.

Tabelle 3-10: Definition von Messgrößen für Merkmale am Schaft und für Zwiesel/Steiläste

Gruppe	Messgröße	Definition
Schaft	maximale Pfeilhöhe Krümmung**	maximaler Horizontalabstand zwischen Stammoberfläche und einer geraden Basis bezogen auf die Krümmungslänge
	Ansatzhöhe der maximalen Pfeilhöhe**	lotrechter Vertikalabstand zwischen der maximalen Pfeilhöhe und dem Erdboden
	Bezugslänge Krümmung**	Horizontalabstand zwischen dem Beginn und dem Ende einer Krümmung
	Krummschaftigkeit ⁷	einschnürig, zweischnürig, unschnürig
	Schaftneigung	Abweichung der Stammachse von der Lotrechten, Einteilung in die Klassen bis zu 10°, von 11°-22,5° oder mehr als 22,5°
Zwiesel/Steilast	Anzahl Zwiesel	Zwiesel, wenn die schwächere Schaftachse 75% der Länge und des Durchmessers der stärkeren Achse aufweist
	Ansatzhöhe unterster Zwiesel	lotrechter Vertikalabstand zwischen dem Zusammenlaufen der gedachten Zwieselmarkröhren und dem Erdboden
	Anzahl Steiläste	Steilast, wenn der schwächere Trieb mind. 50% der Länge und des Durchmessers aufweist und der Ansatzwinkel unter 22,5° liegt

⁷ Die Krummschaftigkeit ist ein Merkmal, welches nach RICHTER (2010 S. 42) Krümmungen auf ein- oder zweidimensionaler Ebene charakterisiert. Bei einem unschnürigen Stamm liegen zwei versetzt angelegte Schnurlote nicht direkt am Stamm an, beim einschnürigen Schaft verläuft nur ein Schnurlot direkt stammparallel und beim zweischnürigen Stamm liegen beide Lote direkt an.

Tabelle 3-11: Definition von Messgrößen für Astmerkmale und Wachstumsparameter

Gruppe	Messgröße	Definition
Aststärken/Astausladung	Anzahl Grünäste/Totäste*	primäre Äste mit lebendem Kambium/mit totem Kambium
	Ansatzhöhe stärkster primärer Grünast/Totast*	lotrechter Vertikalabstand zwischen dem Zusammenlaufen der gedachten Ast- mit der Stammmarkröhre und dem Erdboden
	Durchmesser stärkster primärer Grünast/Totast*	vertikal und horizontaler Durchmesser unmittelbar nach dem Astkragen gemessen
	Ausladung stärkster primärer Grünast* und maximale Ausladung nach 90°-Sektoren der Haupthimmelsrichtungen	horizontaler Abstand zwischen der abgeloteten Ausladung und dem Stammfußmittelpunkt des Baumes
Astwinkel	Astansatzwinkel stärkster primärer Grünast/Totast*	Winkel zwischen den gedachten Markröhren eines Astes und des Stammes in einem 20cm-Abschnitt oberhalb der Asteintrittsstelle in den Stamm
Wachstumsgrößen	Wurzelhalsdurchmesser	rechtwinklig zueinander gemessene Stammdurchmesser in einer Höhe von 20cm über dem Erdboden
	Brusthöhendurchmesser	rechtwinklig zueinander gemessene Stammdurchmesser in einer Höhe von 130cm über dem Erdboden
	Baumhöhe	lotrechter Vertikalabstand zwischen unterem Rand der Gipfelknospe und dem Erdboden
	Ansatzhöhe erster primärer Grünast	lotrechter Vertikalabstand zwischen dem Erdboden und der Stelle der Markröhrenverschmelzung von Ast und Stamm, erster primärer Grünast vom Erdboden aus gesehen

* Erhebung in Schaftabschnitten von 1,5m ** Erhebung in Schaftabschnitten von 3,0m

Aus den oben dargestellten Primärvariablen ergeben sich rechnerisch die nachstehend benannten Sekundärvariablen.

3 Methoden

Ästigkeitsindex (neu eingeführt)

$$AI = n_{tot} + 2 * n_{grün}$$

Aststärkenindex ASIX nach
STRUCK & DOHRENBUSCH (2000)

$$ASIX = \frac{d. ast_{max}}{whd_{20}} * 100\%$$

Astwinkelindex AWI nach HAGEMANN (2005)

$$AWI = sf * d_{ast}$$

hd-Wert

$$\frac{h}{d} = \frac{h}{whd_{20}}$$

grünastfreies Schaftprozent

$$S\%_g = \frac{h. grün_1}{h} * 100\%$$

maximale Krümmungsstärke
RICHTER (2010 S. 43f)

$$kr = \frac{p_{max}}{l}$$

Formel 3-2: Berechnungsformeln für Wachstums- und Qualitätsmerkmale

Die Variablen in den obigen Gleichungen haben folgende Bedeutung:

Tabelle 3-12: Bezeichnung und Beschreibung der Variablen zur Berechnung von Wachstums- und Qualitätsmerkmalen

Variablenbezeichnung	Beschreibung
$aus _{h_{grünmax}}$	horizontale Ausladung des stärksten Grünastes
d_{ast}	Astdurchmesser in [mm], Mittelwert aus Kreuzkluppung
d_{astmax}	Durchmesser des stärksten Astes in [mm], Mittelwert aus Kreuzkluppung
h	Baumhöhe in [m]
$h_{grün_1}$	Ansatzhöhe erster Grünast
$h_{grünmax}$	Ansatzhöhe stärkster Grünast
l	Bezugslänge der Krümmung
$n_{tot}, n_{grün}$	Anzahl Totäste, Anzahl Grünäste
p_{max}	maximale Pfeilhöhe der Krümmung
sf	Steilheitsfaktor je nach Astabgangswinkel: $sf = 4$ bei $\leq 22^\circ$ $sf = 3$ bei $23^\circ-45^\circ$ $sf = 2$ bei $46^\circ-68^\circ$ $sf = 1$ bei $>68^\circ$
whd_{20}	Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe, Mittelwert aus Kreuzkluppung, in Gleichung 1) in [cm], in Gleichung 4) in [mm]

Die Maßzahl „Ästigkeitsindex“ ist eine neu eingeführte Größe. Sie ist ein summarisches Maß dafür, wieviele Äste in einem zu definierenden Schaftabschnitt vorkommen. Grüne Äste werden dabei doppelt so stark gewichtet wie tote.

Charakterisierung der Konkurrenzsituation von Einzelbuchen

Konkurrenzindices bilden in zahlreichen waldbaulichen Untersuchungen die Basis, die kleinräumige Wuchssituation eines Baumes in Bezug auf seine Baumnachbarn darstellen zu können (AMMER 2000 S. 113f). Nach BURTON (1993) beschreiben sie das Ausmaß des räumlichen Einflusses von Nachbarpflanzen auf einen betrachteten Baum und bilden komplexe biologische Prozesse ab (DANIELS et al. 1986). In Waldbeständen sind dies vorzugsweise die Reduktion von Licht sowie auch der Wettbewerb um Nährstoffe und Wasser im Wurzelbereich (AMMER 1996).

Aufnahme der Konkurrenzsituation von Einzelbäumen in Wechselwirkung mit dem Altbestand

Um die kleinräumige Überschildungssituation für die Einzelbuchen, im Folgenden auch als Zentralbäume genannt, quantifizieren zu können, werden zwei Maßzahlen verwendet:

- die Grundfläche je Hektar (KÜßNER 1999 S. 97) und
- der Konkurrenzindex von HEGYI (1974 zit. n. PRETZSCH 2002 S. 267).

Voraussetzung ist, dass die genaue Lage der Einzelbuchen zum aufgenommenen Altbestand bekannt ist. Deswegen sind im Gelände das Azimut und die Horizontalabstand zum nächstgelegenen erfassten Altbaum bestimmt worden. Die Baumfußmittelpunkte sind die Messstellen, zwischen denen die Daten per Kompass und Rollmaßband auf 1° und 1cm genau erfasst worden sind. Anschließend sind die Einzelbuchen in die bestehenden Stammverteilungspläne des Oberstandes (vgl. Abschnitt 3.1.1.3) eingebunden worden. Wenn im Altbestand Stubben vorhanden sind, die zum Aufnahmezeitpunkt fünf Jahre (NRW) bzw. sechs Jahre (SAX) alt waren, werden sie ebenfalls als relevante Konkurrenten betrachtet (vgl. Kriterien in Abschnitt 2.2). Weil bei diesen Stubben die Baumhöhe fehlt, wird sie anhand von Höhenkurven ersetzt. Dies geschieht auch für Bäume, deren Kronenspitze während der Datenaufnahme verdeckt war. Die Parameter der Höhenkurven sind mit Hilfe der Programme BWinPro6.2 von NAGEL et al. (2003) für die Versuchsflächen in NRW und BWinPro-S6.3 von RÖHLE et al. (2007, Setup vom 25.01.2010) für die sächsischen Versuchsflächen berechnet worden (DÖBBELER et al. 2007). Die Programme verwenden folgende Beziehungen, um die Höhenkurven zu schätzen:

- in BWinPro6.2 die logarithmische Beziehung $h = b_0 + b_1 * \ln(\text{bhd})$ und
- in BWinPro-S6.3 die Höhenkurve nach MICHALOW $h = 1,3 + \exp\left(b_0 + \frac{b_1}{\text{bhd}}\right)$.

Formel 3-3: Gleichungen für die Höhenkurven in BwinPro6.2 und BwinPro-S6.3

h – Baumhöhe [m], bhd – Brusthöhendurchmesser [cm], b_0 und b_1 zu schätzende Parameter

Als Eingangsgröße dient lediglich der Brusthöhendurchmesser, b_0 und b_1 sind die zu schätzenden Parameter.

Aus diesen Informationen leitet sich die Grundfläche je Hektar des Oberstandes für jede Einzelbuche ab. Relevante Konkurrenten werden mit dem Grenzwinkelprinzip nach BITTERLICH (1952) als Suchmodus identifiziert. Die Grundfläche eines Baumes im Oberstand wird dann mitgezählt, wenn das Verhältnis von Brusthöhendurchmesser zu horizontalem Abstand Fichte-Buche größer oder gleich ist als die Zählbreite von 1cm zu 50cm Länge bei einem gedachten BITTERLICH-Stab, der direkt an der Einzelbuche angesetzt wird. Bei Stubben mit einem Alter von weniger als fünf Jahren muss anstelle des Bhd der kreuzgekluppte Stubbendurchmesser verwendet werden. Diese Stubben werden deshalb einbezogen, weil unterstellt wird, dass die in dieser Zeit geernteten Bäume einen Einfluss auf die Qualitäts- und Wachstumsgrößen der Buchen haben.

Um die relevanten Konkurrenten des Oberstandes für die Berechnung des HEGYI-Index herzuführen, wird dem Zentralbaum an seinem Fußpunkt ein gedachter Kegel mit Öffnungsweite von 60° aufgesetzt (BIGING & DOBBERTIN 1992). Alle Bäume des Oberstandes und alle Stubben mit rekonstruierter Höhe, die in diesen Kegel ragen oder dessen Mantelfläche berühren, werden in den Indexwert einbezogen. Ob dies zutrifft, ist für jeden Baum bzw. Stubben des Oberstandes rechnerisch mit der trigonometrischen Beziehung aus seiner Höhe und dem Abstand zum Zentralbaum abzu prüfen:

$$\tan(60^\circ) \leq \frac{h_{OST}}{dist_{Zb-}}$$

Formel 3-4: Auswahlvorschrift für konkurrenzrelevante Bäume des Oberstandes nach PRETZSCH (1995).

h_{OST} – Höhe eines Baumes im Oberstand [m], $dist_{zb-OST}$ – Horizontalabstand zwischen betrachteter Probebuche und eines Baumes im Oberstand [m]

Der Konkurrenzindex von HEGYI (1974 zit. n. PRETZSCH 2002 S. 267) berechnet sich für einen Zentralbaum Zb als Summe aus den distanzgewichteten Durchmesserrelationen zu allen relevanten Konkurrenten nach folgender Formel:

$$CI_{Zb(Hegy.Schirmdruc)} = \sum_K^n \frac{Bhd_K}{Bhd_{Zb} * (dist_{Zb,K} + 1)} \quad K = 1, \dots, n \quad Zb = 1, \dots, m$$

Formel 3-5: Berechnungsvorschrift für den Konkurrenzindex nach HEGYI (1974)

K – Konkurrent (Oberstand), Zb – Zentralbaum (Probebuche), n – Anzahl relevanter Konkurrenten je Zentralbaum, m – Anzahl Probebuchen, Bhd_K – Brusthöhendurchmesser Konkurrent [m], Bhd_{Zb} – Brusthöhendurchmesser Probebuche [m], $dist_{zb,K}$ – Horizontalabstand zwischen Konkurrent und Probebuche [m]

Die Eingangsgrößen sind der Brusthöhendurchmesser Bhd eines Konkurrenten K in [cm], der Bhd des Zentralbaumes Zb in [cm] und die Horizontaldistanz zwischen dem Zentralbaum und dem jeweiligen Konkurrenten in [m]. Anhand der Formel wird deutlich, dass ein großer Indexwert einen hohen interspezifischen Wettbewerb zwischen relevanten Fichten und einer betrachteten Buche verkörpert. Es lässt sich weiterhin ablesen, dass eine dickere, nahestehende Fichte mehr Einfluss auf die betreffende Verjüngungspflanze hat als eine weiter entfernte und/oder dünnere.

Aufnahme der Konkurrenzsituation von Einzelbäumen in Wechselwirkung mit der Verjüngung

Innerhalb der Verjüngung ist es ebenso wie im Altbestand notwendig, die relevanten Konkurrenten herauszufiltern (BACHMANN 1998 S. 59ff). Wie intensiv der innerartliche Wettbewerb ausgetragen wird, ist maßgeblich vom räumlichen Abstand der Bäume untereinander und von ihrer Dimension geprägt. Ein dreifach gestaffeltes Auswahlssystem ermöglicht, relevante Konkurrenten auf unterschiedlichen Ebenen auszuwählen. Dazu bedarf es verschiedener Suchmodi (BIGING & DOBBERTIN 1992, BACHMANN 1998 S. 59ff), die in der folgenden Abbildung veranschaulicht sind.

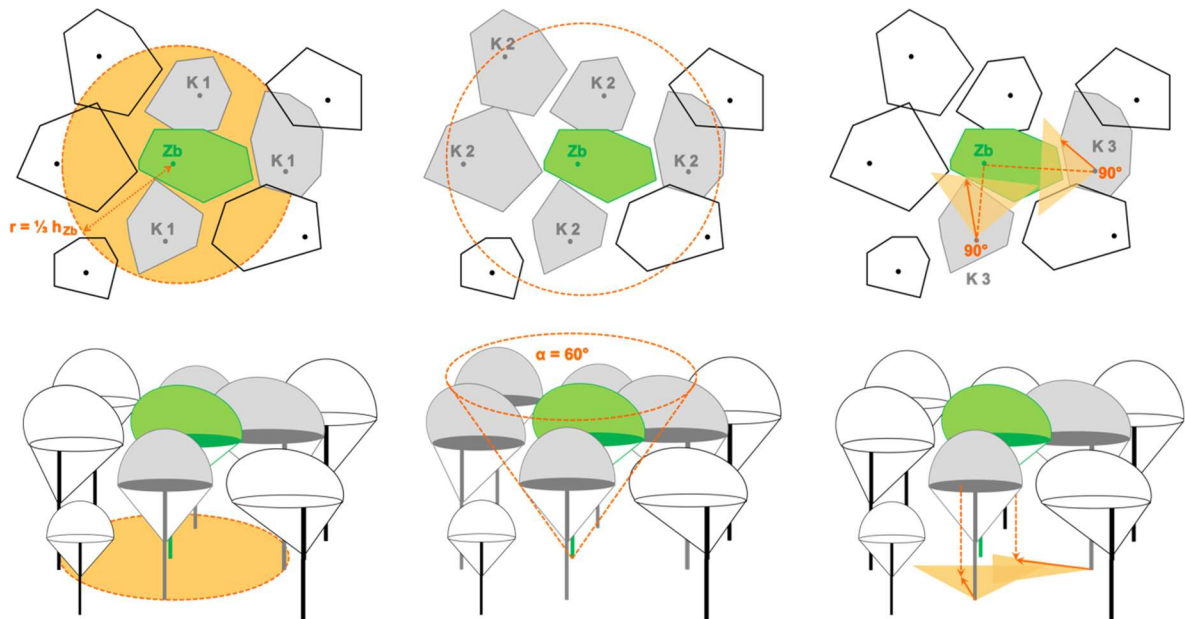


Abbildung 3-6: Darstellung der Suchmodi zur Identifizierung der Konkurrenten innerhalb der Verjüngung (Vogelperspektive und Seitenansicht).

grün: Zentralbaum Zb (Probebuche), grau: ausgewählte Konkurrenten K1 bis K3, weiß: nicht ausgewählte Konkurrenten, orange: Darstellung der Suchmodi.

Linke Spalte: Suchmodus 1 – Suchradius um den Zentralbaum Zb 1/3 seiner Höhe

mittlere Spalte: Suchmodus 2 – Suchkegel mit Spitze am Fußpunkt des Zentralbaums und Öffnungsweite von 60°

rechte Spalte: Teil des Suchmodus 3 – Suchdreieck mit Spitze am Fußpunkt des Konkurrenten und Halbierender zwischen den Fußpunkten Konkurrent-Zentralbaum (gestrichelte Linie) und Öffnungswinkel 90°. Die durchgezogenen Pfeile entsprechen Richtung und Betrag der Astausladungsvektoren der jeweiligen Konkurrenten K3.

Der erste Suchmodus (linke Grafiken) bezieht alle Nachbarbäume K1 als Konkurrenten ein, deren Fußpunkte sich innerhalb eines gedachten horizontalen Kreises um den Fußpunkt des Zentralbaumes befinden. Der Radius wird relativ (LORIMER 1983) zur Höhe des Zentralbaums gewählt, er beträgt davon ein Drittel. Beim zweiten Suchmodus (mittlere Grafiken) hilft ein gedachter Kegel, benachbarte Bäume als relevante Konkurrenten K2 zu identifizieren. Die Kegelspitze setzt am Fußpunkt des Zentralbaumes an und hat eine Öffnungsweite von 60° (BIGING & DOBBERTIN 1992, PRETZSCH 1995). Alle Bäume K, deren Höhe im Verhältnis zum Fußpunkt-Abstand Zentralbaum-Konkurrent die trigonometrische Beziehung

$$\tan(60^\circ) \leq \frac{h_K}{\text{dist}_{Zb-K}}$$

Formel 3-6: Auswahlvorschrift für konkurrenzrelevante Nachbarn in der Verjüngung nach PRETZSCH (1995).

h_K : Höhe des Konkurrenten [m], dist_{Zb-K} : Horizontalabstand zwischen Zentralbaum und Konkurrent [m]

erfüllt, ragen in den Suchkegel und gelten als aufzunehmende Konkurrenten K2. Der dritte Suchmodus konzentriert sich nur auf Bäume, die bereits beim ersten und zweiten Suchmodus als relevante Nachbarbäume identifiziert worden sind (K1 und K2). Trifft dies zu, handelt es sich um einen zu messenden Konkurrenten K3. An dessen Fußpunkt wird ein horizontaler 90°-Sektor aufgespannt, der mittig auf den Fußpunkt des Zentralbaums ausgerichtet ist (rechte Grafiken). Anschließend wird die größte Kronenbreite des K3-Baumes in diesem Sektor abgelotet. Folgende Daten werden an den per Suchmodi identifizierten Konkurrenten und am Zentralbaum erhoben:

Tabelle 3-13: Messgrößen am Zentralbaum und an den Konkurrenten mit Beschreibung.

Messgröße	Messobjekt	Beschreibung
Baumhöhe	Zb, K2, K3	Vertikalabstand zwischen Fußpunkt des Baumes und der Endknospenunterkante
Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe	Zb, K1, K2, K3	Stammdurchmesser in 20cm Höhe ab Baumfußpunkt
Kronenradius	Zb	maximale horizontale Kronenausdehnung nach den vier Haupthimmelsrichtungen
	K3	maximale horizontale Kronenausdehnung im baumindividuellen 90°-Sektor
Astansatzhöhe	Zb, K3	Ansatzhöhe der Äste, deren Horizontalausdehnung gemessen wurde

Der Wurzelhalsdurchmesser ist mittels Schiebelehre auf Millimeter genau in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Messungen abgenommen und anschließend gemittelt worden. Alle anderen Messgrößen sind mit einer Genauigkeit von 1cm erhoben. Die Teleskopmessstange oder der Zollstock waren die Messinstrumente für alle Vertikaldistanzen wie Höhen und Ansatzhöhen von Ästen. Alle Horizontaldistanzen konnten auf 1cm genau entweder mit Rollmaßband oder Zollstock ermittelt werden. Handelte es sich dabei um den Horizontalabstand zweier Bäume, lag die Messstelle am jeweiligen Baumfußmittelpunkt. Die Kronenradien wurden abgelotet. Als „Lot“ kam eine Teleskopmessstange zum Einsatz, die an der Knospenunterkante des betreffenden Astes ansetzte. Eine Libelle am Messgerät sorgte für dessen genaue Vertikalausrichtung. Aus der Horizontaldistanz zwischen dem so abgeloteten Punkt und dem Baumfußmittelpunkt ergab sich dann der Kronenradius. Der baumindividuelle 90°-Sektor am K3-Baum sowie die Sektoren für die Haupthimmelsrichtungen am

Zentralbaum wurden im Gelände mittels eines rechtwinklig aufgeklappten Zollstockes realisiert, dessen Spitze am Baumfußpunkt angelegt war. Der baumindividuelle Sektor wurde anhand der Verbindungslinie Zb-K3 mittig ausgerichtet, bei den vier Sektoren nach Haupthimmelsrichtungen lag die Winkelhalbierende jeweils bei Nord, Ost, Süd bzw. West.

Aus den erhobenen Daten der relevanten Konkurrenten K1 bis K3 wurden Konkurrenzindices berechnet, die das Ausmaß des Wettbewerbs mit dem Zentralbaum abbilden. Es handelt sich um

- den Konkurrenzindex von HEGYI (1974 zit. n. PRETZSCH S. 267) aus allen K1-Konkurrenten (Suchradius),
- den Konkurrenzindex von HEGYI (1974 zit. n. PRETZSCH S. 267) aus allen K2-Konkurrenten (Suchkegel) und
- den neu entwickelten Astkonkurrenzindex nach CLUZEAU et al. (1994) aus allen K3-Konkurrenten.

Für den Hegyi-Index sind die Eingangsgrößen neben der Horizontaldistanz zwischen den Baumfußmittelpunkten die Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe. Für jeden Zentralbaum wird entsprechend der Berechnungsvorschrift das distanzgewichtete Durchmesser Verhältnis mit jedem Konkurrenten berechnet und aufsummiert, wie nachstehend ersichtlich:

$$CI_{Zb(Hegy.Seitendruck)} = \sum_K^n \frac{Whd20_K}{Whd20_{Zb} * (dist_{Zb,K} + 1)} \quad K = 1, \dots, n \quad Zb = 1, \dots, m$$

Formel 3-7: Berechnungsvorschrift für den Konkurrenzindex nach HEGYI (1974) in der Verjüngung.

Zb: Zentralbaum, K: Konkurrent, m: Anzahl der Zentralbäume, n: Anzahl der Konkurrenten je Zentralbaum, Whd20: Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe über dem Boden [cm], dist_{Zb,K}: Horizontaldistanz zwischen Zentralbaum und Konkurrent [cm]

Kleine Indexwerte drücken eine geringe intraspezifische Konkurrenz aus und umgekehrt.

Der Astindex verwendet als Eingangsgrößen die Kronenbreite kb, die Ansatzhöhe der Kronenbreite kb.h und die Baumhöhe h. Beim Zentralbaum handelt es sich bei kb und kb.h um gemittelte Werte aus den vier Messungen nach den Himmelsrichtungen (vgl. Tab. 3-13). Die Berechnungsvorschrift für den Index lautet wie folgt:

$$CI_{Zb(Ast.Seitendruck)} = \sum_K^n \frac{\frac{kb_K}{h_K} * kb \cdot h_K}{\frac{kb_{Zb}}{h_{Zb}} * kb \cdot h_{Zb}} \quad K = 1, \dots, n \quad Zb = 1, \dots, m$$

Formel 3-8: Berechnungsvorschrift für den Astindex.

Zb: Zentralbaum, K: Konkurrent, m: Anzahl Zentralbäume, n: Anzahl relevanter Konkurrenten je Zentralbaum, h: Höhe [m], kb: maximale horizontale Astausladung innerhalb des Suchdreiecks als Kronenbreite [m], kb.h: Ansatzhöhe des Astes mit Kronenbreite kb [m]

Die Gleichung lässt sich so interpretieren, dass ein Nachbarbaum mit hoch ansetzendem Ast, der weit in die Zentralbaumkrone eingewachsen ist, einen höheren Konkurrenzwert produziert als ein Konkurrent mit niedriger Astansatzhöhe und geringer bzw. keiner Kronenpenetration des Zentralbaums. Bei den betrachteten Ästen der Konkurrenten handelt es sich wie in Tabelle 3-13 beschrieben um solche, die nicht zwangsläufig den größten Kronenradius für den gesamten Baum darstellen, sondern die in räumlichem Bezug auf den Zentralbaum hin am weitesten ausladen. Der Astindex ähnelt dem Index von CLUZEAU et al. (1994), die für Esche mit Hilfe von Astparametern ein Kronenmodell erstellen.

3.2 Methoden zur statistischen Auswertung

3.2.1 Allgemeine Einführung

3.2.1.1 *Regression - Verallgemeinerte Lineare Modelle (Generalized Linear Models GLM)*

Um die Zusammenhänge hinter einer bestimmten Merkmalsausprägung greifbar machen zu können, sind Modelle ein gangbarer Weg. MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 4) machen deutlich, dass hinter Mustern in erhobenen Daten eine Theorie verborgen ist. Die beobachteten Daten in der vorliegenden Untersuchung werden anhand der Arbeitshypothesen auf Wirkzusammenhänge zwischen erklärenden oder unabhängigen Größen X und der abhängigen Größe oder Response Y geprüft. Das gewählte Hilfsmittel sind mathematisch-statistische Regressionsmodelle, die zum einen die beobachtete Response möglichst treffend wiedergeben sollen und darüber hinaus Schlüsse für ähnliche waldbauliche Situationen und Szenarien erlauben (MCCULLAGH & NELDER a.a.O.). Die abhängige Variable wird also als eine Realisierung der Zufallsvariablen Y angesehen, die aus einer Grundgesamtheit stammt (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 26, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 196f). Um die abhängige Variablen mit größter Wahrscheinlichkeit aus den Daten reproduzieren zu können, muss versucht werden, die Streuung in den Daten mit den vorhandenen erklärenden Größen zu minimieren. Trotz aller dieser Bemühungen bleibt bei Daten, die nicht künstlich erzeugt sondern beobachtet oder experimentell ermittelt wurden, immer eine Reststreuungskomponente ε erhalten. Es handelt sich dabei in der Terminologie der Regression um die Residuen, die Abweichung der Einzelbeobachtungen von den zugehörigen geschätzten Modellwerten (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 128).

In der vorliegenden Arbeit wird das Verallgemeinerte Linear Modell – Generalized Linear Model (GLM) – verwendet, um die gesammelten Daten adäquat auszuwerten. Das GLM wurde von NELDER & WEDDERBURN (1972 zit. n. AGRESTI 2013 S. 116) zuerst als eigene Modellklasse in der Systematik eingeführt. Nachfolgend sind die Modelltypen dargestellt, die in dieser Arbeit verwendet wurden. Die Unterteilung richtet sich danach, welche Skala die abhängige Variable

einnimmt. Die Übersicht ist nicht abschließend, weitere Typen können bei MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 13-18) nachgeschlagen werden⁸.

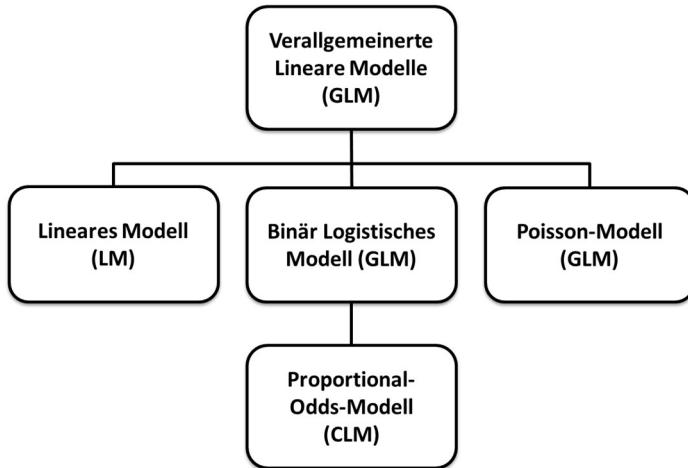


Abbildung 3-7: Darstellung der verwendeten Modelltypen in der Modellklasse des Verallgemeinerten Linearen Modells

Das Verallgemeinerte Lineare Modell bietet den Vorteil, zwischen X und Y eine lineare Beziehung zu unterstellen, selbst wenn es sich um kategoriale Responsevariablen wie Qualitätsklassen und/oder nicht normalverteilte Fehlervarianzen handelt. Damit ist es leicht zu interpretieren. Diese Vorteile werden durch einen dreiteiligen Modellaufbau nutzbar, der in der folgenden Formel veranschaulicht ist (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 27, MADSEN & THYREGOD 2011 S. 99f, AGRESTI 2013 S. 117).

$$E(Y_i) = g(\mu_i) = \underbrace{x_{i1} \beta_1 + x_{i2} \beta_2 + \dots + x_{ij} \beta_j}_{\substack{\text{systematische Komponente} \\ \text{linearer Prädiktor}}}$$

$i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, p$

Formel 3-9: Gleichung des Verallgemeinerten Linearen Modells (nach MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 27)

E(Y): Erwartungswert der abhängigen Größe, g(μ): Link-Funktion, x: unabhängige Beobachtungen, β: Parameterschätzer für die unabhängigen Variablen, i: fortlaufender Index der Messwerte, j: fortlaufender Index der unabhängigen Größen im Modell, n: Stichprobenumfang, p: Anzahl der unabhängigen Größen

⁸ Zum Allgemeinen Linearen Modell zählen nicht nur Regressionsanalysen, sondern bspw. auch die Varianzanalyse (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 782).

Es wird deutlich, dass zwischen dem Erwartungswert und dem linearen Prädiktor die Linkfunktion zwischengeschaltet ist. Sie kann eine beliebige monoton differenzierbare Funktion sein, die den Zweck hat, die Verteilung der Zufallskomponente – bspw. normalverteilt, exponentialverteilt – in eine lineare Beziehung mit der systematischen Modellkomponente zu transformieren (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 27). Wenngleich für die Link-Funktion viele Varianten möglich sind, gehören nur einige den kanonischen Link-Funktionen an, weil sie in der Modellschätzung eine bekannte, beschreibbare Dispersion beisteuern und günstige Modelleigenschaften liefern. Genaue Ausführungen dazu sind in MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 28-32), MADSEN & THYREGOD (2011 S. 90ff) oder AGRESTI (2013 S. 118) enthalten. Die vorliegende Arbeit verwendet keine nonlinearen Modelle, weil diese den Aufwand in Bezug auf das Ergebnis unnötig erschweren. Es sind nach ZUUR et al. (2009 Abschnitt 3.2) additive Modelle (GAM) notwendig. Diese arbeiten den Autoren zufolge mit Glättungsparametern, die sehr anspruchsvoll im Handling sind. Stattdessen werden für die vorliegenden Daten die unabhängigen Variablen auf sinnvolle Transformationen hin überprüft, um einen nonlinearen Trend mathematisch-statistisch im linearen Modell berücksichtigen zu können (ZUUR et al. 2009 Abschnitt 3.1).

3.2.1.2 Gemischte Modelle (Mixed Models MM)

Obwohl der Ansatz der GLM erhebliche Flexibilität für die Modellierung bietet, sind nur umständlich Möglichkeiten gegeben, den Einfluss von Störgrößen wie z. B. das Versuchsdesign auf die Modellvarianz auszuschalten. Dies geschieht dann mit Hilfe ausgeklügelter Versuchspläne (RASCH et al. 2007 S. 13ff). Gerade in Cluster-Studien ökologischer Untersuchungen bzw. in Versuchsanlagen, in denen die Daten auf unterschiedlich behandelten Probeflächen oder an mehreren Individuen mit variierender Behandlung erhoben werden, ist immer mit dem Einfluss von Störgrößen zu rechnen. Diese Aufgabe lösen gemischte Modelle in eleganter Weise. Sie führen zusätzlich zu den festen Effekten die Zufallseffekte ein, mit deren Hilfe eine Vielzahl von Versuchsanlagen – bspw. Split plots, Schachtelungen – eine adäquate Auswertung finden (AGRESTI 2013 S. 492, BOLKER et al. 2009, FAHRMEIR et al. 2009 S. 253f, FARAWAY 2006 S. 161ff, ZUUR ET AL. 2009 S. 101ff MADSEN & THYREGOD 2011 S. 157ff S. 175). Ein Versuchsdesign hat immer damit zu kämpfen, dass Messungen an mehreren Individuen in einer gleich behandelten Gruppe nicht als unabhängige Messwiederholungen gelten können, sondern

miteinander korreliert sind (HURLBERT 1984, MADSEN & THYREGOD 2011 a.a.O). In der vorliegenden Arbeit handelt es sich um räumlich miteinander korrelierte Messungen. Bei Messwiederholungen am selben Individuum wären dies zeitlich korrelierte Daten. Gemischte Modelle annullieren solche Verzerrungen durch korrekt gestaltete Zufallseffekte, darüber hinaus können sie passende räumliche oder zeitliche Korrelationsstrukturen einbeziehen und eine eventuell noch vorhandene räumliche oder zeitliche Abhängigkeit der Daten beheben (PINHEIRO & BATES 2010 S. 226ff, FAHRMEIR 2009 S. 253f; DEMIDENKO 2013 S. 1). All das macht sie interessant für die Fragestellungen forstlich-ökologischer Untersuchungen (u. a. COLIN et al. 2012, BARBEITO et al. 2014, HAMM et al. 2014, WEIDIG 2016 S. 37ff). Genaue Herleitungen und Darstellungen von speziellen gemischten Modellen können bei MCCULLOCH et al. (2008), AGRESTI (2013) sowie DEMIDENKO (2013) nachgeschlagen werden.

Die Notation für Gemischte Verallgemeinerte Lineare Modelle enthält feste und zufällige Effekte. Das GLMM als Verallgemeinerung lässt sich mathematisch nach MCCULLOCH et al. (2008 S. 189f) sowie AGRESTI (2013 S. 492) und angepasst an die Herleitung der GLM von MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 27) für ein Modell mit einem Zufallseffekt, wie es in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, wie folgt beschreiben:

$$E(Y_{ik}|u_i) = g(\mu_{ik}) = \underbrace{x_{i1} \beta_1 + x_{i2} \beta_2 + \dots + x_{ij} \beta_j}_{\text{feste Effekte}} + \underbrace{z_{ik} u_k}_{\text{Zufallseffekt}}$$

$i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, p \quad k = 1, \dots, K$

Formel 3-10: Gleichung des erweiterten Verallgemeinerten Linearen Modells als gemischtes Modell

$E(Y|\mu)$: Erwartungswert der abhängigen Größe bedingt für die Wertegruppen des Zufallseffekts, $g(\mu)$: Link-Funktion, x : unabhängige Beobachtungen, β : Parameterschätzer für die unabhängigen Variablen, u : Werte des Zufallseffekts, z : Werte der erklärenden Variablen aufgeteilt auf die Gruppen des Zufallseffekts u , i : fortlaufender Index der Messwerte, j : fortlaufender Index der unabhängigen Größen im Modell, n : Stichprobenumfang, p : Anzahl der unabhängigen Größen, k : fortlaufender Index der gruppierenden Zufallseffektsvariable, K : Anzahl an Gruppen der Zufallseffekts-Variable

Bis auf den Zufallsterm $z_{ik}u_k$ und dem Index k gleicht ein GLMM einem GLM, das Formel 3-9 dargestellt ist (MCCULLOCH et al. 2008 S. 188, AGRESTI 2013 S. 492). Der Vektor \mathbf{u} beinhaltet die Werte des zufälligen Effektes, z.B. „Versuchsfläche“ in den Stufen 1 bis K und der zugeordnete Vektor \mathbf{z} die Werte der erklärenden

Variablen, aufgeteilt auf die 1 bis K Stufen des Zufallseffekts u_i . Die Realisierungen von \mathbf{Y} sind folglich auf u_i bedingt unabhängig. Dem Zufallseffektsvektor \mathbf{u} wird eine multidimensionale Normalverteilung unterstellt $N(0, \Sigma)$ (AGRESTI a.a.O.). In dieser Arbeit werden die Modelle grundsätzlich als konditionale, zufallseffektspezifische Modelle geschätzt in denen Interzepte für die einzelnen Versuchsflächen ableitbar sind. Weil aber grundsätzlich kein Interesse daran besteht, Unterschiede in einzelnen Versuchsflächen abzuleiten sondern den Einfluss der gewählten Faktoren Schirm, Seitendruck und Einzelpflanze zu untersuchen, werden die Ergebnisse als marginale Modelle interpretiert. Solche marginalen Modelle arbeiten mit dem Erwartungswert aller vorhergesagten Anstiege und können für abhängige Beobachtungen spezifische Korrelationsstrukturen einbeziehen (ZUUR ET AL. 2009 S. 114ff). Eine Wandlung vom konditionalen hin zum marginalen Modell ist nach AGRESTI (2013 S. 498f und S. 500f) möglich, nicht aber umgekehrt.

3.2.2 verwendete Software

In der vorliegenden Arbeit sind die mathematisch-statistischen Modelle mit Hilfe der Software R (Version 3.2.3) (R CORE TEAM 2015) ausgewertet worden (CRAWLEY 2013). Für die Grafiken im Ergebnis- und Diskussionsteil werden die Pakete **ggplot2** (WICKHAM 2009) und **gridExtra** (AUGUIE 2016) verwendet (CHANG 2012). Andere gebrauchte Pakete sind **reshape2** (WICKHAM 2007), **dplyr** (WICKHAM & FRANÇOIS 2015), **tidyr** (WICKHAM 2016) und **Hmisc** (HARREL et al. 2016). Weitere spezielle Programmpakete werden nachfolgend im jeweiligen inhaltlichen Zusammenhang genannt. Darüber hinaus wurde für Dateneingabe, -verwaltung und Aufbereitung der Ergebnisse Microsoft Excel® verwendet.

3.2.3 Schätzmethoden, Hypothesentests und Modellwahl

Mit Hilfe eines Modells geschätzte Parameter dienen zur inhaltlichen Interpretation der Ergebnisse und daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für die Grundgesamtheit. Damit solche Schlüsse zulässig sind, sollen die Parameter nach HEDDERICH & SACHS (2016 S. 323) ohne systematischen Fehler sein (Erwartungstreue), auch bei kleinen Stichprobenumfängen nur geringfügig variieren (Effizienz), mit zunehmendem Stichprobenumfang verbesserte Schätzungen liefern (Konsistenz), alle gegebenen Informationen ausschöpfen (Suffizienz), robust gegenüber Abweichungen sein sowie wenigstens asymptotisch normalverteilt sein. Diese Anforderungen können folgende in dieser Arbeit

verwendeten Schätzmethoden erfüllen (HARRELL 2001 S. 179, FAHRMEIR et al. 2009 S. 90ff, 220ff, **268ff**, ZUUR et al. 2009 S. 116ff, MADSEN & THYREGOD 2011 S. 103ff, AGRESTI 2013 S. 519ff):

- - Maximum-Likelihood-Methode (ML),
- - Restricted-Maximum Likelihood-Methode (REML) und die
- - Methode der kleinsten Quadrate (KQ).

Neben diesen Möglichkeiten existiert z. B. noch die Markov-Chain-Monte-Carlo-Methode (MCMC) aus der Bayes-Umgebung, die hier nicht verwendet wird (FAHRMEIR et al. 2009 S. 149ff und S. 287ff).

3.2.3.1 Schätzmethoden

Die Likelihood ist eine Funktion des unbekanntem Parametervektors θ , von welchem die gemeinsame Wahrscheinlichkeit der beobachteten Responsevariablen abhängt. Bei diskreten abhängigen Variablen handelt es sich um die Wahrscheinlichkeit, bei stetigen abhängigen Variablen um die Wahrscheinlichkeitsdichte (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 469, FAHRMEIR et al. 2009 S. 467, AGRESTI 2013 S. 9).

Gesucht sind nun die Parameter, Schätzwerte des Vektors θ , die diese Likelihood-Funktion maximieren und folglich den Datensatz am meisten wahrscheinlich reproduzieren (AGRESTI a.a.O.). Aus technischen Gründen wird die Likelihood logarithmiert und dadurch zur Log-Likelihood. Die entstehende Summe von Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsdichten ist einfacher zu handhaben (HARRELL 2001 S. 180). MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 469) liefern dazu folgende allgemeine Form der log-Likelihood:

$$l(\theta; \mathbf{y}) = \sum \log f_{Y_i}(y_i; \theta)$$

Formel 3-11: Gleichung der log-Likelihood nach MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 469)

l: logarithmierte Likelihood, θ : für die Maximierung zu schätzender Vektor, \mathbf{y} : Vektor mit den beobachteten abhängigen Werten, f_{Y_i} : zu schätzende Likelihood für jede beobachtete abhängige Variable, i : fortlaufender Index für die beobachteten abhängigen Werte.

In gemischten Modellen wird nach PINHEIRO & BATES (2000 S. 62), FAHRMEIR et al. (2009 S. 284) und AGRESTI (2013 S. 521) zunächst für alle Beobachtungen in einem Cluster, also in der kleinsten Einheit der Zufallseffekte, ein GLM

angenommen. Über diese bedingten Likelihoods wird integriert, sodass sich die marginale Likelihood ergibt. Dabei sind die einzelnen Elemente unabhängig und gleich verteilt. Um die Likelihood für einen Datensatz zu maximieren, wird sie nach den Parametern der festen Effekte sowie nach den Vorhersagewerten für die zufälligen Effekte differenziert und anschließend Null gesetzt. Für die Modelltypen LMM und GLMM/CLMM existieren unterschiedliche Voraussetzungen, die Likelihood zu bestimmen und zu maximieren.

Schätzmethoden für GLMMs mit Binärdaten

Das Integral, das über die bedingten Likelihoods hergestellt werden soll, kann bei GLMM nicht exakt sondern nur näherungsweise bestimmt werden. Als mögliche Verfahren kommen u.a. die iterative Laplace-Approximation oder die numerisch iterative Gauß-Hermite-Quadratur in Frage (AGRESTI 2013 S. 520ff). DEMIDENKO (2013 Kap. 7) beschreibt detailliert weitere Verfahren mit neueren Ansätzen und liefert Simulationsbeispiele mit Angaben zur jeweiligen Genauigkeit. AGRESTI (2013 Kap. 12.6) und FAHRMEIR et al. (2009 S. 284ff) geben vereinfachte Herleitungen zu Schätzmethoden in GLMMs; BOLKER et al. (2009) liefern eine kurze, anwendungsorientierte Übersicht. Im Ergebnis dieser Quellen stellt die Laplace-Approximation eine Möglichkeit dar, bei GLMMs die ML mit ausreichender Genauigkeit und vertretbarer Rechenzeit zu approximieren. Daher wird sie in der vorliegenden Arbeit für GLMMs mit Binärdaten verwendet.

Schätzmethoden für LMMs

Bei LMM werden die Parameter β mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (Least-Square-Method) geschätzt. Dabei wird die Summe der Abweichungsquadrate der Residuen minimiert (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 128). Da es sich bei diesem Schätzer um eine verallgemeinerte Form handelt, können direkt Parallelen zum ML-Schätzer gezogen werden (FAHRMEIR et al. 2009 S. 261f). PINHEIRO & BATES (2000 S. 66) nennen die Orthogonal-triangularäre Dekomposition von Matrizen (QR-Zerlegung) als gängiges numerisches Vorgehen, um solche Kleinste-Quadrate-Schätzungen vorzunehmen. Weil die daraus resultierenden ML-Schätzer zu niedrige Fehlervarianzen aufweisen und dadurch verzerrt sind, werden sie durch REML-Schätzer ersetzt (PINHEIRO & BATES 2000 S. 75f, FAHRMEIR et al. 2009 S. 94). Die Autoren zeigen, dass dabei die festen Effekte β aus den ML-Schätzern herausintegriert werden um die Likelihood zu bestimmen. Letztere

hängt dann nur von der Varianz der zufälligen Effekte ab. In der vorliegenden Arbeit wird dieser REML-Methode der Vorzug gegeben. Lediglich um Modelle mit unterschiedlichen festen Effekten während der Modellierung vergleichen zu können, kommt die ML-Methode zum Einsatz (PINHEIRO & BATES a.a.O.).

3.2.3.2 Hypothesentests und Modellwahl

Hypothesentests

In der vorliegenden Arbeit handelt es sich bei den gesammelten Daten um einen Ausschnitt aus der Grundgesamtheit, d.h. aus Voranbauten, die dieselben Auswahlkriterien erfüllen und auf denen die gleichen Faktorstufenkombinationen anzutreffen sind. Die Modellparameter, die in dieser Arbeit mit den vorgenannten Methoden geschätzt werden, sind folglich ebenso eine Teilmenge wie alle anderen möglichen Parameter, die in weiteren Stichproben, gezogen aus der Grundgesamtheit, vorkommen können (MADSEN & THYREGOD 2011 S. 25, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 761). Um den Parameterschätzwerten mitzugeben, wie wahrscheinlich sie sind, werden in der vorliegenden Arbeit statistische Tests verwendet. Sie arbeiten mit Prüfgrößen, p-Werten und daraus abgeleiteten Signifikanzniveaus, die im Ergebnisteil für alle Parameter angegeben werden (HEDDERICH & SACHS 2016 S.426ff). Bei den Tests werden folgende Hypothesen gegeneinander getestet:

$$H_0 : \beta_i = 0 \quad \text{gegen} \quad H_A : \beta_i \neq 0$$

Formel 3-12: Gleichung der zu testenden statistischen Hypothesen

H_0 : Nullhypothese, H_A : Alternativhypothese, β : zu schätzender Parameter einer unabhängigen Größe, i : fortlaufender Index der unabhängigen Beobachtungen.

Die Nullhypothese H_0 besagt, dass der geschätzte Parameter dem Nullwert entspricht und der zugehörige Effekt, bspw. das Alter, ohne Bedeutung für die Schätzung der abhängigen Variablen ist. Im Terminus der Regression bedeutet es, dass die unabhängige Variable nicht mit der Responsevariable korreliert. Dies lehnt die Alternativhypothese H_A ab. In der vorliegenden Arbeit wird die Signifikanz von Parametern anhand ihrer p-Werte beurteilt. Die hier verwendeten Signifikanzniveaus entsprechen denen, die HEDDERICH & SACHS (2016 S. 431) mitteilen:

-
- nicht signifikant $0,05 < p\text{-Wert}$, Parameter ohne Bezeichnung
 - signifikant $0,05 \geq p\text{-Wert} > 0,01$, Parameter mit Bezeichnung [*]
 - hochsignifikant $0,01 \geq p\text{-Wert} > 0,001$, Parameter mit Bezeichnung [**]
 - höchstsignifikant $p\text{-Wert} \leq 0,001$, Parameter mit Bezeichnung [***]

Nichtsignifikante Schätzwerte bleiben in den Modellen bestehen, sie werden nicht im Zuge einer etwaigen Modellverbesserung eliminiert. Welche Effekte überhaupt in den Modellen berücksichtigt werden, leitet sich aus den Arbeitshypothesen und dem Versuchsdesign in Abschnitt 3.1.1.2 ab. Das bedeutet, dass in keinem der Modelle aus verschiedenen Effekten sequentiell gewählt wird und keine Methoden wie z.B. die Rückwärtsauswahl (backward elimination), Vorwärtsauswahl (forward selection), schrittweise Auswahl (stepwise regression) oder die best-subset-selection angewendet werden (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 89, FAHRMEIR et al. 2009 S. 163ff, MADSEN & THYREGOD 2011 S. 30ff). Es handelt sich vielmehr um eine deterministisch bestimmte Entscheidung, wie die Modelle aufzubauen sind. Außerdem werden keine Wechselwirkungen aus den festen Effekten in die Modelle integriert.

Modellwahl

Als Vergleichskriterium und nicht als Test zwischen zwei Modellen mit unterschiedlichen festen Effekten dient das *Akaike Information Criterion*, kurz AIC-Kriterium (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. PINHEIRO & BATES 2000 S. 10, HARRELL 2001 S. 202, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 780). Ziel ist es, ein Modell auszuwählen, dessen AIC-Wert vergleichsweise minimal ist. In das Kriterium fließen die logarithmierte Likelihood $L(\hat{\beta})$ eines Modells und die Anzahl an Parametern n_{par} ein. Nach PINHEIRO & BATES (2000 S. 10) lässt sich schreiben:

$$AIC = -2 \log(L(\hat{\beta})) + 2n_{par}$$

Formel 3-13: Berechnungsvorschrift für das AIC-Kriterium (nach PINHEIRO & BATES 2000 S. 10)

$\hat{\beta}$: geschätzte Vektoren der unabhängigen Variablen, L: Likelihood für die geschätzten Parametervektoren, n_{par} : Anzahl der im Modell geschätzten Parameter für die unabhängigen Variablen

Gegenübergestellte AIC-Werte für zwei Modelle vergleichen deren Devianz, wobei eine höhere Anzahl an Parametern im Modell n_{par} „bestraft“ wird. Nach MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 91) arbeitet das Kriterium mit Konstanten zwischen 2 wie bei obigem AIC und 6 plausibel. In der vorliegenden Arbeit wird für die Modellvergleiche der LMMs das R-Paket **AICcmodavg** mit der Funktion `aic.tab()` (MAZEROLLE 2016) verwendet. Bei den GLMMs und CLMMs tritt an diese Stelle der Befehl `drop1()` aus dem Paket **MASS** (VENABLES & RIPLEY 2002).

3.2.4 Beschreibung der verwendeten Modelltypen

Bei den Modellen, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, handelt es sich um Gemischte Verallgemeinerte Lineare Modelle. In diesem Abschnitt werden zum einen die konkreten Modelltypen für die festen Effekte näher beschrieben und zum anderen wird erläutert, wie der Zufallseffekt aufgebaut ist. Die nachstehende Übersicht zeigt ausgewählte Eigenschaften der Modelltypen in Bezug auf die festen Effekte.

Tabelle 3-14: Beschreibung der verwendeten Modelltypen (nach MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 30).

Modelltyp	Skala der Responsevariablen	möglicher Wertebereich der Responsevariablen	Fehlervarianzen	kanonische Linkfunktion
LMM	stetig, metrisch	$(-\infty, \infty)$	normalverteilt	Identität
GLMM	Häufigkeiten	$0(1)^\infty$	poissonverteilt	Logarithmus-Funktion
GLMM	kategorial, binär	$\frac{0(1)m}{m}$	binomialverteilt	Logit-Funktion
CLMM	kategorial, ordinal	$\frac{0(1)m}{m}$	binomialverteilt	Logit-Funktion

3.2.4.1 lineares gemischtes Modell (LMM)

Lineare Modelltypen bilden eine stetige, metrische Variable als Response ab. Die Modellgrundform für ein LMM, abgeleitet aus der Notation gemischter Verallgemeinerter Linearer Modelle, ist in der nachstehenden Gleichung veranschaulicht.

$$E(Y_{ik}|u_i) = g(\mu_{ik}) = x_{i1}\beta_1 + x_{i2}\beta_2 + \dots + x_{ij}\beta_j + z_{ik}u_k$$

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, n \\ j &= 1, \dots, p \\ k &= 1, \dots, K \end{aligned}$$

Formel 3-14: allgemeine Gleichung für das gemischte lineare Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt

$E(Y|\mu)$: Erwartungswert der abhängigen Größe bedingt für die Wertegruppen des Zufallseffekts, $g(\mu)$: Link-Funktion, x : unabhängige Beobachtungen, β : Parameterschätzer für die unabhängigen Variablen, u : Werte des Zufallseffekts, z : Werte der erklärenden Variablen aufgeteilt auf die Gruppen des Zufallseffekts u , i : fortlaufender Index der Messwerte, j : fortlaufender Index der unabhängigen Größen im Modell, k : fortlaufender Index der gruppierenden Zufallseffektsvariable, n : Stichprobenumfang, p : Anzahl der unabhängigen Größen, K : Anzahl an Gruppen der Zufallseffekts-Variable

Die Link-Funktion $g(\cdot)$ entspricht der Identitätsfunktion, d.h. die Werte des linearen Prädiktors werden nicht transformiert (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 30f). Der erste Summand aus obiger Gleichung muss den Wert 1 ergeben, um den Anstieg bzw. die Konstante abzubilden. Bei FAHRMEIR et al. (2009 S. 60ff) und MADSEN & THYREGOD (2011 S. 46ff) findet sich eine eingehende Beschreibung des linearen Modells, PINHEIRO & BATES (2000 Kap. 2) liefern sie für das gemischte lineare Modell. Zum linearen Modell zählen MADSEN & THYREGOD (2011 S. 41) die Regressionsanalyse, die Varianzanalyse ANOVA und die Kovarianzanalyse ANCOVA. In der vorliegenden Arbeit werden nur Regressionsanalysen verwendet. Lineare Modelle sind mit strengen Modellvoraussetzungen belegt, die FAHRMEIR et al. (2009 S. 64ff) folgendermaßen benennen:

- voneinander unabhängige und normalverteilte Komponenten der Zufallsvariablen Y
- die unabhängigen Variablen sind in den Parametern linear
- die Fehlervarianzen reagieren nicht auf steigende Werte der abhängigen oder der unabhängigen Variablen sondern sind über deren Wertebereich hinweg konstant (Homoskedastizität) und normalverteilt
- die Residuen unterliegen keinem Trend und sind unkorreliert
- die Residuen verhalten sich additiv in Bezug auf die geschätzten Parameter

Lineare Modelle haben den Vorteil, dass sie sich auf Grund der linearen Beziehung einfach interpretieren lassen. In der vorliegenden Arbeit werden gemischte lineare Modelle mit der Funktion `lme()` aus dem Paket **nlme** (PINHEIRO et al. 2016) berechnet.

3.2.4.2 gemischtes Modell mit logistischer Link-Funktion (GLMM/CLMM)

Das gemischte Modell mit logistischer Link-Funktion wird zunächst für den Fall einer binären abhängigen Variablen beschrieben und anschließend auf den Fall einer mehrkategorialen abhängigen Variablen erweitert.

binäre abhängige Variable (GLMM)

Für binäre Responsevariablen wie z.B. „zwieselig“ und „nicht zwieselig“ wird in dieser Arbeit die logistische Regression verwendet (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 107f, ZUUR et al. 2009 S. 202ff). Das Modell bildet Wahrscheinlichkeiten ab, mit der die beiden Antwortkategorien auftreten. Diese Wahrscheinlichkeiten und der lineare Prädiktor sind über die logistische Responsefunktion η miteinander verknüpft, wobei $\eta = \log(\pi/1-\pi)$. Folgende Gleichung bildet diesen Zusammenhang für ein gemischtes Modell mit k Gruppen für die Zufallsvariable ab:

$$P(Y_{ik} = 1|u_i) = \frac{\exp(\eta_{ik})}{1 + \exp(\eta_{ik})} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, K$$

Formel 3-15: Gleichung für die logistische Link-Funktion im gemischten binären Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt

$P(Y=1|\mu)$: Wahrscheinlichkeit für die Werte der abhängigen Variable bedingt für die Antwortkategorie 1 je nach Wert des Zufallseffekts u , η : logistische Responsefunktion, i : fortlaufender Index für die beobachteten Werte, k : fortlaufender Index für die Gruppen der Zufallseffektsvariable, n : Stichprobenumfang, K : Anzahl der Gruppen des Zufallseffekts.

Die linke Seite der Gleichung steht für die bedingten Auftretenswahrscheinlichkeiten der Kategorie Eins in der k -ten Gruppe des Zufallseffektes u . Die rechte Seite stellt die logistische Responsefunktion dar. Damit wird deutlich, dass mit Hilfe dieser Transformation die geschätzten Wahrscheinlichkeiten im Bereich zwischen 0 und 1 liegen (vgl. Tabelle 3-14) und es einen Schwellenwert zwischen dem Auftreten beider Kategorien gibt. Dieser Schwellenwert hat dieselben Eigenschaften wie der Wendepunkt einer logistischen Funktion mit ihrem sigmoiden Kurvenverlauf (FAHRMEIR 2009 S. 190ff, HEDDERICH & SACHS S. 791). Schreibt man das gemischte binär logistische Modell mit einem Zufallseffekt im Hinblick auf den linearen Prädiktor auf, ergibt sich im Anhalt an MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 107) und AGRETI (2013 S. 494) folgende Gleichung:

$$\text{logit}[P(Y_{ik} = 1|u_i)] = z_{ik}u_k + \sum_1^p x_{ij} \beta_j \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, p \quad k = 1, \dots, K$$

Formel 3-16: allgemeine Gleichung des binären logistischen gemischten Regressionsmodells mit einem Zufallseffekt

$P(Y=1|\mu)$: Wahrscheinlichkeit für die Werte der abhängigen Variable bedingt für die Antwortkategorie 1 je nach Wert des Zufallseffekts u als Logit (lineare Schreibweise vor der Transformation mit der Link-Funktion aus Gleichung 3-15, x : unabhängige Beobachtungen, β : Parameterschätzer für die unabhängigen Variablen, u : Werte des Zufallseffekts, z : Werte der erklärenden Variablen aufgeteilt auf die Gruppen des Zufallseffekts u , i : fortlaufender Index der Messwerte, j : fortlaufender Index der unabhängigen Größen im Modell, k : fortlaufender Index der gruppierenden Zufallseffektsvariable, n : Stichprobenumfang, p : Anzahl der unabhängigen Größen, K : Anzahl an Gruppen der Zufallseffekts-Variable

Es entspricht den logistischen Normalmodellen, die AGRESTI (2013 S. 496) vorstellt. In der vorliegenden Arbeit werden solche Modelle mit Hilfe des R-Pakets **lme4** und der Funktion `glmer()` (BATES 2010, BATES et al. 2015) berechnet.

mehrkategoriale abhängige Variable (CLMM)

Für abhängige Variablen, die aus mehreren Kategorien m bestehen wie z.B. die Qualitätsklassen „sehr gut“, „gut“, „zwieselig“ und „unzureichend“, muss das binäre logistische Modell erweitert werden. Als abhängige Variablen sind in einem CLMM sowohl nominale als auch ordinale Größen denkbar. Inhaltlich geordnete Kategorien können in diesem Zusammenhang auch von stetigen abhängigen Variablen herrühren, die nachträglich in Kategorien eingeteilt und jeweils gemittelt oder mit Medianen versehen werden. Es handelt sich dann um eine latente Variable, die modelliert wird (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 150, AGRESTI 2013 S. 513, HOSMER et al. 2013 S. 297). Hier wird nur der Fall für die logistische Link-Funktion und für ordinale Responsevariablen näher beschrieben. In solch einem multivariaten Modell wird anstelle eines Logits wie im binären Fall für jede der $m - 1$ Kategorien ein eigener Logit modelliert. Es gilt nach MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 149), dass sich die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Kategorien zum Wert 1 aufsummieren. Sie entsprechen der Fläche unter der logistischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Man spricht dann vom kumulativen Schwellenwertmodell (FAHRMEIR et al. 2009 S. 242), dem *cumulative link model*. Es handelt sich um ein parameterarmes Modell, welches zwar für jede Antwortkategorie einen eigenen Interzept benötigt, die Parameter für die festen Effekte jedoch über die Kategorien hinweg gleich sind. Im Endeffekt bedeutet es auch, dass die einzelnen Logits parallel sein müssen. Das ist dann der Fall, wenn das Verhältnis der kumulierten Chancen bei gegebener Antwortkategorie (=

Qualitätsklasse) für ein bestimmtes x nicht von der Kategorie abhängt, sondern gleich ist. Deswegen wird es auch als *Proportional-Odds Modell* bezeichnet (McCULLAGH & NELDER 1990 S. 153, AGRESTI 2013 S. 276). Die folgende Abbildung veranschaulicht diese Zusammenhänge für ein einfaches Modell mit vier Antwortkategorien und einer unabhängigen Variablen x .

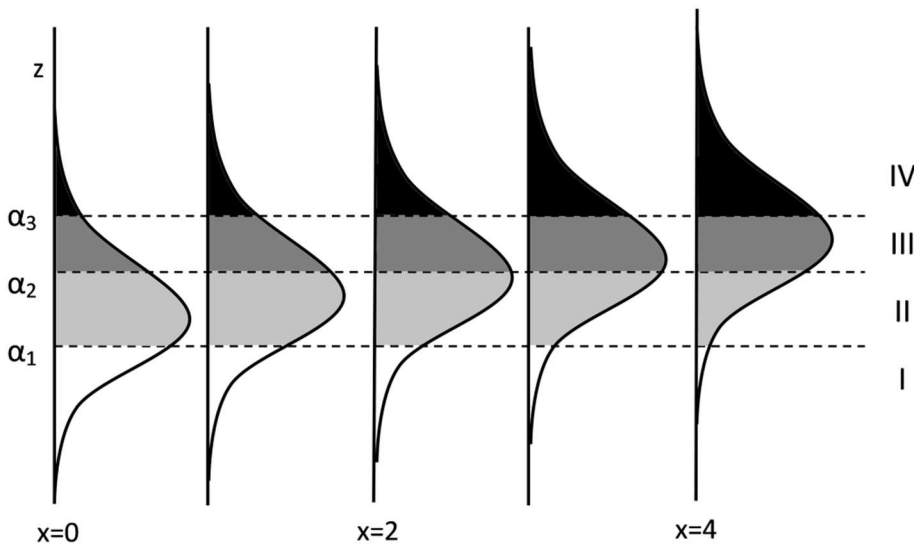


Abbildung 3-8: Darstellung des kumulativen Schwellenwertmodells bei logistischer Link-Funktion (proportional-odds-model) nach McCULLAGH & NELDER (1990 S. 152).

x : Werte einer unabhängigen Variable, z : geschätzte Response-Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1, α =Schwellenwerte mit gestrichelten Linien, römische Ziffern: beobachtete Antwortkategorien (Response) mit Graustufen in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Abgrenzung der Antwortkategorien

Erweitert man das logistische CLM zum gemischten Modell, dem CLMM, kann man die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Responsevariable folgendermaßen notieren:

$$P(Y_{ik} \leq m|u_i) = \frac{\exp(\eta_{ik})}{1 + \exp(\eta_{ik})} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, K \quad m = 1, \dots, M$$

Formel 3-17: Gleichung für die logistische Link-Funktion im gemischten kumulativen Schwellenwertmodell mit einem Zufallseffekt

$P(Y \leq m|\mu)$: Wahrscheinlichkeit für die Werte der abhängigen Variable bedingt für die Antwortkategorie m je nach Wert des Zufallseffekts u , η : logistische Responsefunktion, i : fortlaufender Index für die beobachteten Werte, k : fortlaufender Index für die Gruppen der Zufallseffektsvariable, m : fortlaufender Index für die Antwortkategorien der abhängigen Variable, n : Stichprobenumfang, K : Anzahl der Gruppen des Zufallseffekts, M : Anzahl der Antwortkategorien.

In Logit-Schreibweise ergibt sich analog zum binären logistischen die Gleichung nach MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 152) und AGRETI (2013 S. 514).

$$\text{logit}[P(Y_{ik} \leq m|u_i)] = \alpha_{m-1} + z_{ik}u_k + \sum_1^p x_{ij} \beta_j \quad \begin{array}{ll} i = 1, \dots, n & j = 1, \dots, p \\ k = 1, \dots, K & m = 1, \dots, M \end{array}$$

Formel 3-18: allgemeine Gleichung des kumulativen logistischen Schwellenwertmodells als gemischtes Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt

$P(Y \leq m | \mu)$: Wahrscheinlichkeit für die Werte der abhängigen Variable bedingt für die Antwortkategorie m je nach Wert des Zufallseffekts u als Logit (lineare Schreibweise vor der Transformation mit der Link-Funktion aus Gleichung 3-15, x : unabhängige Beobachtungen, β : Parameterschätzer für die unabhängigen Variablen, u : Werte des Zufallseffekts, z : Werte der erklärenden Variablen aufgeteilt auf die Gruppen des Zufallseffekts, i : fortlaufender Index der Messwerte, j : fortlaufender Index der unabhängigen Größen im Modell, k : fortlaufender Index der gruppierenden Zufallseffektsvariable, m : fortlaufender Index der Anzahl an Antwortkategorien (Response), n : Stichprobenumfang, p : Anzahl der unabhängigen Größen, K : Anzahl an Gruppen der Zufallseffekts-Variable, M : Anzahl der Antwortkategorien

Im Unterschied zum gemischten binären logistischen Modell sind nun m Antwortkategorien eingebaut, für die jeweils $m-1$ Interzepte α geschätzt werden. Die Anstiege sind hingegen über alle $m-1$ Logits gleich.

Für ordinale abhängige Variablen existieren neben dem hier vorgestellten Proportional-Odds-Modell außerdem unter anderem das *Adjacent-Category Modell* und das *Continuation-Ratio Modell* (AGRESTI 2013 S. 286 und S. 289). Das Proportional-Odds-Modell wird in der vorliegenden Arbeit mit dem R-Paket **ordinal** und der Funktion `c1mm()` bzw. `c1mm2()` berechnet (CHRISTENSEN 2015).

3.2.5 Beschreibung der Modellvariablen und der Grundstruktur der Modelle

3.2.5.1 Beschreibung der abhängigen Variablen

Gemischte lineare Modelle werden in der vorliegenden Untersuchung für metrisch skalierte, stetige abhängige Variablen verwendet. Sie sind nachfolgend mit ihrem Wertebereich für den Gesamtdatensatz aufgezählt.

Tabelle 3-15: Auflistung der stetigen abhängigen Variablen mit gesamtem Wertebereich.

abhängige Variablen	Wertebereich
Baumhöhe	1,68-11,70m
Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe	13,5-130,0mm
stärkster Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 0,0 bis 1,5m	7,0-45,5mm
stärkster Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 1,5 bis 3,0m	9,5-62,0mm
stärkster Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 3,0 bis 4,5m	14,0-46,0mm
relativer Durchmesser des stärksten Grünastes (ASIX) nach STRUCK&DOHRENBUSCH (2000)	19,67-73,81
kleinster Astansatzwinkel unter den Grünästen bis maximal 4,5m	15-90°
Astwinkelindex nach HAGEMANN (2005)	8,50-186,00
Schaftanteil ohne Grünäste	0,83-68,45%
Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 0,0 bis 1,5m	0-76
Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 1,5 bis 3,0m	0-43
Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 3,0 bis 4,5m	0-42
Durchmesser des stärksten Totastes	1,0-30,0mm
relativer Durchmesser des stärksten Totastes (ASIX) nach STRUCK&DOHRENBUSCH (2000)	2,89-36,80
Ansatzhöhe des untersten Zwiesels	0,52-6,74m
maximale Stammkrümmung	0,13-15,71cm/m

Modelle, die Zähldaten als Responsevariablen verarbeiten (Poisson-Regressionen, vgl. ZUUR ET AL. 2009 S. 196ff und 199ff, AGRESTI 2013 S. 555ff), wurden für die Anzahl an Steilästen und die Anzahl an Zwieseln mit dem Paket **MASS** und der Funktion `glmPQL()` geprüft (VENABLES & RIPLEY 2002). Außerdem musste die Verteilung der abhängigen Variablen mit der unterstellten Poisson-Verteilung (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 223ff) abgeprüft werden. Dazu bot sich das Paket **vcd** an (ZEILEIS et al. 2007). Die Verteilung entsprach eher einer negativen Binomialverteilung (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 241ff), sodass noch auf die Funktion `glmer.nb()` aus dem Paket **lme4** (BATES et al. 2015) zurückgegriffen wurde. Weil sich jedoch durchweg keine gültigen Modelle bauen ließen, werden diese Variablen dichotomisiert. Von vornherein binäre logistische gemischte Regressionsmodelle werden in dieser Arbeit verwendet, um Erklärungen für das

Verhalten der nachfolgend aufgelisteten Variablen zu finden. Alle mit dem Wert Eins kodierten Merkmalsausprägungen stellen die Referenzkategorie dar.

- Vorhandensein von Steilästen: nicht steilastig (0) oder steilastig (1) (dichotomisierte Zählvariable)
- Vorhandensein von Tiefzwieseln: nicht tiefzwieselig (0) oder tiefzwieselig (1) (dichotomisierte Zählvariable)
- Stammneigung: nicht geneigt (0) oder geneigt (1)
- Schnürigkeit: zweischnürig (0) oder einschnürig bzw. unschnürig (1)

Um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Qualitätsklassen in einem Voranbau zu modellieren, wird das Proportional-Odds-Modell für folgende abhängige Variable verwendet:

- Qualitätsklasse: sehr gut (1), gut (2), zwieselig (3) oder unzureichend (4)

Es handelt sich um eine kategoriale, ordinalskalierte Variable. Die Referenzkategorie ist jeweils die Ausprägung 1 – „sehr gut“. Bei der Datenaggregation (vgl. Abschnitt 3.2.5.3) traten durch die Medianbildung in geringem Umfang „halbe“ Klassenwerte auf. Das Problem wurde durch stringente Abrundung der Werte und Zuschlagen zur nächstniedrigeren Klasse behoben.

3.2.5.2 Beschreibung der Variablen für die festen Effekte

Bei den erklärenden Variablen, die in LMMs und GLMMs verwendet werden, existieren für einen Effekt mehrere unabhängige Größen. So lässt sich der Schirmdruck durch die Grundfläche [m^2/ha] und den Hegyi-Index wiedergeben. Der Seitendruck im Voranbau kann via Standraum der Einzelbuche [m^2], Astindex oder zwei unterschiedlichen Hegyi-Indices in die Modelle einfließen. Und schließlich stehen von den Merkmalen, die den Einzelbaum repräsentieren, neben dem Wurzelhalsdurchmesser die Höhe oder das Alter zur Auswahl. Die unabhängigen Größen werden während der Modellierung in acht festen Varianten miteinander kombiniert, die in der folgenden Übersicht zusammen mit den Wertebereichen für den Gesamtdatensatz dargestellt sind. Wechselwirkungen aus den erklärenden Größen werden in den Modellen nicht geprüft.

Tabelle 3-16: Auflistung der unabhängigen Variablen mit gesamtem Wertebereich und Angabe ihrer Kombination in acht Modellvarianten

unabhängige Variable	Wertebereich	Modellvariante							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Grundfläche [m²/ha]	8,00-61,50	X				X			
Hegyi-Index	4,95-536,7		X	X	X		X	X	X
Standraum [m²]	0,80-5,00*	X				X			
Astindex	0,00-25,76		X				X		
Hegyi-Index (Suchkegel)	0,00-6,61			X				X	
Hegyi-Index (Suchradius)	0,00-4,10				X				X
Wurzelhalsdurchmesser [mm] oder Höhe [m]	13,50-130,00 1,68-11,70	X	X	X	X				
Alter [a]	8-20					X	X	X	X

*bei 5,00m² gekappte Verteilung

In den Fällen, wo eine unterschiedliche Ansatzhöhe eines Merkmals am Baum eine Rolle spielte, wurde sie in die Modelle einbezogen. Das war der Fall jeweils beim relativen Astdurchmesser für den stärksten Grün- bzw. Totast, beim stärksten Totastdurchmesser, beim Astwinkelindex nach HAGEMANN (2005) und bei der maximalen Krümmungsstärke.

Die unabhängigen Variablen, die in das Proportional-Odds-Modell als feste Effekte einbezogen werden, sind der nachstehenden Übersicht zu entnehmen.

Tabelle 3-17: Übersicht der festen Effekte im gemischten Proportional-Odds-Modell (CLMM).

feste Effekte	Skala	Definition Kategorien bzw. Wertebereich		
Alter	kategorial, ordinal	6-10 Jahre	11-15 Jahre	16-20 Jahre
Schirm*	kategorial, ordinal	fehlend	moderat	intensiv
Standraum	stetig, metrisch	0,80m ² bis 5,00m ² **		
Wuchsrichtung*	kategorial, binär	orthotrop	plagiotrop	
Entwicklungsstadium*	kategorial, binär	ohne Dickungsschluss	mit Dickungsschluss	

* Bei der Aggregation der Daten führte die Medianbildung zu „halben“ Werten bei den Klassen. Da dies nur in geringem Umfang der Fall war, wurden bei den drei Variablen die halben Klassenwerte stringent abgerundet.

** Der Wertebereich der Variable „Standraum“ liegt insgesamt zwischen 0,80 und 19,95m². Wegen einer stark rechtsschiefen Verteilung und dadurch lückenhaften Datengrundlage bei hohen Werten sind alle Werte über 5,00m² mit diesem Wert 5,00m² belegt.

3.2.5.3 Beschreibung des Aufbaus der zufälligen Effekte

Zufällige Effekte können in einem gemischten Modell unterschiedlich strukturiert sein und verschiedene Bedeutungen haben. Hier ist der Zufallseffekt als zweistufig geschachtelter Term in die Modelle eingebaut und hat die Funktion, die räumliche Ähnlichkeit in den Daten auch korrekt abzubilden und somit verzerrende räumliche Autokorrelationen aus der Modellschätzung zu eliminieren (FARAWAY 2006 S. 151 und S. 161ff). Er tut dies in Form eines Interzeptes (ZUUR ET AL. 2009 S. 106ff, AGRESTI 2013 S. 491). Die geschätzte Standardabweichung bspw. eines zufälligen Modell-Interzeptes kann als Maß für die Variabilität innerhalb der Population von Anstiegen dienen (AGRESTI 2013 S. 497). Grundsätzlich sind auch Modelle denkbar, in denen zusätzlich mit zufälligen Anstiegen gearbeitet wird (ZUUR ET AL. 2009 S. 109ff). Wie stark die Interzepte der einzelnen Gruppen des Zufallseffektes um den Populationsmittelwert streuen, wird mit der dafür geschätzten Standardabweichung \widehat{sd} (ZUUR ET AL. 2009 S. 107) im Ergebnisteil angegeben.

Die Daten liegen in der vorliegenden Arbeit mehrfach hierarchisch gestuft vor. Die folgende Abbildung gibt diese räumliche Abfolge an. Sie ist eine Zusammenfassung des Versuchsdesigns, wie es in den Abschnitten 3.1.1. und 3.1.2 beschrieben ist.

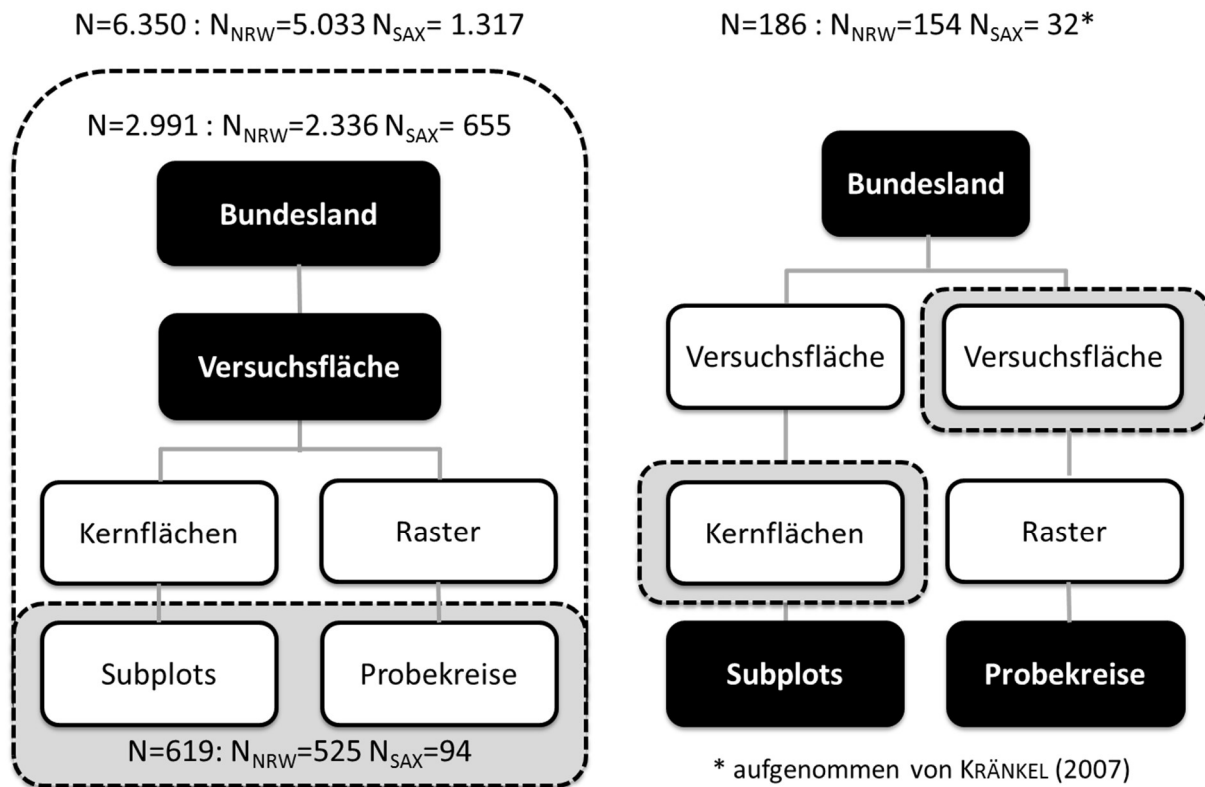


Abbildung 3-9: Darstellung der Datenhierarchie in Bezug auf die räumliche Dimension der Versuchsdesigns für den Zufallseffekt mit Angabe des Stichprobenumfangs getrennt für die Bundesländer NRW und SAX.

links: Auswertung der Gesamtmorphologie, rechts: Modellierung von einzelnen Qualitäts- und Wachstumsmerkmalen, schwarz: Komponenten des Zufallseffekts im jeweiligen Modell, weiß: nicht in den Zufallseffekt einbezogene räumliche Einheiten, grau: räumliche Ebene für die Aggregation (links) bzw. die Koordinaten (rechts), gestrichelt weiß: verwendbares Datenvolumen nach dem Filtern auswertbarer Individuen

Für die Auswertung der flächenhaften Qualitätsklassenverteilung (linke Grafik) ist es notwendig, die Daten auf der untersten Hierarchieebene zu aggregieren. Für alle im Modell verwendeten Aufnahme Größen müssen für jeden Probekreis bzw. für jeden Subplot mittlere Werte gebildet werden. Dies geschieht je nach Werteskala über Mediane⁹ bzw. Mittelwerte. Damit wird erreicht, für die unterste Ebene des Zufallseffektes Wiederholungen in ausreichender Anzahl bereitzustellen sodass massive Inferenzprobleme bei der Modellierung vermieden werden. Dieses Vorgehen wird auch im geschachtelten Versuchsdesign von WEIDIG (2016 S.38) angewendet.

Der Teil der Analyse, der sich mit einzelbaumbezogenen Qualitätsmerkmalen beschäftigt (rechte Grafik), kommt ohne Aggregation der Daten aus. Für jeden

⁹ Wenn bei der Medianbildung keine ganzzahligen Werte sondern „halbe“ Klassenwerte resultierten, wurden sie generell auf die nächstniedrigere Klasse abgerundet.

Baum liegen in der dritten Hierarchieebene „Kernfläche“ und „Raster“ Koordinaten vor. Mit Hilfe dieser Lageangaben können die euklidischen Abstände der Bäume untereinander bestimmt und mit einer Korrelationsfunktion im Modell abgeprüft werden (PINEIRO & BATES 2000 S. 226f).

Ein ähnliches Vorgehen ist bei HAMM et al. (2014) und WEIDIG (2016 S. 43f) zu finden. Die erstgenannten Autoren wendeten gemischte Modelle an, um für Wachstumsparameter von Weißtannensämlingen den Varianzbeitrag der unterschiedlichen Probestellen ermitteln zu können. Das primäre Interesse liegt in ihrer Arbeit dabei auf der Untersuchung der Wachstumsparametern Sprosslänge und Trockenmasse.

3.2.5.4 Beschreibung der Modellgrundstruktur

Nachfolgend werden beispielhaft Modellgrundgleichungen angegeben, die den Aufbau und die einzubeziehenden Variablen verdeutlichen sollen.

Die Modelle, die auf Einzelbaumebene arbeiten, lassen sich wie folgt notieren, wobei β die zu schätzenden Parameter für die erklärenden Variablen in Form von festen Effekten darstellt, u den Parameter für die hierarchisch geschachtelten Zufallseffekte und ϵ den Fehlerterm. Der Index k bezeichnet die einzelnen Stufen des Vektors „Bundesland“, der Index l die Stufen des Vektors „Kernflächen.Versuchsfläche in Bundesland“ und der Index i die Einzelbeobachtung. Das erste Modell beinhaltet vier feste Effekte, das zweite drei.

$$\begin{aligned} ASIX_{grün} = & \beta_{0kl} + \beta_{1kl}(\text{Hegyi Schirm}) + \beta_{2kl}(\text{Hegyi Seitendruck Suchkegel}) + \beta_{3k}(\text{Alter}) \\ & + \beta_{4k}(\text{Astansatzhöhe}) \\ & + u_k(\text{Bundesland}) + u_{kl}(\text{Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland}) + \epsilon_{kli} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{stärkster Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 3,0 bis 4,5m} \\ = & \beta_{0kl} + \beta_{1kl}(\text{Hegyi Schirm}) + \beta_{2kl}(\text{Hegyi Seitendruck Suchkegel}) \\ & + \beta_{3kl}(\text{Höhe}) \\ & + u_k(\text{Bundesland}) + u_{kl}(\text{Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland}) + \epsilon_{kli} \end{aligned}$$

Formel 3-19: Beispiele für die zu schätzenden Modellgleichungen stetiger Variablen

β : zu schätzende Parameter, u : Werte des Zufallseffekts, ϵ : Fehlerterm (Residualstreuung), k : fortlaufender Index für die Werte der ersten räumlichen Hierarchieebene des Zufallseffekts, l : fortlaufender Index für die Werte der zweiten räumlichen Hierarchieebene des Zufallseffekts, i : fortlaufender Index für die Einzelbeobachtungen

Das Modell für die Schätzung der Qualitätsklassenwahrscheinlichkeiten hat folgende Struktur:

Qualitätsklasse

$$\begin{aligned} &= \beta_{0i} + \beta_{1k}(\text{Altersstufe}) + \beta_{2k}(\text{Altbaumnähe}) + \beta_{3k}(\text{Standraum}) \\ &+ \beta_{4k}(\text{Wuchsrichtung}) + \beta_{5k}(\text{Entwicklungsstadium}) \\ &+ u_k(\text{Subplot.Probekreis}) + \epsilon_{ki} \end{aligned}$$

Formel 3-20: Beispiel für die zu schätzende Modellgleichung der Gesamtmorphologie (Qualitätsklasse)

β : zu schätzende Parameter, u : Werte des Zufallseffekts, ϵ : Fehlerterm (Residualstreuung), k : fortlaufender Index für die Werte des Zufallseffekts, i : fortlaufender Index für die Einzelbeobachtungen

Im Qualitätsmodell kann kein geschachteltes Versuchsdesign mit Bundesland und Versuchsfläche in Bundesland abgebildet werden, obwohl die Daten so vorliegen. Die verwendete Auswertefunktion `clmm()` bzw. `clmm2()` lässt keinen zweistufigen Zufallseffekt zu. Daher bezeichnet der Index i die einzelnen Stufen des Vektors. „Subplots.Probekreis“ und der Index k die Einzelbeobachtung.

3.2.6 Überprüfung der Modelle und Modellvergleich zur Auswahl des Endmodells

3.2.6.1 Überprüfung der Modelle auf Einhaltung der Modellvoraussetzungen

Alle berechneten Modelle müssen dahingehend überprüft werden, ob die Modellvoraussetzungen eingehalten werden (ZUUR et al. 2009 S. 19). Bei den Modellen für Einzelbaummerkmale ist das für jede der acht Modellvarianten durchzuführen, bevor aus ihnen das Endmodell ausgewählt werden kann. Um welche Überprüfungen es sich je Modelltyp handelt, enthält die folgende Tabelle:

Tabelle 3-18: Übersicht über die Aspekte für die Modellüberprüfung getrennt nach Modelltypen.

Aspekte für eine Modellüberprüfung	LMM	GLM binär	CLMM
Sind fehlende Werte oder schwach besetzte Kovariatenstrukturzellen in den Daten vorhanden?	X	X	X
Weichen die bivariaten Beziehungen zwischen der abhängigen Variablen und den unabhängigen Variablen stark von der linearen Form ab?	X	X	X
Sind die Modellresiduen normalverteilt?	X		
Bleibt die Varianz der Modellresiduen über die unabhängigen Werte hinweg gleich (Homoskedastizität)?	X		
Sind die Modellresiduen von ihrer räumlichen Position unabhängig?	X		
Verlaufen die Logits der einzelnen Responsekategorien parallel zueinander?			X
Wie stark sind die unabhängigen Größen im Modell untereinander korreliert?	X	X	X

Die folgenden Ausführungen enthalten Erläuterungen zu den einzelnen Gesichtspunkten.

Prüfung auf fehlende Werte, schwach besetzte Kovariatenstrukturzellen

Wenn in einem Datensatz einzelne Werte fehlen, ist mit den verwendeten Funktionen keine Modellierung möglich. Deswegen erhielt die R-Syntax für die Modelle den Zusatz `na.action = na.omit`. Dieser Befehl schließt bei der Modellierung Datenzeilen mit fehlenden Werten aus (HARRELL 2001 S. 49).

Bei kategorialen Responsevariablen wie der Qualitätsklassen müssen zunächst für die kategorialen unabhängigen Variablen mit Hilfe von Kreuztabellen die Belegungshäufigkeiten der Responsevariable nach Stufen dieser unabhängigen kategorialen Variablen auf gering besetzte Zellen oder Nullzellen hin untersucht werden. Das dient als Anhaltspunkt, Variablen von der Modellierung von vornherein auszuschließen oder Klassen der abhängigen Variablen zusammenzufassen (HOSMER et al. 2013 S. 90).

Prüfung der bivariaten Beziehungen zwischen abhängiger und unabhängigen Größen

Unverzerrte Schätzwerte enthalten Modelle unter anderem dann, wenn die bivariaten Beziehungen zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen korrekt einbezogen wird (ZUUR et al. 2009 S. 21). Dies geschieht in der vorliegenden Arbeit für LMMs visuell mit Hilfe von bivariaten Punktwolken. Das **car**-Paket FOX & WEISBERG (2011) bietet mit der Funktion `scatterplotMatrix()` die Möglichkeit, Glättungskurven und den linearen Ausgleich in die Diagramme zu projizieren. Zweck ist es, eine ggf. notwendige Transformation der unabhängigen Variablen zu erkennen (FARAWAY 2009 S. 18f, ZUUR et al. 2009 S. 21). Handelt es sich um eine exponentiellen Verlauf oder weichen einzelne Punkte stark von der Hauptpunktwolke ab, kann die erklärende Größe logarithmiert werden, um die Linearität der Beziehung herzustellen oder zu verbessern (ZAR 2010 S. 287ff). Weist die Punktwolke die Form einer Parabel auf, wird für die abhängige Variable das Polynom zweiten Grades gebildet (ZAR 2010 S. 463f). Die abhängigen Größen werden nicht transformiert, weil sonst die Interpretation der erzielten Modellparameter darunter leidet. Stattdessen empfehlen ZUUR et al. (2009 S. 31) gemischte Modelle anzuwenden. Wenn ein automatisiertes Suchen der besten Transformation der abhängigen Variablen via Box-Cox-Methode verwendet würde, bestünde die Gefahr, dass mit der dann erzielten besten Modellanpassung keine inhaltlich plausible Theorie mehr hinter dem Modell stünde (FARAWAY 2006 S. 18f). Bei GLMMs für Binärdaten und bei CLMMs ist ein anderes Vorgehen geboten. Die bivariaten Beziehungen sind nur auf der Ebene der Logits¹⁰ auf Linearität überprüfbar und nicht für die binären Werte der abhängigen Variablen. Weil bei CLMMs die Linearität in allen Logits der mehrstufigen abhängigen Variablen zu überprüfen ist, bietet sich die Rekodierung in binäre Variablen an (HOSMER et al. 2013 S. 308). Nachstehende Übersicht fasst diese beispielhaft für die Variable „Qualitätsklasse“ zusammen:

¹⁰ In ordinalen Proportional-Odds-Modell wird für jede der m-1 Antwortkategorien ein eigener Logit ermittelt. Es handelt sich dabei um die noch nicht mit der logistischen Link-Funktion transformierten geschätzten Werte.

Tabelle 3-19: Übertragung der vierstufigen Qualitätsvariable in eine vollständige Binärkodierung

Qualitätsklasse mehrstufig	Qualität binär (a)	Qualität binär (b)	Qualität binär (c)
1 sehr gut	0	0	0
2 gut	1	0	0
3 zwieselig	1	1	0
4 unzureichend	1	1	1

HOSMER & LEMESHOW (2000 S. 97) beschreiben drei Überprüfungsverfahren: (i) die grafische Darstellung via geglätteter lokaler Regressionen (Lowess-Smoother) der jeweiligen Kovariate gegen die abhängige Variable, (ii) Kategorisierung der stetigen abhängigen Variablen und Berechnung der Logit-Werte oder (iii) die Methode der fraktionalen Polynome. In einer neueren Auflage beziehen die Autoren auch die Technik der Splines ein (HOSMER et al. 2013 S. 105f). In dieser Arbeit wird die Methode der fraktionalen Polynome angewendet. Es handelt sich dabei um univariate Modelle zwischen den Kovariablen und der abhängigen Variablen, die sich im Exponent des festen Effekts unterscheiden (HOSMER & LEMESHOW 2000 S. 99ff). Die Exponenten entstammen der Menge $\wp = \{-2; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 2; 3\}$ wobei $p=0$ den Logarithmus der Variable bildet. Diese Exponenten werden sowohl einzeln ($J=1$) als auch in Zweierkombinationen ($J=2$) geprüft. Obwohl mehrere Exponenten und höhere Kombinationen denkbar sind, werden mit der obigen Auswahl den Autoren zufolge passende Ergebnisse erzielt. Anhand der Exponentenmenge sind dann mit $J=1$ acht und mit $J=2$ 36 Modelle zu berechnen. Für ein $J=1$ -Modell bzw. $J=2$ -Modell lässt sich der lineare Prädiktor im Anhalt an HOSMER & LEMESHOW (2000 S. 101) wie folgt notieren:

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 x^{p_1} + \varepsilon_i \quad J = 1$$

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 x^{p_1} + \beta_2 x^{p_2} \log(x) + \varepsilon_i \quad J = 2$$

Formel 3-21: allgemeine Gleichung für den linearen Prädiktor bei fraktionalen Polynomen nach HOSMER & LEMESHOW (2000 S. 101).

β : zu schätzender Parameter für eine unabhängige Variable, x : unabhängige Variable, p_1 und p_2 : Exponent 1 und 2 aus der Menge \wp zur Transformation der unabhängigen Variablen, ε : Fehlerterm (Residualstreuung), i : fortlaufender Index für die Einzelbeobachtung, $g(\mu)$: Link-Funktion, J : Transformationsvariante

Mit Hilfe von Likelihood-Ratio-Tests wird anhand der X^2 -verteilten Testgröße aus den 42 Modellen dasjenige mit der signifikant geringsten Devianz bestimmt. Entsprechend den Autoren wird schrittweise vorgegangen und zuerst das beste $J2$ -

Modell (dasjenige mit der kleinsten Devianz unter den J2-Modellen) gegen das lineare Modell getestet. Bei Nichtsignifikanz wird die Kovariate als linear angenommen. Ist der Test signifikant, wird mit gegen das beste J1-Modell getestet. Das Modell mit zwei Termen wird dann verworfen und durch das beste Modell mit nur einem Term ersetzt (J1), wenn dieser Test nicht signifikant ist. In R kann diese Überprüfung mit dem Paket **mfp** und der Funktion `mfp()` von AMBLER, G. (orig.) & BENNER, A. (modif.) (2015) erfolgen, allerdings müssen die Modelle als GLM ohne Zufallseffekt formuliert werden. Im Anhalt an HOSMER & LEMESHOW (a.a.O.) muss in dieser Arbeit das Ergebnis dieser Prozedur verworfen werden, wenn bei der multivariablen Modellierung (Modellvarianten eins bis acht) keine Konvergenz erzielbar ist. In solchen Fällen wird die jeweilige Kovariable als linear im Logit in das Modell einbezogen.

Prüfung auf normalverteilte Residuen (LMM)

Bei der klassischen linearen Normalregression werden normalverteilte Residuen als Abbild einer normalverteilten Zufallsvariable Y , der Response, unterstellt (FAHRMEIR et al. 2009 S. 62, ZAR 2010 S. 336). Abweichungen von dieser Voraussetzung werden oft als nicht problematisch eingestuft, sodass kleinere Abweichungen tolerabel sind (ZUUR et al. 2009 S. 19f, ZAR 2010 S. 337). Insbesondere fehlen bei ökologischen Daten Wiederholungen bei gleichen Werten der unabhängigen Variablen, sodass die genau dorthin greifende Voraussetzung gar nicht prüfbar ist (ZUUR et al. 2009 S. 20). Man ist sich allerdings darin einig, dass echte Ausreißer zum Problem werden (ZUUR et al. 2009 S. 19f, ZAR 2010 S. 337). Ob solche Ausreißer vorliegen und damit die Abweichung von der Normalverteilungsannahme zu stark war, wurde in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe von Quantile-Quantile-Plots, kurz QQ-Plots durch den Befehl `qqnorm()` überprüft (PINHEIRO & BATES 2000 S. 179). Damit werden die Quantile der Modellresiduen mit denen einer Normalverteilung grafisch verglichen. Liegen die Punkte nahezu auf der 45°-Winkelhalbierenden des Koordinatensystems, handelt es sich um die gleiche Verteilungsform (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 454f). Die QQ-Plots für die Einzelbaum-Modelle aus der vorliegenden Untersuchung sind nicht von starken Abweichungen bzw. deutlichen Ausreißern betroffen.

Prüfung auf heteroskedastische Residuen (LMM)

Bei linearen gemischten Modellen muss sichergestellt sein, dass sich die Residuen mit ansteigenden geschätzten Werten der abhängigen Variablen nicht vergrößern, weil dies sonst massive Verzerrungen der Parameter hervorruft (FAHRMEIR et al. 2009 S. 61, ZUUR et al. 2009 S. 20, ZAR 2010 S. 336). In der vorliegenden Arbeit wird der Sachverhalt grafisch anhand von Residuenplots geprüft (PINHEIRO & BATES 2000 S. 178f, ZUUR et al. 2009 S. 84f), wie die folgende Abbildung beispielhaft zeigt.

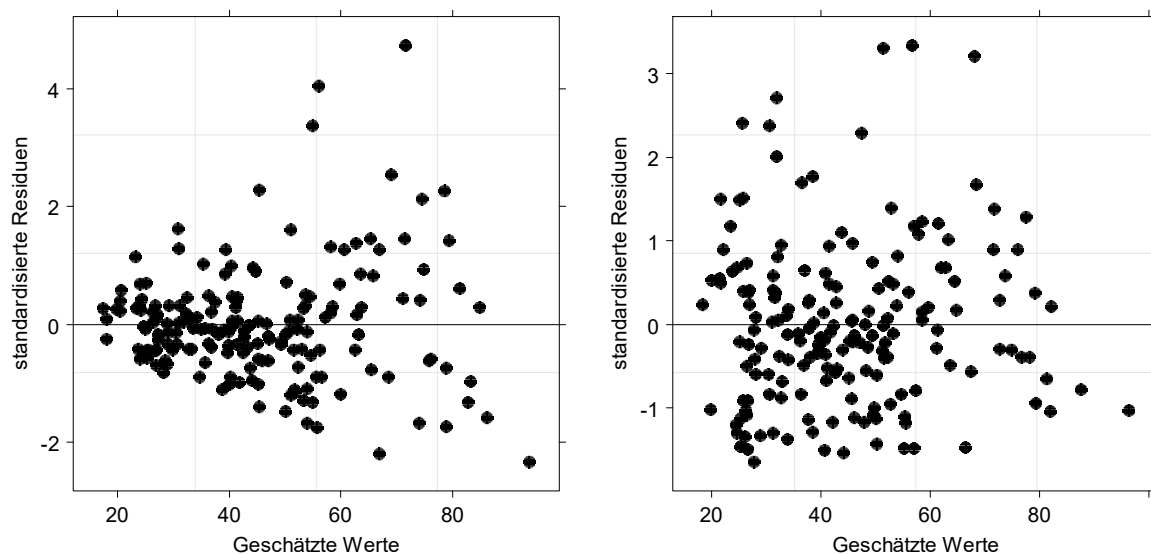


Abbildung 3-10: Beispieldarstellung für heteroskedastische (links) und homoskedastische (rechts) Residuen.

Beispiel aus den Daten.

Das zu prüfende Modell wird dabei mit der Varianzfunktion `varPower()` aus dem Paket **nlme** (PINHEIRO & BATES S. 206ff) als Gewicht erweitert. Die Residuenplots beider Modelle sind dann ein Hilfsmittel um festzustellen, ob die Varianzfunktion als zusätzlicher Modellparameter notwendig ist. Neben dem grafischen Vergleich werden die Befunde in der vorliegenden Untersuchung mit einem Likelihood-Ratio-Test über den `anova()`-Befehl statistisch abgesichert.

Prüfung auf räumliche Autokorrelation der Residuen (LMM)

Bei linearen gemischten Modellen müssen etwaige Autokorrelationen der Residuen ausgeschlossen werden (HURLBERT 1984), insbesondere dann, wenn im Modell kein Parameterschätzer einer Wachstumsgröße vorhanden ist, der die räumlichen

Abhängigkeiten auffängt (WAGNER 2016). Das betrifft in dieser Arbeit die Modellvarianten fünf bis acht, in denen anstelle des Wurzelhalsdurchmessers oder der Höhe das Alter einbezogen wird. Für diese Modelle besteht Handlungsbedarf, wenn die Modellresiduen, geordnet nach der räumlichen Entfernung untereinander, einem unerwünschten Trend folgen. Dann können die Probanden einer Fläche nicht mehr als stochastisch unabhängige Wiederholungen gelten, sodass eine wesentliche Modellvoraussetzung verletzt ist (ZUUR et al. 2009 S. 21 und S. 161ff).

Im Paket **nlme** (PINHEIRO et al. 2016) stehen neben anderen die Befehle `corExp()` bzw. `corGaus()` bereit, um solche Probleme zu beheben. Über spezielle Plots als grafische Hilfsmittel ist es möglich, Einblick in etwaige räumliche Autokorrelation der Residuen zu gewinnen. Zusätzlich wird in der vorliegenden Arbeit mit einem Likelihood-Ratio-Test über den `anova()`-Befehl untersucht, ob sich das zu prüfende Modell signifikant vom Modell mit einbezogener Korrelationsfunktion unterscheidet. Ist dieser Test signifikant, wird die spezielle Korrelationsstruktur im Modell beibehalten. Das Vorgehen ist bei PINHEIRO & BATES (2000 S. 232ff) und ZUUR et al. 2009 (S. 164ff) beschrieben. In der neueren waldbaulichen Forschung arbeiteten HAMM et al. (2014) und WEIDIG (2016 S.43f) mit dem Werkzeug der speziellen Korrelationsstrukturen.

Die speziellen Grafiken bedürfen an dieser Stelle einer näheren Erklärung. Man unterscheidet bei den grafischen Werkzeugen zwischen Semivariogrammen und Korrelogrammen. Semivariogramme sind der Geostatistik entlehnte Werkzeuge, mit denen die Varianz als räumlicher Prozess in Abhängigkeit von der Position im Raum oder der Ebene abbildbar ist (DALE 2006 S. 72). Man erstellt sie mit dem Befehl `plot(Variogram())` aus dem Paket **nlme** nach (PINHEIRO & BATES 2000 S. 244ff). In der vorliegenden Arbeit wird bis in eine Distanz von 50m die räumliche Autokorrelation überprüft. Die hier verwendeten Korrelogramme bilden eine nichtparametrische Kovarianzfunktion mit 95%-Konfidenzintervallen einer Bootstrapschätzung ab. Die Kovarianz selbst hängt in dieser Schätzung nur von der Distanz der Bäume untereinander und nicht von der Richtung ab, in der sie zueinander stehen. Sie unterstellt normalverteilte Daten (BJØRNSTAD & FALCK 2001). Die nichtparametrischen Korrelogramme werden mit dem Befehl `plot.spline.correlog()` aus dem Paket **ncf** (BJØRNSTAD 2016) erzeugt, wie es bei ZUUR et al. (2009 S. 479ff) beschrieben ist. Die folgenden beiden Grafiken veranschaulichen beide Techniken.

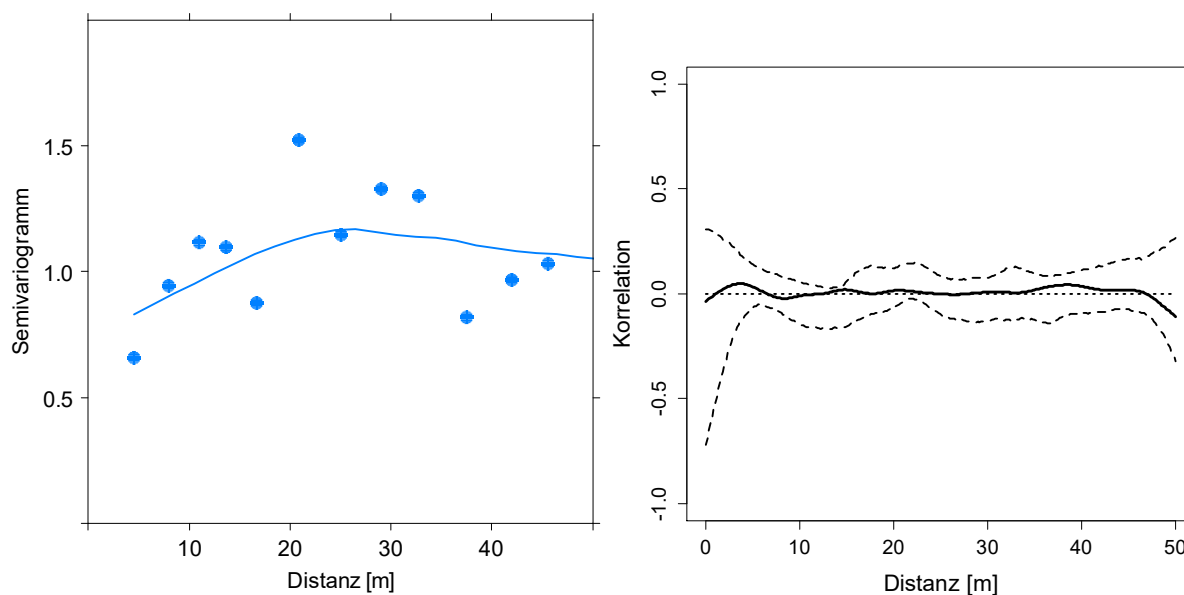


Abbildung 3-11: Beispieldarstellung für räumlich unkorrelierte Residuen

links: Semivariogramm, rechts: Korrelogramm, x-Achse: Horizontaldistanz [m], Beispiele aus den Daten

Eine räumliche Autokorrelation ist im Semivariogramm dann erkennbar, wenn nahe gelegene Bäume in ihrer Streuung kaum variieren und diese Variation bei weiterer Entfernung stark ansteigt (ZUUR et al. 2009 S. 165). Das Korrelogramm liefert in einem solchen Fall eine Kovarianzfunktion, die bei kleiner Distanz stark positiv ist und mit weiterer Entfernung abfällt. Wie die Überprüfungen in dieser Arbeit ergeben, arbeitet der Zufallsterm in den Einzelbaummodellen (vgl. Abschnitt 5.2.5.3) so treffsicher, dass keine speziellen Korrelationsstrukturen einbezogen werden müssen.

Prüfung auf parallel verlaufende Logits (CLMM)

Für ein Proportional-Odds-Modell muss die Annahme geprüft werden, ob die $m-1$ Logits für eine Responsevariable mit m Kategorien parallel verlaufen (vgl. Abschnitt. 3.2.4.2). Eine geeignete Prüfroutine ist in den verwendeten Programmpaketen nicht implementiert (ANONYMUS 2016). Aus diesem Grund wird auf die grafische Methode von Harrell (2001 S. 335f) zurückgegriffen. Für jeden Logit des mehrkategorialen Modells wird eine binäre logistische Regression berechnet, jeweils mit jeder unabhängigen Variablen. Anschließend werden die miteinander verrechneten Interzepte grafisch dargestellt. Eine nähere Beschreibung des rechnerischen Vorgehens liefern ANONYMUS (2016). Wenn die Koeffizienten näherungsweise denselben Ordinatenwert aufweisen und möglichst

auf einer gedachten senkrechten Linie liegen, ist die Parallelitätsforderung nicht verletzt, wie in der folgenden Abbildung für das Qualitätsmodell dieser Arbeit ersichtlich ist.

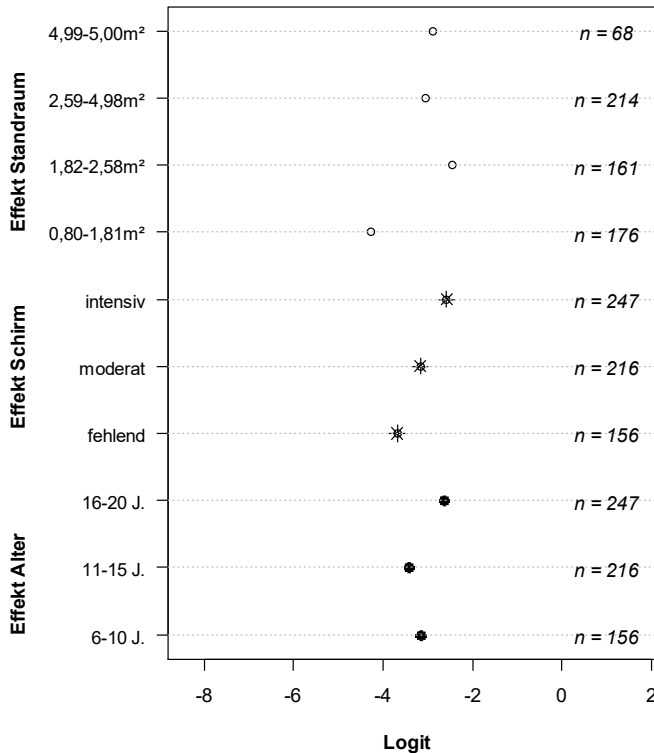


Abbildung 3-12: Darstellung paralleler Logits im kumulativen Schwellenwertmodell.

Angabe der Werte aus den Daten.

Eine weitere Möglichkeit wäre, das Modell ohne Parallelitätsforderung als multinomiales Modell zu berechnen und mit dem Proportional-Odds-Modell zu vergleichen (HOSMER & LEMESHOW 2000 S. 305). Dies wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt. Wenn die Parallelitätsannahme nicht zuträfe, könnten nach HOSMER et al. (2013 S. 309) ein partiell paralleles Modell, ein multinomiales Modell oder separate binäre Modelle berechnet werden. Würden für $m-1$ Antwortkategorien separate Modelle berechnet, könne der ordinale Charakter der abhängigen Variablen erhalten werden (HOSMER et al. a.a.O.).

Prüfung auf Kollinearität der unabhängigen Variablen

Erklärende Variablen sind dann kollinear, wenn eine Variable die Information einer anderen oder mehrerer anderer unabhängigen Variablen enthält, die nicht

voneinander zu trennen ist. Idealerweise stehen die Vektoren der Designmatrix¹¹ orthogonal aufeinander und sind damit nicht kollinear, was in empirischen Daten meist nicht vorkommt (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 75, MADSEN & THYREGOD 2011 S. 64f, DORMANN et al. 2012, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 771). Die unabhängigen Variablen dürfen in einem multiplen Regressionsmodell aber nicht zu stark linear miteinander verbunden sein, weil andernfalls die geschätzten Parameterwerte mit hohen Standardfehlern belegt sind und es zu verminderter Teststärke der Hypothesentests kommen kann (HARRELL 2001 S. 64, DORMANN et al. 2012). Es handelt sich dann um ein instabiles Modell, welches geringfügige Änderungen mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen quittiert (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 78f, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 771). Insbesondere Modellvorhersagen anhand von Daten, die über den ursprünglichen Wertebereich hinausgehen bzw. denen andere Kollinearitätsstrukturen innewohnen, sind dann nicht verlässlich (DORMANN et al. 2012). Aus diesem Grund muss das Ausmaß an Kollinearität bei der Modellierung geprüft werden (ZUUR et al. 2010).

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Hilfsmittel herangezogen, um Kollinearität festzustellen. Für die erklärenden Variablen werden zum einen die paarweisen Korrelationskoeffizienten berechnet (LMMs) und zum anderen die Varianzinflationswerte (VIF) bestimmt (LMMs, GLMMs).

Der Korrelationskoeffizient r ist „...ein dimensionsloses Maß für die Stärke des Zusammenhangs zweier Zufallsvariablen...“ (HEDDERICH & SACHS 2016 S. 309), liegt zwischen minus eins und plus eins und wird nach der Definition der Autoren wie nachstehend berechnet. Dabei ist σ die Varianz, X und Y bedeuten jeweils eine Zufallsvariable.

$$r_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X * \sigma_Y}$$

Formel 3-22: Berechnungsvorschrift für den Korrelationskoeffizienten r nach HEDDERICH & SACHS (2016)

r : Korrelationskoeffizient, σ : Varianz, X: Zufallsvariable 1, Y: Zufallsvariable 2

In der vorliegenden Untersuchung können die Werte der Korrelationsmatrix dem Modelloutput entnommen werden.

Der Varianzinflationsfaktor VIF ist nach HARRELL (2001 S. 65) und HEDDERICH &

¹¹ Die Designmatrix beinhaltet nach FAHRMEIR et al. (2009 S. 61) die Einzelbeobachtungen (Daten) zu allen im Modell geschätzten Parametern. Die erste Spalte enthält daher in jeder Zeile den Wert eins für den Interzept.

SACHS (2016 S. 771) als ein Maß definiert, welches das Bestimmtheitsmaß R aus Regressionen der unabhängigen Variablen verwendet, wobei eine erklärende Größe durch die verbleibenden Regressoren geschätzt wird. Die genannten Autoren nennen folgende Formel zur Berechnung:

$$VIF_{j_r} = \frac{1}{1 - R_{j_s}^2} \quad j = \{1, \dots, p\} \quad \begin{matrix} j_s \in j \\ j_r \in j \\ j_r \notin j_s \end{matrix}$$

Formel 3-23: Berechnungsvorschrift für den Varianzinflationsfaktor (VIF)

VIF: Varianzinflationsfaktor, R: Bestimmtheitsmaß der geschätzten Regression, j: fortlaufender Index der unabhängigen Variablen, p: Anzahl der unabhängigen Variablen, j_r: ausgewählte unabhängige Variable, j_s: Teilmenge der unabhängigen Variablen ohne die ausgewählte Variable j_r

In der vorliegenden Untersuchung werden die VIF-Werte für LMMs mit dem R-Paket **car** und der Funktion `vif()` (FOX & WEISBERG 2011) berechnet. Bei GLMMs muss diese Funktion anhand von weiteren Funktionen (FOX 2014) zu `vif.lme()` erweitert werden (FRANK 2016), um für diese Modelltypen anwendbar zu sein. Bei den GLMMs wird der VIF-Wert getrennt für den einen Logit, bei CLMMs für m-1 Logits berechnet. Die Grenzwerte, ab wann eine unabhängige Variable zu viel Information aus den anderen erklärenden Größen enthält, sind in der vorliegenden Arbeit mit $r_{xy} \geq 0,7$ und mit $VIF_i > 3$ gewählt (ZUUR et al. 2010, DORMANN et al. 2012).

DORMANN et al. (2012) geben zu bedenken, dass bei hohen Werten des paarweisen Korrelationskoeffizienten nicht unbedingt Multikollinearität vorliegen muss. Folglich können damit auch geringe VIF-Werte verbunden sein. In der vorliegenden Arbeit werden darauf aufbauend drei Typen von Kollinearität unterschieden.

Tabelle 3-20: Übersicht über die Typen von Multikollinearität mit Definition und Beschreibung.

Eingrenzung über den paarweisen Korrelationskoeffizienten und den VIF-Wert

Kollinearitätstyp	paarweiser Korrelationskoeffizient	VIF-Wert	Beschreibung
Typ a)	< 0,7	≤ 3	Multikollinearität ist vernachlässigbar gering
Typ b)	≥ 0,7	≤ 3	Multikollinearität ist vernachlässigbar gering, trotz vorliegender Korrelation
Typ c)	≥ 0,7	> 3	Multikollinearität überschreitet das tolerierbare Maß

Das bedeutet, dass hier nur solche Modelle als Endmodelle ausgewählt werden (vgl. Abschnitt 3.2.6.2), die den Typen a) oder b) entsprechen.

3.2.6.2 Auswahl des Endmodells

Als Endmodell wird in dieser Arbeit ein Modell verstanden, das die jeweiligen Modellvoraussetzungen erfüllt. Daher scheiden Modelle von vornherein aus, bei denen während der Modellierung Konvergenzwarnungen auftreten. Bei den Modellen zu den Einzelbaummerkmalen erfolgt die Auswahl des Endmodells aus den acht Grundtypen (vgl. Tabelle 3-16). Das Modell mit dem niedrigsten AIC-Wert ist das vorläufige Endmodell. Die Rangfolge wird dann angepasst, sobald das in Rede stehende Modell dem Kollinearitätstyp c) angehört. Das Endmodell ist schlussendlich jenes, welches den niedrigsten AIC-Wert bei gleichzeitig passendem Kollinearitätstyp a) oder b) aufweist.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse zum Auftreten von kronen- und stammformbasierten Qualitätsklassen

4.1.1 Gemeinsame Ergebnisse für die Regionen Nordrhein-Westfalen und Sachsen

Im folgenden Absatz wird versucht, eine Antwort auf die Frage zu finden, unter welchen Bedingungen vermehrt sehr gute und gute Bäume im Voranbau zu finden sind. Dazu dient zuerst die grafisch-deskriptive Methode, mit welcher die Häufigkeitsverteilung der Qualitätsklassen den untersuchten Einflussfaktoren Alter, Altbaumnähe und Standraum gegenübergestellt wird. Letztere Variable ist zu diesem Zweck in die vier Klassen „sehr gut“, „gut“, „zwieselig“ und „unzureichend“ eingeteilt. Die Skala endet bei 5,00m² weil Bäume mit einem größeren Standraum alle den Wert 5,00 zugeteilt bekamen (vgl. Tabelle 3-17).

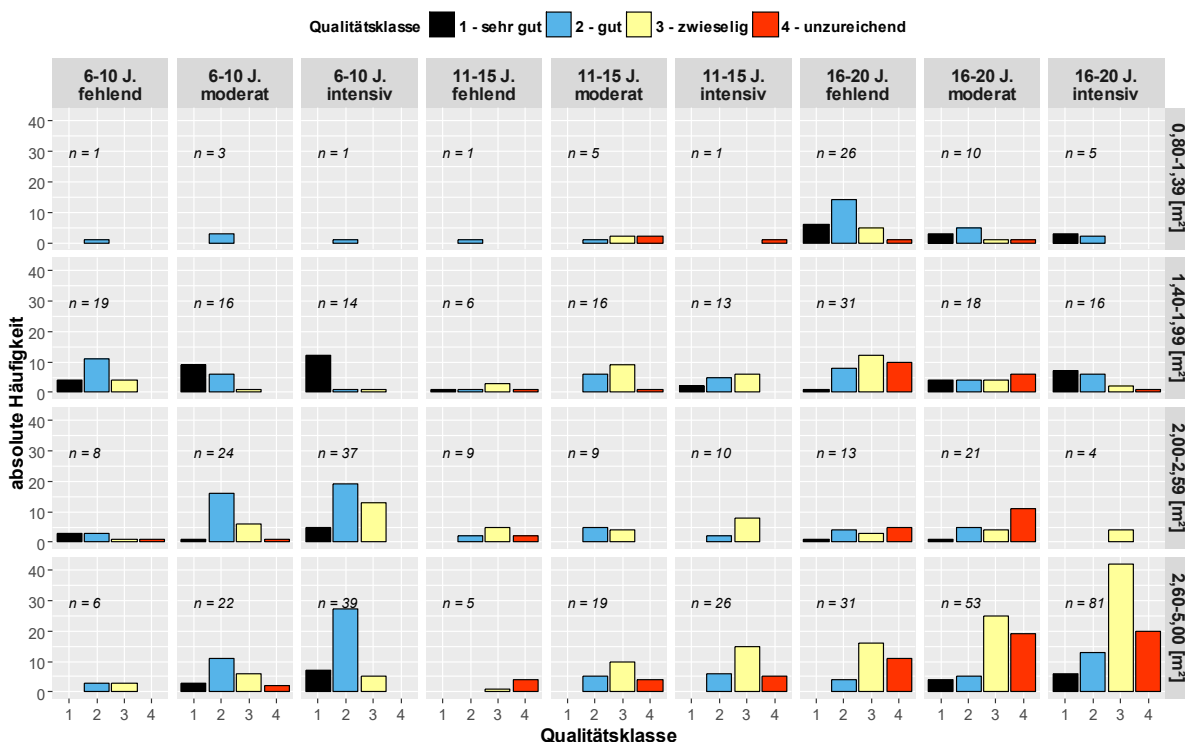


Abbildung 4-1: absolute Häufigkeit der Qualitätsklassen nach den Stufen von Alter, Altbaumnähe und Standraum.

Angabe des Stichprobenumfangs (aggregierte Daten) für die einzelnen Stufenkombinationen

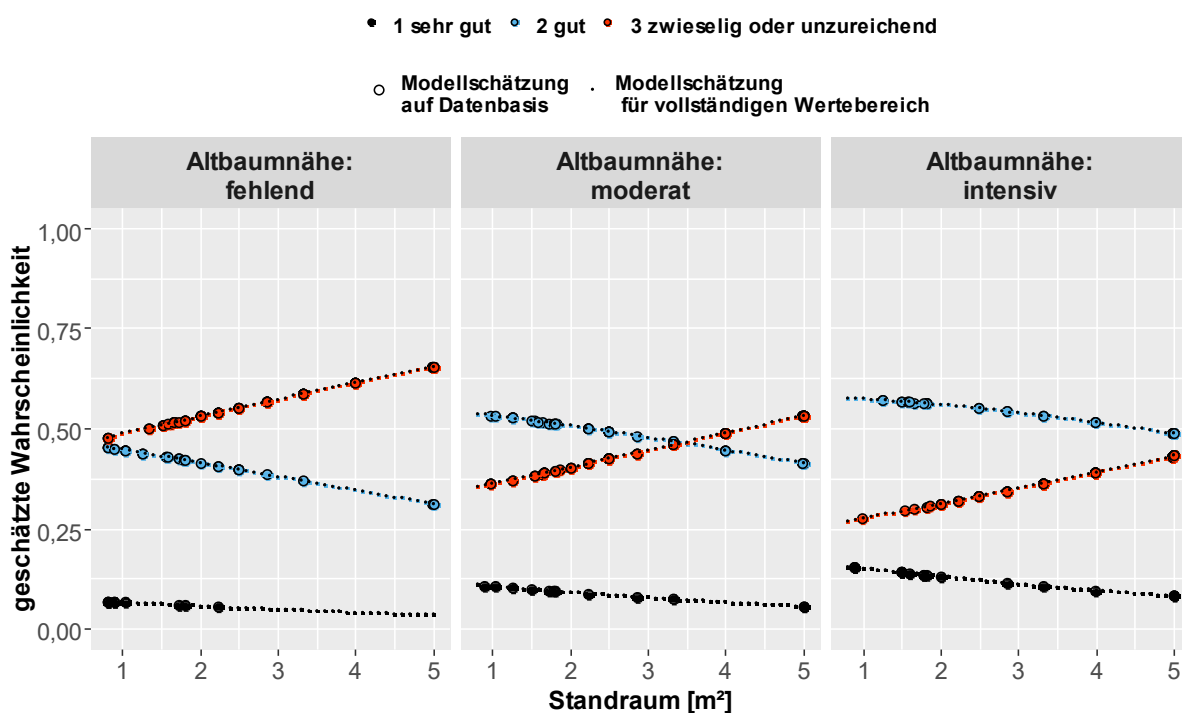
Die Abbildung deckt zunächst auf, wie sich die Stichprobe entlang der Faktorstufenkombinationen verteilt. Es zeigt sich, dass die jüngsten und mittelalten Voranbauten mehrheitlich in weiten Pflanzverbänden und unter moderater bis intensiver Überschildung aufwachsen. Erst bei den Voranbauten

mit der längsten Standzeit sind auch in nennenswertem Umfang Bäume ohne direkten Altbaumeinfluss zu finden. Weiterhin ist hier das Spektrum an verschiedenen Pflanzverbandsweiten am größten.

Eine Art qualitativer Differenzierung ist nur bei den ältesten Voranbauten gegeben. Mit erhöhtem Raumangebot innerhalb des Voranbaus nimmt die Anzahl an zwieseligen und unzureichenden Bäumen zu. Bis zu einem Standraum von $1,99\text{m}^2$ kann ein intensiv gehaltener Altholzschirm diese Tendenz kompensieren. Vergrößert sich der Standraum hingegen auf $2,60\text{m}^2$ und mehr, fallen durchgängig die vielen zwieseligen und unzureichend geformten Buchen auf, unabhängig davon, wie stark sie überschirmt sind.

Betrachtet man das Tableau in seiner Gesamtheit über alle Altersstufen, zeigt sich als Tendenz, dass zwieselige Bäume schon früh, d.h. bei Standräumen ab $1,40\text{m}^2$ in Erscheinung treten. Unzureichend geformte Buchen haben ihren Schwerpunkt etwas verlagert, sie sind erst ab einem Standraum von $2,00\text{m}^2$ und mehr durchgängig über alle Altersstufen vertreten. Bedingt durch die geschilderte qualitative Differenzierung bei den Voranbauten mit der längsten Standzeit gibt es dort relativ gesehen in bemerkenswertem Umfang unzureichend geformte Bäume, sobald der Fichtenschirm an Intensität verliert.

Zusätzlich zu dieser rein beschreibenden Herangehensweise werden im folgenden Absatz die Modellierungsergebnisse vorgestellt. Mit ihrer Hilfe ist ermittelbar, wie wahrscheinlich bspw. eine sehr gut geformte Buche bei bestimmter Schirmdichte und bei gegebenem Standraum ist. Das gemischte proportional-odds-Modell (CLMM) kann nicht für die vierstufige Qualitätsvariable erstellt werden, weil die separat für jeden Logit durchgeführte Güteprüfung dies nicht erlaubt. Das führt dazu, die beiden Klassen „zwieselig“ und „unzureichend“ zu einer Klasse zusammenzufassen. Außerdem ist es notwendig, die Dreiteilung des Alters durch Zusammenführen der mittelalten und alten Buchen aufzuheben. Das Resultat ist ein Faktorstufentableau mit Zellhäufigkeiten von mindestens sieben.



Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF1	VIF2
Schwelle: sehr gut – gut	0,189	0,041-0,862	-2,152	0,031*		
Schwelle: gut – zwieselig, unzureichend	2,787	0,620-12,532	1,337	0,181		
Alter: 11-20 Jahre	2,221	0,412-11,984	0,928	0,354	1,007	1,004
Altbaumnähe: moderat	0,599	0,357-1,005	-1,938	0,053	1,818	1,961
Altbaumnähe: intensiv	0,401	0,234-0,688	-3,320	0,001***	1,826	1,983
Standraum [m²]	1,189	0,953-1,484	1,524	0,128	1,021	1,019

Anzahl Beobachtungen: 619

Schätzer SD Subplot.Probekreis: 1,349

Abbildung 4-2: Schätzergebnisse des kumulativen Schwellenwertmodells für die Wahrscheinlichkeit von Qualitätsklassen über dem Standraum getrennt für die Stufen der Altbaumnähe.

Das Alter ist in der Grafik auf die Stufe 11-20 Jahre fixiert, es sind nur die Modellschätzwerte incl. Interpolation enthalten, keine beobachteten Anteile. In der Übersicht Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werte für die Logits 1 und 2, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichung über den Zufallseffekt.

Das Modell zeigt, dass von den drei untersuchten Einflussfaktoren die Schirmdichte den größten Einfluss darauf hat, wie wahrscheinlich eine bestimmte Qualitätsklasse im Voranbau ist. Wenn es sich um einen moderaten Altholzschirm handelt, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Qualität um eine Klasse verschlechtert, um den Faktor 0,6 – verglichen mit einer Buche, die bei fehlendem Schirm aufwächst, sonst aber gleich alt ist und denselben Standraum aufweist. Dasselbe Szenario spielt sich ab, wenn sich der Fichtenschirm weiter verdichtet. Verglichen mit einer Buche ohne Schirm unter sonst gleichen Bedingungen sinkt die Wahrscheinlichkeit für eine geringere Qualität dann höchstsignifikant um den Faktor 0,4. Die Wirkrichtung des Standraums ist umgekehrt. Vergleicht man beispielsweise eine Buche, die 1m² Standraum zur Verfügung hat mit einer, die bei 2m² Standraum aufwächst, so ist eine ungünstigere Qualitätsklasse beim zweiten Baum 1,2mal wahrscheinlicher als beim ersten. Dieser Befund ist deutlich interpretierbar und nur mit geringen Unsicherheiten versehen. Das Konfidenzintervall schließt knapp den Wert eins ein, was zur Nichtsignifikanz führt. Der Alterseffekt ist im Unterschied dazu mit sehr großen Verwerfungen behaftet. Das Konfidenzintervall ist sehr weit und schließt den Wert eins ein. Im Grunde bedeutet es, dass das Alter keine Auswirkung auf die Wahrscheinlichkeit einer Buche für eine bestimmte Qualitätsklasse hat.

Die drei Grafiken enthalten die Modellergebnisse für die Altersstufe 11-20 Jahre anhand derer sich noch weitere Gesichtspunkte beleuchten lassen. Das Modell zeigt, dass eine sehr gute Buche generell mit einer geringen Wahrscheinlichkeit vorzufinden ist. Der Maximalwert liegt bei rd. 0,16 in der rechten Grafik bei sehr geringen Standraumwerten und ist damit den Beträgen für gute und zwieselige bzw. unzureichend geformte Buchen weit unterlegen. Interessant ist der Fakt, dass es für die Wahrscheinlichkeiten von guten und zwieseligen oder unzureichenden Bäumchen gleiche Werte gibt. Das kommt in der Grafik durch die Kreuzungspunkte der roten und blauen Linien zum Ausdruck. Fehlt ein Fichtenschirm, so sind bereits bei Standräumen von 1m² pro Baum gute und zwieselige oder unzureichende Bäume gleich wahrscheinlich. Schon mit einem moderat dichten Fichtenkronendach liegt dieser Kreuzungspunkt bei Standraumwerten von 3,5m² je Buche. Diese Patt-Situation wird unter intensiver Überschildung erst bei mehr als 5m² Standraum erreicht. Diese Feststellung bedient sich der Extrapolation über den erweiterten Wertebereich des Modells hinaus.

Insgesamt gesehen beinhalten die Ergebnisse dieselbe Botschaft, unabhängig davon, ob sie deskriptiv oder analytisch durch Modelle hergeleitet werden. Um eine große Anzahl an späteren Ausleseebäumen im Voranbau zu haben und um diese sehr gut oder gut geformten Bäume wahrscheinlich zu machen, muss das Fichtenaltholz lange Zeit gehalten werden. Eine fehlende Überschirmung im Sinne dieser Arbeit reicht dazu offenbar nicht aus. Dies gilt umso mehr, je weiter der Pflanzverband gewählt wird. Um zu verdeutlichen, wie wichtig enge Pflanzverbände für die Qualitätsholzerziehung in Voranbauten sind, wird das Modell mit Beispielwerten genauer betrachtet. Dafür eignen sich zum einen der Standardraumwert von 1,4m², der eine Art Umschlagpunkt bei der Qualitätsklassenverteilung in der deskriptiven Auswertung bei den ältesten Buchen darstellt und zum anderen der Wert 3,5m², der im Modell gleiche Wahrscheinlichkeiten für gute und zwieselige bzw. unzureichend geformte Bäume ausweist.

Tabelle 4-1: geschätzte Wahrscheinlichkeit für sehr gute/gute vs. zwieselige/unzureichend geformte Buchen aus dem kumulativen Schwellenwertmodell nach Altbaumnähe für zwei Standardraumwerte.

Standardraum/ Pflanzanzahl	Altbaumnähe	Wahrscheinlichkeit für sehr gute und gute Formen	Wahrscheinlichkeit für zwieselige oder unzureichende Formen
1,4m ² / 7.140 Stck je ha	fehlend	0,5	0,5
	moderat	0,6	0,4
	intensiv	0,7	0,3
3,5m ² / 2.860 Stck je ha	fehlend	0,4	0,6
	moderat	0,5	0,5
	intensiv	0,6	0,4

Die Übersicht zeigt klar, dass bei engerem Pflanzverband im Voranbau bei gleicher Überschirmungsdichte sehr gute und gute Buchen 1,5mal wahrscheinlicher sind als unerwünschte Formen. Bei sehr weitem Verband dagegen bedarf es eines lange intensiv gehaltenen Fichtenschirms, um dasselbe Verhältnis zu erzielen.

4.1.2 Ergebnisse für die Region Nordrhein-Westfalen und Modellvalidierung mit der Region Sachsen

Weil die Daten für zwei Regionen vorliegen, ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit für die Qualitätsklassen auch getrennt zu modellieren. Über die drei Haupteffekte Alter, Überschildung und Standraum verteilt sich die Stichprobe in den Regionen folgendermaßen:

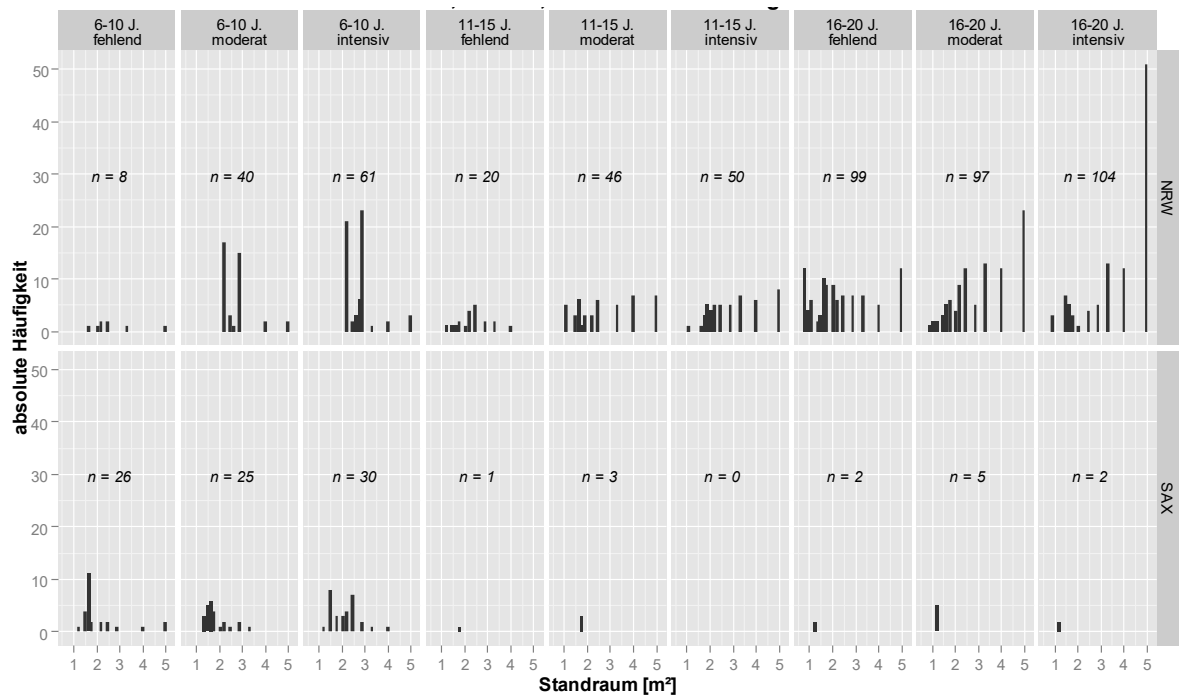


Abbildung 4-3: Stichprobenumfang (aggregierte Daten) der Qualitätsklassen nach Stufen der festen Haupteffekte Alter, Schirm und Standraum getrennt für die Bundesländer NRW und SAX.

Angabe des Stichprobenumfangs je Kombination Bundesland – Alter – Schirm – Standraum.
 $N_{NRW} = 525$, $N_{SAX} = 94$

Der Blick auf die Daten zeigt, dass mit der Stichprobe in Nordrhein-Westfalen das Referenzmodell sinnvoll ist, das mit der sächsischen Stichprobe validiert werden soll. Selbst wenn die Altersstufen in NRW alle besetzt sind, lohnt es sich nicht, diesen Effekt in das Referenzmodell einzubeziehen, weil für SAX nur die erste Altersstufe akzeptabel besetzt ist (erste drei Grafiken unten links).

Das Referenzmodell ist in der Lage, die Qualitätsklassen vierstufig abzubilden. Es enthält als erklärende Größen den Standraum und die zweistufige Überschildungsintensität. Um Konvergenzprobleme zu vermeiden war es notwendig, die Überschildungsstufen „fehlend“ und „moderat“ zusammenzufassen. Die folgende Abbildung zeigt die Validierung des Modells für NRW mit den sächsischen Daten und beinhaltet auch die Angaben zur

Modellschätzung.

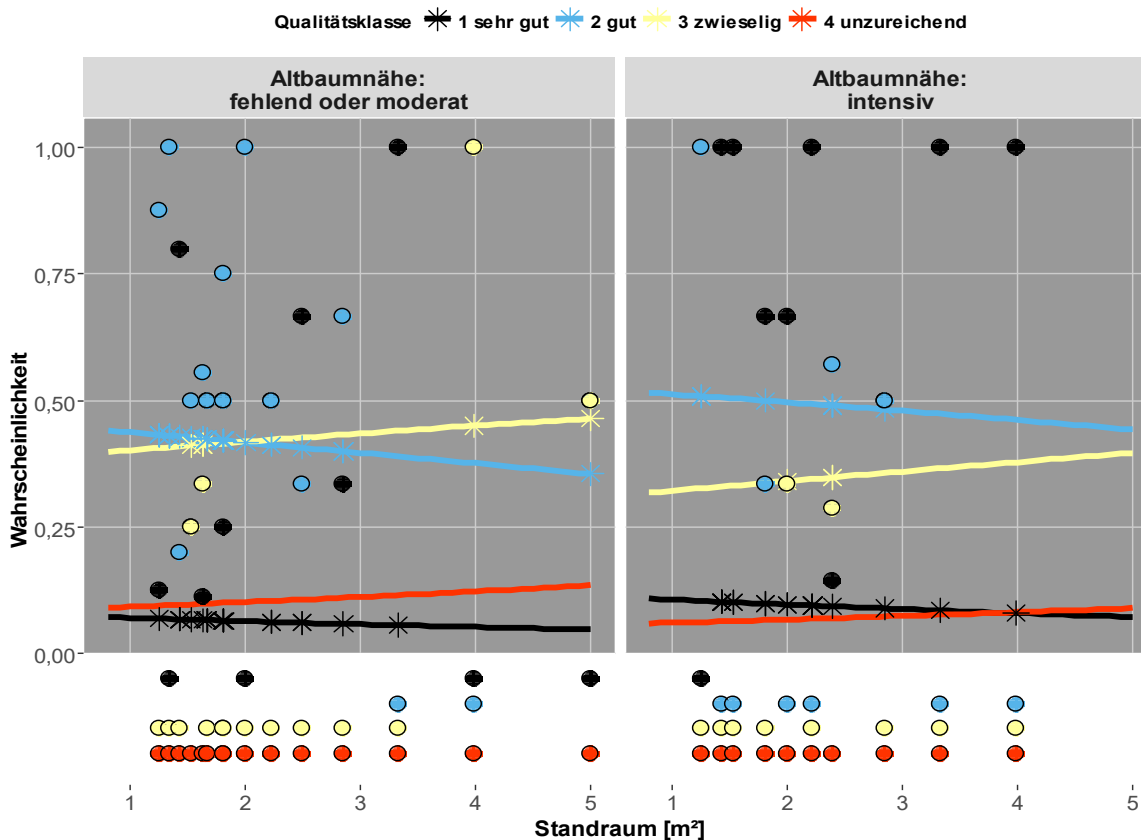


Abbildung 4-4: Vergleich der Modellvorhersage für die Buchen aus NRW mit den beobachteten Werten für die Buchen in SAX bezüglich der Qualitätsklassen über dem Standraum nach Stufen der Altbaumnähe.

Vorhersagewerte für die Qualitätsklassen aus NRW interpoliert (Linien), Vorhersagewerte des Modells an den Datenpunkten für SAX (Sterne), Anteile der Qualitätsklassen je Schirm-Standraum-Kombination als beobachtete Werte für die Buchen in SAX (Kreise)¹²

Die Grafiken zeigen, dass das Modell für NRW die Wahrscheinlichkeit an sehr guten und guten Buchen in SAX immens unterschätzt. Das gilt besonders für Standräume bis 3m², unabhängig davon, um welche Schirmkatgorie es sich handelt. Bei unzureichenden Buchen der Klasse vier überschätzt das NRW-Modell die beobachteten Anteile in SAX deutlich, weil diese Klasse in SAX nicht vorkommt (rote Punkte ausschließlich bei Null). Wie bei den guten Buchen auch ist es hier irrelevant, ob es sich um fehlend bis moderat überschirmte oder intensiv beschattete Bäumchen handelt. Zwieselige Buchen werden vom Modell NRW am treffendsten für SAX abgebildet, wenn auch bei einem Standraum von 4m² die

¹² Die Kreise der beobachteten Werte mit dem Betrag Null sind unter der Null-Linie der y-Achse wegen der besseren Übersichtlichkeit unter- und nicht aufeinander platziert.

beobachtete Wahrscheinlichkeit in SAX für zwieselige Buchen deutlich höher liegt als es das Modell vorhersagt. Um die Unterschiede zwischen den zwei Kollektiven zu verdeutlichen bietet es sich an, für jedes Bundesland ein eigenes Modell zu schätzen und dann zu vergleichen. Es handelt sich dann nicht mehr um eine Validierung, sondern um das Nebeneinanderstellen zweier eigenständiger Modelle. Die folgende Abbildung enthält den grafischen Vergleich sowie die einzelnen Modellparameter.

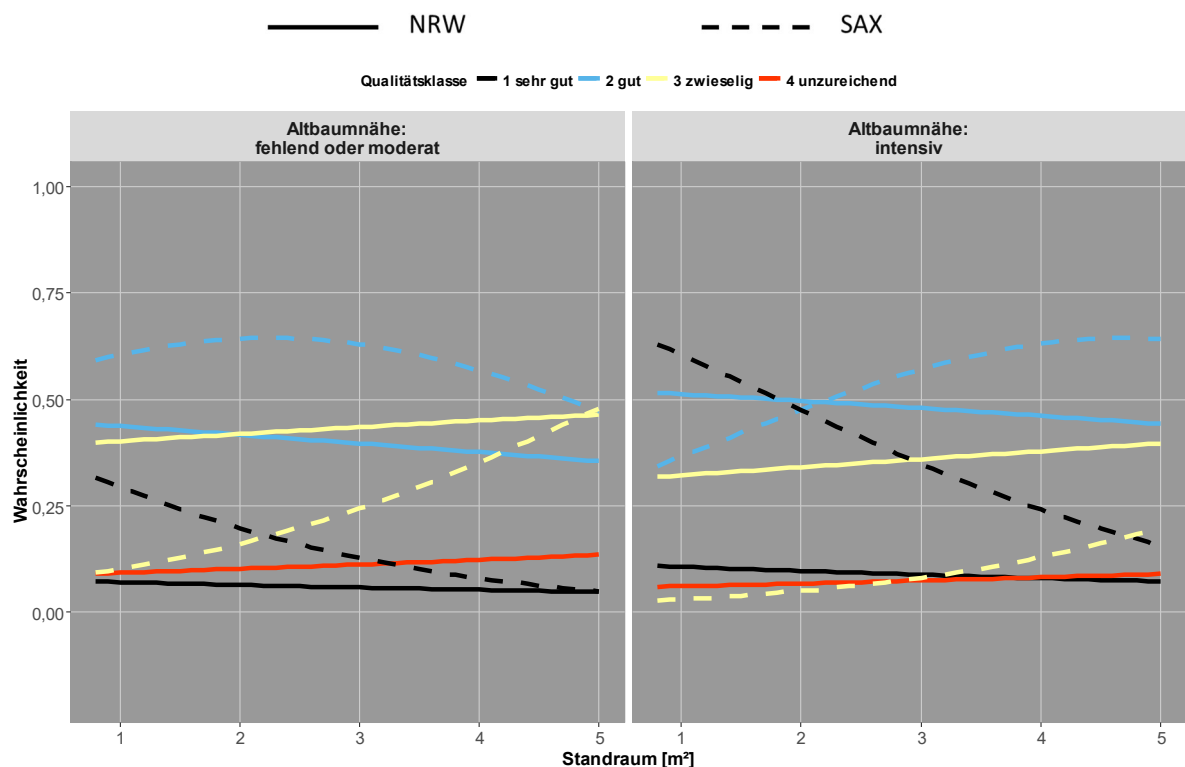


Abbildung 4-5: Darstellung der interpolierten Wahrscheinlichkeits-Schätzungen der Qualitätsklassen aus den kumulativen Schwellenwertmodellen für die Bundesländer NRW und SAX über dem Standraum nach Schirmkategorien.

Tabelle 4-2: Schätzergebnisse der kumulativen Schwellenwertmodellenach Bundesländern für die Wahrscheinlichkeit von Qualitätsklassen über dem Standraum für die Stufen der Altbaumnähe.

obere Tabelle: Modellergebnisse für die Buchen in NRW, untere Tabelle: Modellergebnisse für die Buchen in SAX. Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werte für die Logits 1 bis 3 bzw. 1 und 2, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichung des Zufallseffekts

Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF1	VIF2	VIF3
Schwelle: sehr gut – gut	0,083	0,028-0,246	-4,497	0,000***			
Schwelle: gut – zwieselig	1,141	0,403-3,231	0,249	0,804			
Schwelle: zwieselig - unzureichend	10,968	3,806-31,608	4,437	0,000***			
Altbaumnähe: intensiv	0,634	0,434-0,925	-2,358	0,018*	1,027	1,012	1,015
Standraum [m ²]	1,112	0,925-1,337	1,129	0,259	1,027	1,012	1,015

Anzahl Beobachtungen: 525

Schätzer SD Subplot.Probekreis: 1,289

Variable	Schätzer Odds-Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF1	VIF2	VIF3
Schwelle: sehr gut – gut	0,704	0,149-3,331	-0,443	0,658			
Schwelle: gut – zwieselig.unzureichend	15,059	2,758-82,217	3,132	0,002**			
Altbaumnähe: intensiv	0,272	0,104-0,709	-2,665	0,008**	1,009	1,029	-
Standraum [m ²]	1,692	0,906-3,162	1,649	0,099	1,009	1,029	-

Anzahl Beobachtungen: 94

Schätzer SD Subplot.Probekreis: 0,951

Die Grafik verdeutlicht die Unterschiede der beiden Modelle sehr eindrücklich. Der wichtigste Unterschied besteht darin, dass in NRW alle Qualitätsklassen vorhanden sind und in SAX unzureichende Buchen fehlen. Für eine eingehendere Analyse eignen sich am besten die Kreuzungspunkte zwischen den Wahrscheinlichkeitslinien verschiedener Qualitätsklassen. Gute und zwieselige Buchen sind in den Kollektiven bei völlig anderen Standraumwerten gleich wahrscheinlich. Bei fehlendem bzw. moderatem Schirmdruck ist das in NRW bereits bei 2m² Standraum der Fall, im sächsischen Kollektiv erst bei Standräumen von knapp 5m². Verdichtet sich die Überschildung, treten die zwieseligen Buchen vor allem bei SAX deutlich spürbar zurück, sodass keine

Kreuzungspunkte zwischen den Qualitätsklassen zwei und drei existieren. Nur für das nordrhein-westfälische Kollektiv wird dieser bei Standräumen von mehr als 5m^2 außerhalb der Datenbasis angedeutet. Für die Buchen in SAX ist bei intensiv überschirmten Buchen sogar ein Kreuzungspunkt zwischen sehr guten und guten Bäumchen bei einem Standraum von 2m^2 vorhanden. Im Vergleich ist es verwunderlich, dass bei den sächsischen Buchen trotz größerem Wuchsraum die Wahrscheinlichkeit für gute Bäumchen ansteigt und einen Gipfelpunkt bei ca. $4,5\text{m}^2$ erreicht (rechte Grafik). Allein dieser Trend ist gegenläufig zum Verlauf der Wahrscheinlichkeitslinien für das nordrhein-westfälische Kollektiv. Möglicherweise sind bei intensiver Überschirmung zum einen die geringe Datenbasis guter Buchen und zum anderen die hohen Anteile sehr guter Buchen über ein breites Standraumspektrum hinweg dafür verantwortlich (vgl. Abbildung 4-4 vorherig).

Betrachtet man die Modellparameter für NRW, so zeigt sich, dass es erklärungschwächer ist als das Modell für das gemeinsame Modell NRW.SAX im vorherigen Abschnitt. Nur der Überschirmungsfaktor zeigt hier eine signifikante Odds Ratio, der Faktor Standraum ist mit seiner Odds Ratio von rund Eins nicht mehr relevant, was in den Grafiken durch fast parallel zur Abszisse verlaufende Wahrscheinlichkeitslinien zum Ausdruck kommt (durchgezogene Linien). Es wird außerdem anhand der Odds Ratio kleiner Eins deutlich, dass ein intensiver Fichtenschirm vorteilhaft für den Qualitätszustand einer Buche ist. Das zeigen auch die durchweg höheren Wahrscheinlichkeiten sehr guter und guter Buchen bei intensiver Überschirmung in der rechten Grafik als bei Bäumchen mit fehlendem oder moderatem Schirm in der linken Grafik.

Das sächsische Modell liefert straffere Zusammenhänge als dasjenige für NRW. Der Effekt des Schirms fällt wegen der Odds Ratio nahe an Null noch drastischer aus und ist zudem hochsignifikant. Inhaltlich steht dieselbe Aussage dahinter wie im NRW-Modell: intensiv beschattete Bäumchen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine bessere Qualitätsklasse. Auch der Parameter für den Standraum ist klarer von Eins verschieden als im NRW-Modell und nähert sich der Signifikanzgrenze von 0,05 an. Er besagt, dass ein größerer Standraum schlecht geformte Buchen wahrscheinlich macht.

4.2 Ergebnisse zu einzelnen Wachstums- und Qualitätsmerkmalen

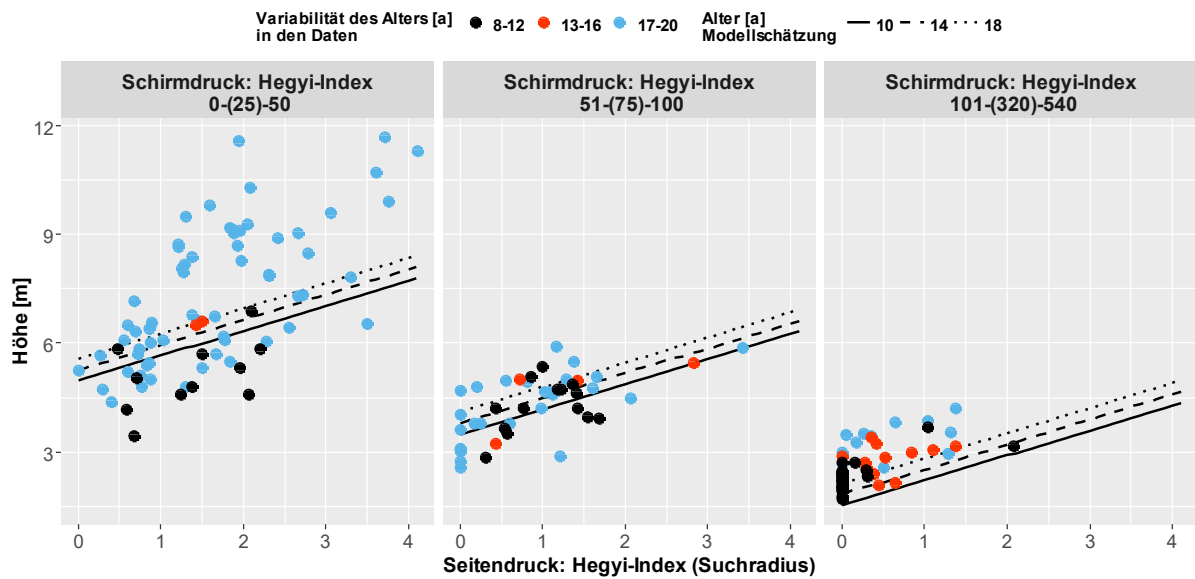
4.2.1 Ergebnisse zu Wachstumsgrößen

Zu Beginn steht die Beziehung der Wachstumsgrößen zu den untersuchten Einflussfaktoren Schirm- und Seitendruck im Mittelpunkt. Die Wachstumsgrößen selbst sind Teil einiger Modelle für die Qualitätsparameter, die im Anschluss gezeigt werden.

4.2.1.1 Ergebnisse zur Höhe

Die Baumhöhe der jungen Buchen lässt sich am besten durch ein Modell beschreiben, das aus dem Hegyi-Index für den Oberstand, aus dem Hegyi-Index in der Verjüngung (Suchradius) und aus dem Alter besteht (Abbildung 4-6). Alle drei Einflussgrößen sind mindestens signifikant. Das Modell drückt aus, dass mit geringer werdender Schirmdichte die Baumhöhen größer werden. Der logarithmierte Koeffizient zeigt an, dass dieser Anstieg nicht gleichmäßig verläuft: der Höhenunterschied zwischen kaum übershirmten Buchen und mäßig beschatteten ist deutlich größer als zwischen stark und moderat übershirmten. Andersherum verhält es sich mit dem Seitendruck im Voranbau. Steigt dieser an, so nimmt auch die Höhe zu. Dass beide Effekte einen starken Einfluss auf die Variabilität der Höhe haben, zeigt auch die Grafik¹³. Das Alter hat nur einen geringen, wenn auch signifikanten Einfluss auf die Höhe. Werden die Bäume älter, lässt sich aber feststellen, dass die Streubreite der Höhe immens zunimmt. Das ist insbesondere bei geringfügig übershirmten Buchen der Fall, wie es die linke Grafik im Vergleich mit den beiden anderen deutlich zeigt. Für solche Bäume unterschätzt das Modell die Höhe vor allem bei höherem Seitendruck. Auch bei stark übershirmten Buchen wird die Höhe durch das Modell unterschätzt, es bildet den Verlauf am besten für mäßige Schirmverhältnisse ab (mittlere Grafik). Dass zwischen den Regionen kein Unterschied für die gefundenen Zusammenhänge besteht, zeigt die mit Null geschätzte Standardabweichung der Interzepte für diesen Zufallsfaktor. Das ist eine prinzipielle Bestätigung dafür, dass es sich um vergleichbare Standorte in den Regionen handelt (vgl. Kap. 2).

¹³ Die Ergebnisgrafiken für die Einzelbaummerkmale sind alle nach demselben Schema aufgebaut. Der Einfluss des Altbestandes ist in drei Klassen eingeteilt, die Daten und die Modellschätzung sind nach diesen Klassen grafisch getrennt dargestellt. Für jede dieser Klassen sind im Beschriftungsbalken die Klassengrenzen und die Klassenmitte angegeben. Der Seitendruck bleibt kontinuierlich, nur die dritte unabhängige Variable (Whd, Höhe oder Alter) wird über farbige Punkte (Daten) bzw. verschiedene Linientypen (Modell: Klassenmitten) dargestellt. Ist eine vierte Variable vorhanden (Astansatzhöhe), wird diese auf einen bestimmten Wert fixiert und dafür die Grafik aufgebaut (Angabe im Text).



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	8,542	0,725	164	11,790	0,000***	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	-3,111	0,195	164	-15,954	0,000***	1,384
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	0,692	0,084	164	8,197	0,000***	1,307
Alter [a]	0,077	0,036	17	2,142	0,047*	1,137

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
186	0,000	0,667	0,160

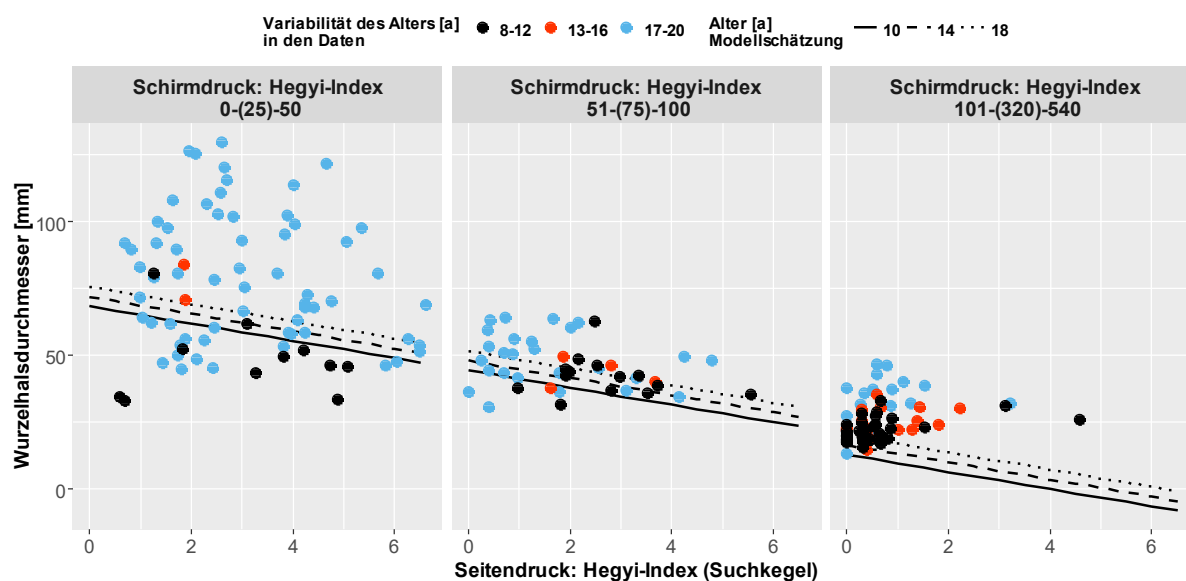
Abbildung 4-6: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Höhe über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

4.2.1.2 Ergebnisse zum Wurzelhalsdurchmesser

Die Streuung der Wurzelhalsdurchmesser kann durch ein Modell aus dem logarithmierten Hegyi-Index des Oberstandes, den Hegyi-Index der Verjüngung (Suchkegel) und das Alter am besten erklärt werden. Der Wurzelhalsdurchmesser reagiert jedoch sehr viel stärker als das bei der Höhe der Fall ist. Der Whd verringert sich, ebenso wie die Höhe, mit höherem Schirmdruck und zwar am gravierendsten zwischen den ersten beiden Überschirmungsstufen. Nimmt die

Konkurrenz im Voranbau zu, so sinkt der Wurzelhalsdurchmesser - anders als die Höhe - ab. Wie der Whd reagiert, bestimmen im Voranbau jene Buchen, die sich im Suchkegel des untersuchten Baumes befinden. Das sind solche, die eine gewisse Höhe aufweisen und als Ausdruck für den Wettbewerb um Licht zu verstehen sind. Schirm- und Seitendruck haben nicht nur einen großen Effekt auf den Whd, sie sind zudem höchstsignifikant. Anhand der deutlich sichtbaren sinkenden Streuung des Whd mit steigender Überschirmung und größerem Seitendruck lässt sich eine Wechselwirkung zwischen den beiden Größen vermuten. Allerdings führt ein solcher Term zu einem inakzeptablen Ausmaß an Multikollinearität. Die Wirkrichtung des Alters ist positiv und gerade noch signifikant. Bemerkenswert ist der hohe Betrag des geschätzten Interzepts. Er bescheinigt, dass die vorhandenen erklärenden Größen Mühe haben, die Variation in den Werten des Whd stark zu verringern. Offensichtlich sind hier noch weitere, nicht gemessene Größen bedeutend. Zwischen den Regionen NRW und SAX und innerhalb dieser zwischen den Versuchsflächen herrschen größere Unterschiede bezüglich des Wurzelhalsdurchmessers, die herausgerechnet werden mussten. Der Whd variiert bei geringer Überschirmung am meisten, vor allem bei den ältesten Buchen. An dieser Stelle unterschätzt das Modell den Whd ähnlich wie bei der Höhe. Bei starkem Schirmdruck haben die Bäume ebenso einen größeren Whd, als es vom Modell wiedergegeben wird (rechte Grafik).



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	129,285	9,509	164	13,596	0,000***	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	-50,052	2,410	164	-20,772	0,000***	1,335
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-3,210	0,590	164	-5,443	0,000***	1,236
Alter	0,907	0,429	17	2,112	0,050*	1,176

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
186	5,095	7,730	0,342

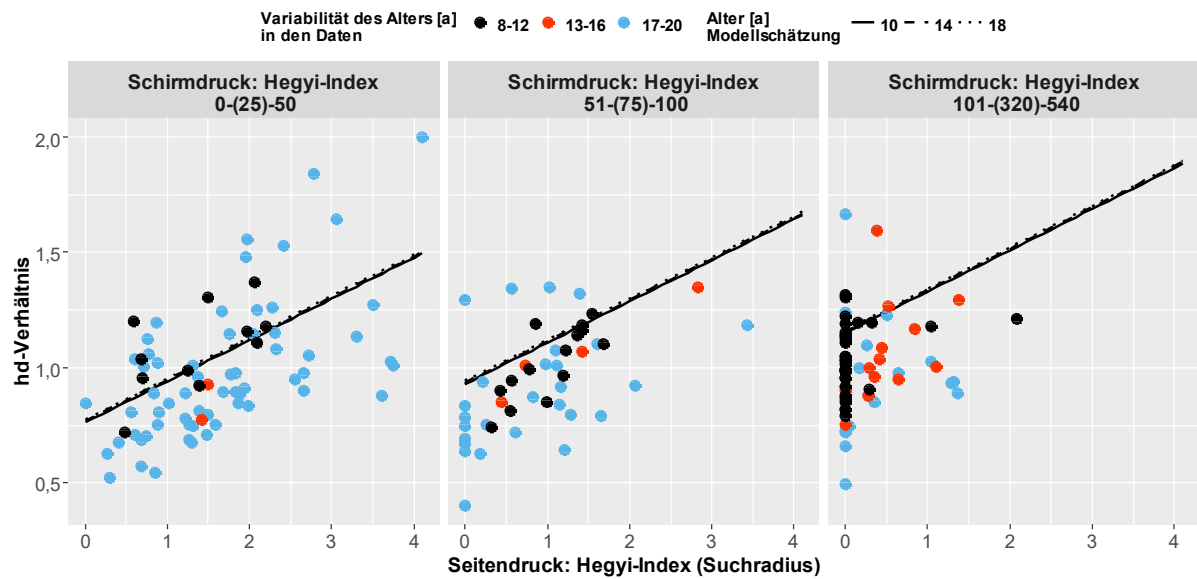
Abbildung 4-7: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Wurzelhalsdurchmesser über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

4.2.1.3 Ergebnisse zum *hd*-Wert

Das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser an jungen Bäumen ist ein Vitalitäts- und Stabilitätsweiser. Bäume mit einem Verhältnis größer 1,2 gelten als instabil, was für junge Eichen in Bezug auf Schneedruck genannt wird (FISCHER 1998 S. 204f). Auch wenn sich die vorliegende Arbeit jungen Buchen widmet, wird der Wert von 1,2 herangezogen.

Die Variabilität des hd -Wertes lässt sich am treffendsten von einem Modell beschreiben, welches aus Schätzern für den Hegyi-Index des Oberstandes, logarithmiert, aus Parametern für den Hegyi-Index des Unterstandes (Suchradius) sowie für das Alter besteht. Es wird deutlich, dass mit zunehmendem Vorhandensein eines Fichtenschirms die hd -Werte ansteigen. Die junge Buche reduziert also den Durchmesserzuwachs immer stärker im Vergleich mit dem Höhenzuwachs. Mäßig überschirmte Bäume tun dies sehr viel stärker, als es gering überschattete Buchen tun. Erst bei sehr hohem Konkurrenzdruck durch den Altbestand verliert sich diese Intensität der Durchmesserabnahme. Die festgestellten Mechanismen sind höchstsignifikant. Nimmt der Seitendruck im Voranbau zu, so erhöhen sich höchstsignifikant die hd -Werte. Wie alt eine junge Buche im Voranbau ist, hat hingegen keine Auswirkung darauf, wie groß ihr hd -Verhältnis ist.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	0,256	0,179	164	1,429	0,155	
Schirmdruck: log10(Hegy-Index)	0,351	0,047	164	7,466	0,000***	1,438
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	0,179	0,018	164	10,115	0,000***	1,25
Alter [a]	0,002	0,007	17	0,218	0,830	1,277

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
186	0,117	0,124	0,139

Abbildung 4-8: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den hd-Wert über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer

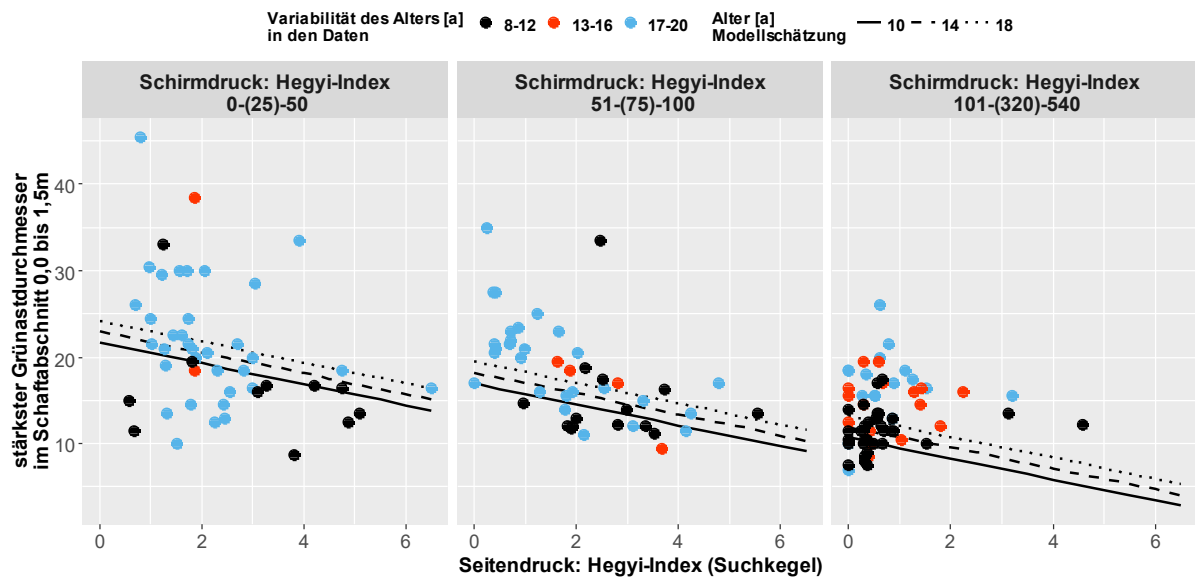
In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung.

4.2.2 Ergebnisse zu Qualitätsmerkmalen

4.2.2.1 *Ergebnisse zur Ästigkeit*

stärkste Grünastdurchmesser nach Schaftabschnitten

Für die stärksten Grünastdurchmesser liegen drei Modelle vor, separat für jeden Schaftabschnitt. Die Modelle enthalten daher eine unterschiedliche Anzahl an Beobachtungen. Das Modell, welches sich auf den untersten Schaftabschnitt von 0,0 bis 1,49m bezieht, beinhaltet alle Buchen, die in diesem Bereich noch nicht von grünen Ästen gereinigt sind. Dagegen lassen die Modelle für die Schaftabschnitte zwei und drei sukzessive Bäume außen vor, die eine bestimmte Höhe noch nicht erreicht haben. Das sind entweder solche, die unter 4,50m hoch sind (Schaftabschnitt 2) oder eine Höhe von 6,00m nicht überschreiten (Schaftabschnitt 3).



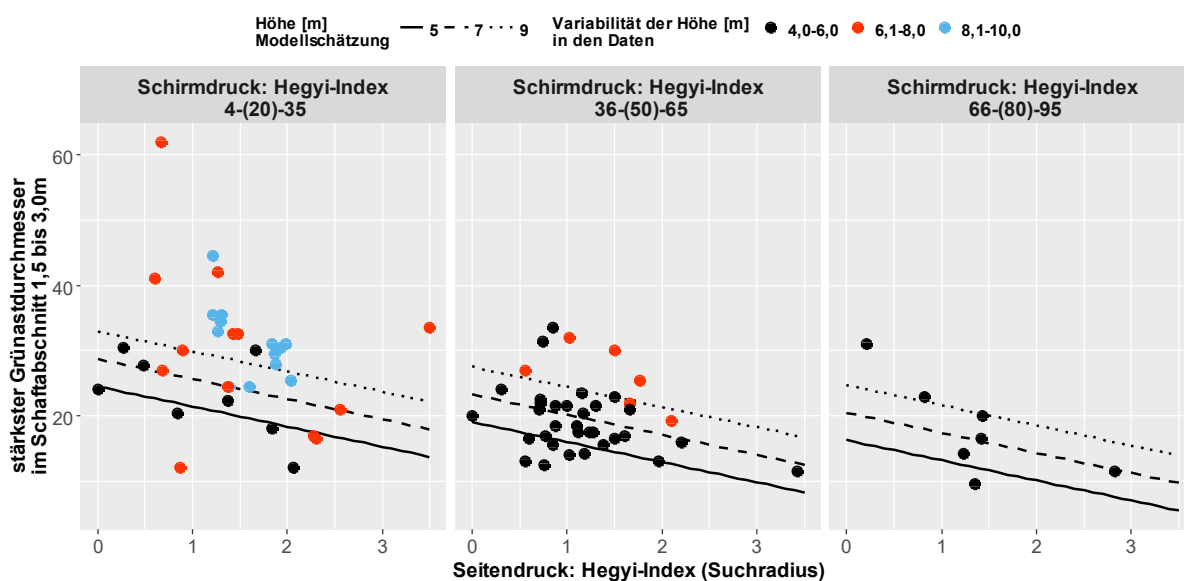
Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	32,455	3,874	139	8,378	0,000***	
Schirmdruck: log(Hegyi-Index)	-9,940	1,301	139	-7,639	0,000***	1,351
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-1,209	0,283	139	-4,266	0,000***	1,261
Alter [a]	0,315	0,151	14	2,083	0,056	1,089

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
158	0,002	2,198	0,011

Abbildung 4-9: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 1 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

4 Ergebnisse

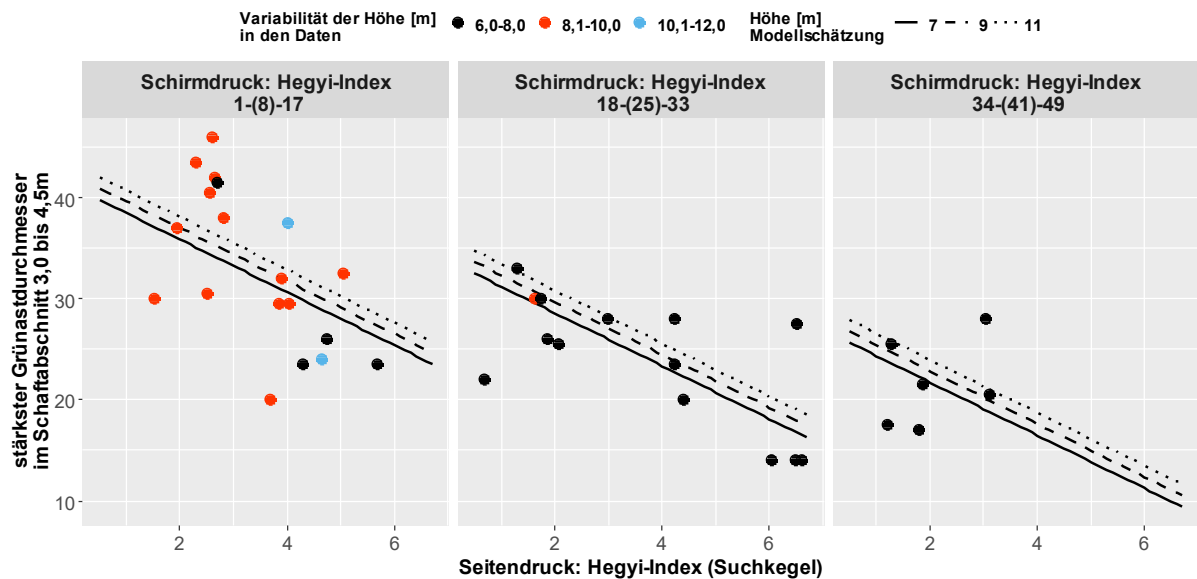


Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	31,833	11,54	61	2,758	0,008**	
Schirmdruck: log(Hegyi-Index)	-13,71	4,379	61	-3,131	0,003**	2,684
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	-3,08	0,751	61	-4,101	0,000***	1,48
Höhe [m]	2,104	0,988	61	2,131	0,037*	2,732

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
79	3,950	4,106	0,051

Abbildung 4-10: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 2 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Höhenstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	40,590	9,652	26	4,205	0,000***	
Schirmdruck: Hegyi-Index	-0,428	0,110	26	-3,905	0,001***	2,272
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-2,616	0,594	26	-4,404	0,000***	1,113
Höhe [m]	0,559	0,943	26	0,593	0,558	2,123

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
39	0,001	0,000	5,587

Abbildung 4-11: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 3 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Höhenstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

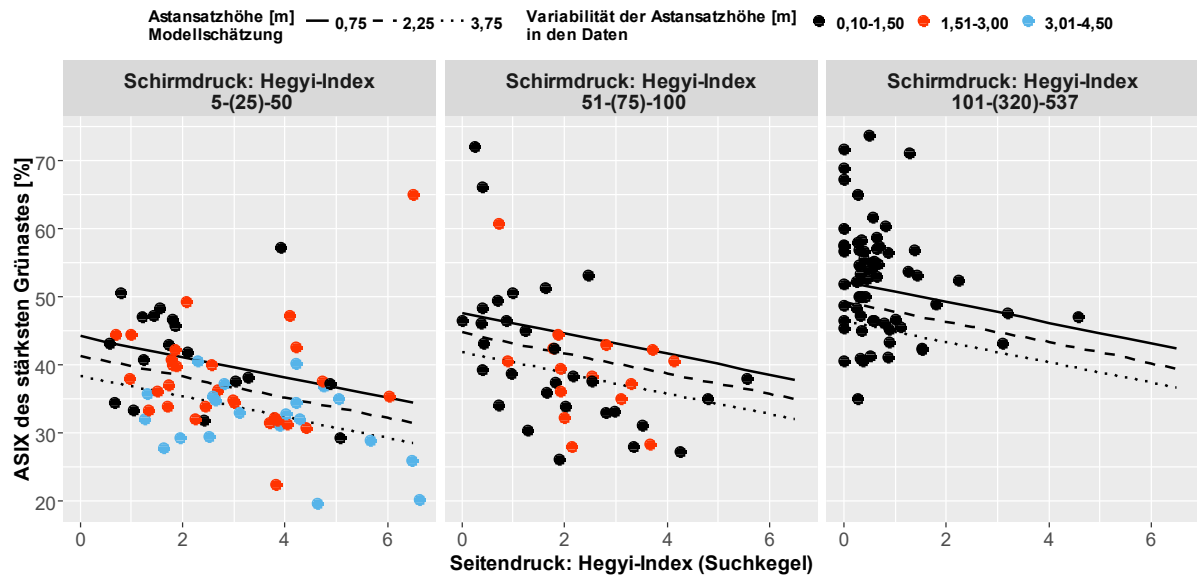
In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

In der Zusammenschau der drei Modelle ist erkennbar, dass der Hegyi-Index als Ausdruck für die Überschirmungsintensität durchweg mindestens signifikant ist. Wenn die Altbestandskonkurrenz zunimmt, verringern sich die Astdurchmesser. Es ist weiter zu beobachten, dass die Wirkkraft des Schirmdrucks mit steigender Astansatzhöhe (Schaftabschnitt) zunimmt. Erhöht sich die Konkurrenzwirkung des Oberstandes um zehn Prozent, so verringert sich der betreffende

Astdurchmesser um 0,4mm im ersten Schaftabschnitt und um 0,6mm im zweiten. Sobald sich der Schirmdruck um zehn Einheiten verstärkt, nehmen die Astdurchmesser des dritten Schaftabschnittes um 4,3mm ab. Ähnliches trifft auf den Seitendruck zu. Die Astdurchmesser verringern sich höchstsignifikant, wenn der Wettbewerb im Voranbau größer wird. Das Ausmaß ist höher wie beim Schirmdruck. Wenn sich die Konkurrenz im Voranbau um zehn Einheiten verschärfen, sinken die jeweiligen Astdurchmesser um 12mm im ersten Schaftabschnitt, um 30mm im zweiten und um 26mm im dritten. Ältere Bäume haben in den untersten 1,5m tendenziell stärkere Grünäste als jüngere, wenn der Effekt auch nicht signifikant ist. Für die beiden höheren Schaftabschnitte bezieht die Modellauswahl nicht das Alter, sondern die Höhe ein. Der signifikante Schätzwert für den zweiten Schaftabschnitt zeigt, dass ein höherer Baum auch einen größeren maximalen Grünastdurchmesser aufweist. Die Zunahme ist im Vergleich mit den anderen mitgeteilten Änderungsbeträgen am größten – ein um einen Meter höherer Baum hat einen um 2,1mm dickeren maximalen Grünastdurchmesser. Anders verhält es sich dagegen im dritten Schaftabschnitt. Dort ist es für den stärksten Grünastdurchmesser unerheblich, welche Höhe ein Baum aufweist. Vergleicht man die Modelle mit den Daten, so zeigen sich für die maximalen Grünastdurchmesser im ersten und zweiten Schaftabschnitt die größten Streuungen bei niedrigen Schirmdichten und geringem seitlichen Konkurrenzdruck (Abbildungen 4-9 und 4-10, jeweils linke Grafik). Maximale Grünastdurchmesser werden bis 1,5m Ansatzhöhe und bei sehr hoher Überschildungsdichte unterschätzt (Abbildung 4-9 rechte Grafik).

Feinästigkeit (ASIX)

Der relative Astdurchmesser eines Baumes zeigt an, wie stark- oder feinästig dieser in Bezug auf den Wurzelhalsdurchmesser in 20cm Höhe über dem Boden ist. Je höher der Indexwert, desto starkästiger erscheint der Habitus des Baumes.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	34,483	7,388	156	4,667	0,000***	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	7,268	2,537	156	2,865	0,005**	2,765
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-1,507	0,548	156	-2,751	0,007**	1,574
Alter [a]	0,105	0,221	17	0,475	0,641	1,500
Astansatzhöhe [a]	-1,938	0,872	156	-2,222	0,028*	2,106

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
179	1,477	2,398	7,744

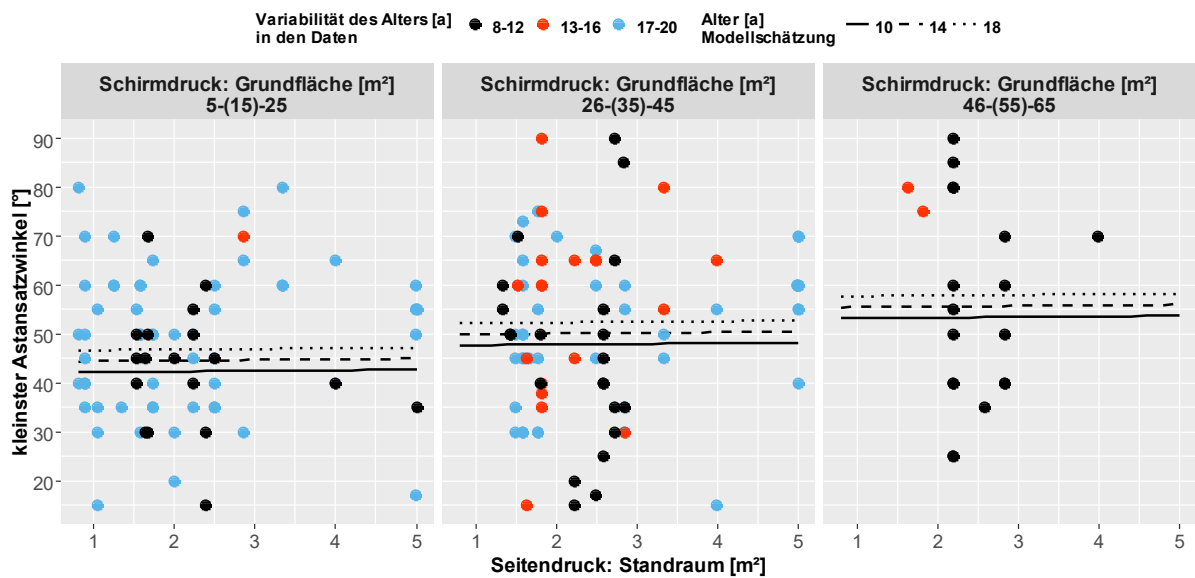
Abbildung 4-12: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den ASIX des stärksten Grünastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Astansatzhöhestufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der grafischen Darstellung ist das Alter auf 10 Jahre fixiert. In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Das Modell zeigt klar, dass eine größere Überschildungsdichte bewirkt, dass die relativen Astdurchmesser ansteigen. Erhöht sich dagegen der Konkurrenzdruck im Voranbau, nimmt der relative Astdurchmesser ab und die Buchen werden feinastiger. Beide Effekte sind signifikant. Erhöht sich die Überschildungsdichte um 10%, so steigt der ASIX-Wert um 0,3 Einheiten an; vergrößert sich der Seitendruck um eine Einheit, so sinkt der ASIX-Wert um 1,5 Einheiten. Dagegen ist es für den relativen Astdurchmesser unerheblich, welches Alter eine Buche hat. Dem Schätzwert fehlt nicht nur die Signifikanz, er ist auch mit einem überproportional hohen Standardfehler versehen. Bedeutend ist auch, wie hoch im Baum der stärkste Grünast ansetzt. Wenn er um einen Meter höher sitzt, verringert sich der relative Astdurchmesser um 1,9 Einheiten. Bei genauem Blick auf die Daten zeigt sich, dass der Astansatzhöhe im Zusammenspiel mit der Überschildung Bedeutung zukommt. Der Trend höherer relativer Astdurchmesserwerte bei steigendem Schirmdruck wird von Bäumen verursacht, deren stärkste Grünäste in den unteren 1,5m ansetzen (rechte Grafik). Die Höhen dieser Buchen bewegen sich zwischen 1,68m und 4,19m mit einem Median von 2,38m. Im Vergleich zum Gesamtkollektiv handelt es sich folglich um relativ kleine Bäume. Wenn die maximale Grünaststärke in einer Höhe zwischen 1,51m und 3,00m ansetzt (rote Punkte), sind die Bäume zwischen 4,60m bis 9,30m hoch bei einem Median von 5,57m. Für die Bäume, die mit blauen Punkten dargestellt sind, schwanken die Höhen zwischen 6,00m und 11,70m mit einem Median von 8,06m.

kleinster Grünastansatzwinkel

Nicht nur die Astdurchmesser einer Buche sind bedeutend für deren Qualität, sondern auch die Astansatzwinkel. Kleine Astansatzwinkel sind forstwirtschaftlich unerwünscht. Im folgenden Modell wird von den stärksten Grünästen je Stammabschnitt, folglich höchstens drei je Baum, derjenige mit dem kleinsten Astansatzwinkel ausgewählt. Diese Winkel bilden die abhängige Größe, die das Modell schätzen soll. Das Endmodell ist das einzige aus sechs möglichen gültigen, das akzeptable Kollinearitätswerte hat. Dafür sind bei diesem Modell die AIC-Werte die höchsten, folglich ist die Anpassung an die Daten am schlechtesten.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	36,543	8,002	156	4,567	0,000***	
Schirmdruck: Grundfläche [m ² /ha]	0,275	0,127	156	2,175	0,031*	1,527
Seitendruck: Standraum [m ²]	0,128	1,261	156	0,102	0,919	1,302
Alter [a]	0,562	0,305	17	1,843	0,083	1,481
Astansatzhöhe [m]	-2,113	1,407	156	-1,501	0,135	1,817

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
179	0,002	0,000	16,267

Abbildung 4-13: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den kleinsten Astansatzwinkel über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der grafischen Darstellung ist die Astansatzhöhe auf 2m fixiert. In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Das Modell bescheinigt der Schirmwirkung den größten Einfluss auf den Astansatzwinkel unter den untersuchten Einflussgrößen. Mit einem Mehr von 10m²/ha Grundfläche des Altbestandes nehmen die Astansatzwinkel um 2,7° zu. Diese Effektwirkung ist als einzige signifikant. Für den Standraum lassen sich dagegen überhaupt keine Tendenzen nachweisen. Der Standardfehler ist exorbitant hoch im Vergleich zum Schätzwert. Ältere Buchen haben tendenziell

größere Astwinkel, auch wenn der Parameter nicht signifikant ist. Auch die Astansatzhöhe spiegelt einen Trend wider: Je weiter unten am Stamm sich der betreffende Ast befindet, desto waagerechter geht der Ast vom Stamm ab. Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die jüngsten Buchen. Bei diesen Bäumen streuen die Astansatzwinkel am meisten (mittlere und rechte Grafik). Aber auch insgesamt streuen die Werte sehr stark. Steil ansetzende Äste mit Winkeln kleiner als 20° kommen bei allen Überschirmungsstufen vor, wenn auch am häufigsten bei geringer Altbestandsdichte.

Astwinkelindex nach HAGEMANN

Der Astwinkelindex nach HAGEMANN (2005 S. 44f) bietet den Vorteil, dass sich das Spektrum an unerwünschten Morphologien nicht nur auf die Astansatzwinkel, sondern auch auf die Astdimension bezieht. Erhöht sich der Wert für den Astwinkelindex bedeutet das aus forstwirtschaftlicher Sicht eine zunehmend unerwünschte Morphologie. Höchste Werte erreichen Äste, die einen großen Durchmesser haben und steil am Stamm ansetzen. Hinter einem gleichen Astwinkelindex können sich sowohl stark dimensionierte Äste mit großem Astansatzwinkel oder dünne, steil ansetzende Äste verbergen. Die folgende Grafik veranschaulicht anhand der Daten, welche Bandbreite der Astwinkelindex innerhalb der Astwinkelklassen in Abhängigkeit vom stärksten Grünastdurchmesser einnimmt. Der AWI bezieht sich auf den stärksten grünen Ast der Bäume bis in eine Höhe von maximal 4,50m.

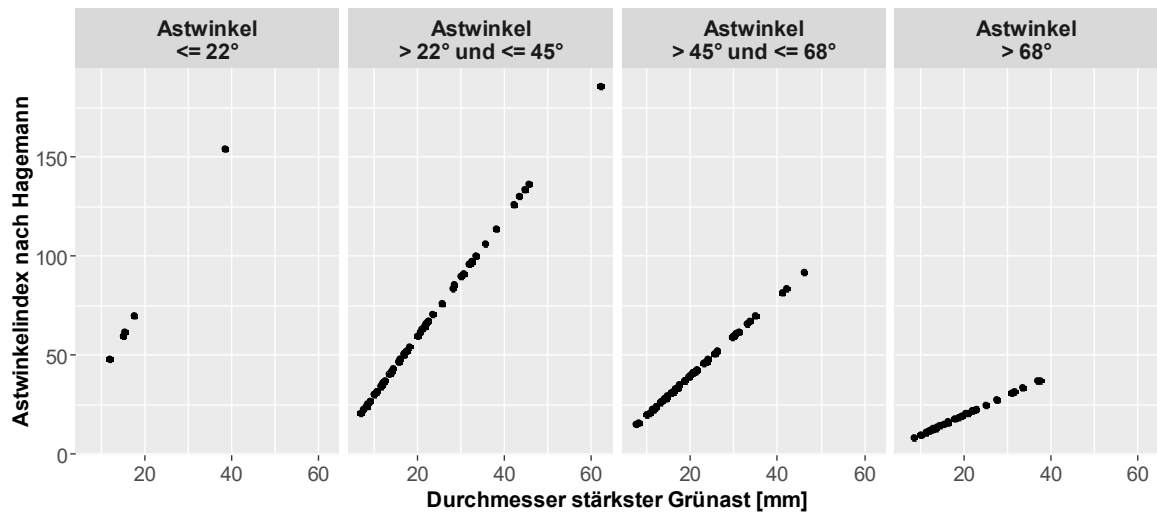
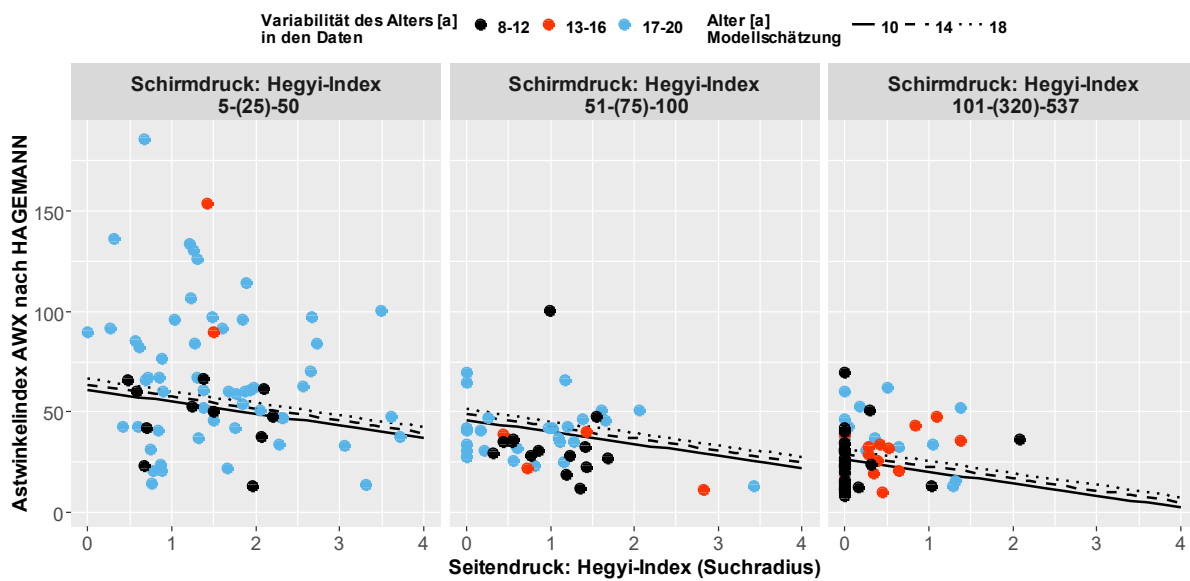


Abbildung 4-14: grafische Darstellung des Astwinkelindex' nach HAGEMANN (2005) nach Ansatz-Winkelklassen über dem Grünastdurchmesser

Die Mehrheit der Astwinkel bewegt sich zwischen 22° und 68° , sehr steil ansetzende Äste kommen im Datensatz selten vor. Unerwünscht steil ansetzende Äste mit Winkeln unter 46° lassen sich eindeutig als solche abgrenzen, die einen Indexwert kleiner als 100 haben. Die Grafiken zwei bis vier verdeutlichen auch, dass dickere Äste zunehmend steiler sind. Wegen mangelnder Daten im Astdurchmesserbereich ab 50mm und über 60mm hinaus kann man die erste Grafik zu diesem Schluss nicht heranziehen. Das Modell für den Astwinkelindex beschreibt die Zusammenhänge wie folgt:

4 Ergebnisse



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	95,758	14,880	156	6,436	0,000***	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	-31,429	5,214	156	-6,028	0,000***	2,869
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	-5,957	2,347	156	-2,538	0,012*	2,027
Alter [a]	0,661	0,335	17	1,972	0,065	1,419
Astansatzhöhe [a]	1,310	2,297	156	0,570	0,569	2,030

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
179	0,002	0,000	0,370

Abbildung 4-15: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Astwinkelindex nach HAGEMANN (2005) über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der grafischen Darstellung ist die Astansatzhöhe auf 2m fixiert. In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Buchen, die unter dichterem Altbestandesschirm wachsen haben höchstsignifikant niedrigere Indexwerte als Bäume mit geringfügiger Überschirmung. In Zahlen ausgedrückt sind das bei 10% erhöhtem Schirmdruck 1,3 Einheiten weniger. Der gleiche Trend zeichnet sich für den Seitendruck ab, wenn auch nur in geringerem Maße. Der signifikante Schätzwert zeigt, dass eine um eine Einheit stärker seitlich bedrängte Buche einen um sechs Einheiten niedrigeren Indexwert aufweist.

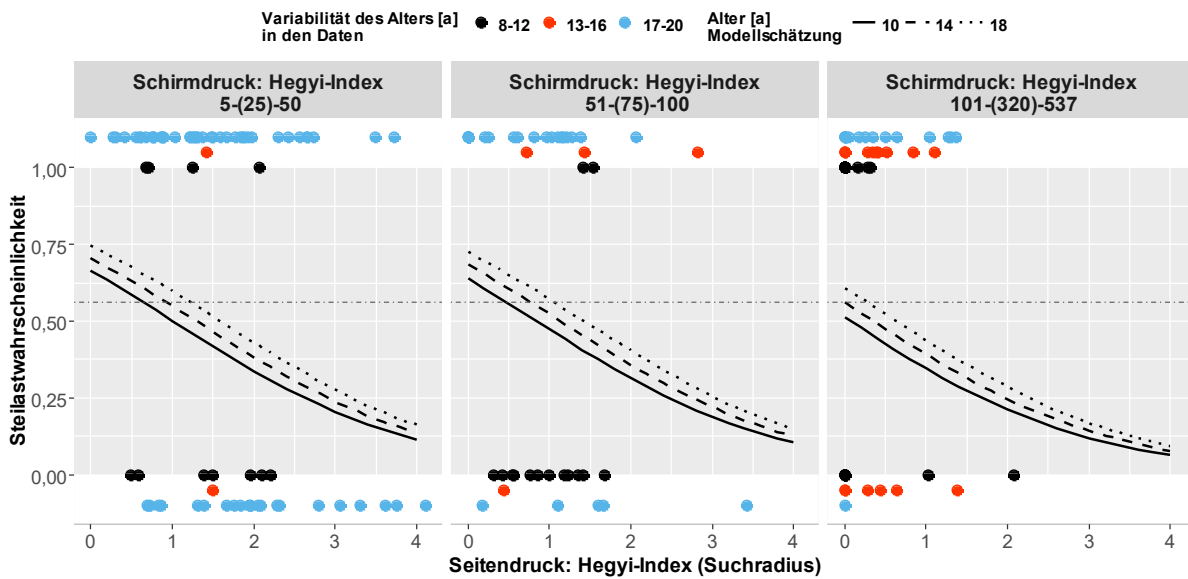
Buchen mit steil ansetzenden Ästen und Indexwerten über 100 kommen schon bei mittlerer Überschirmungsintensität nicht mehr vor (mittlere Grafik). Je älter die betreffende Buche ist, desto mehr vergrößert sich der Indexwert, wenn auch nicht signifikant. Dagegen ist es für den Astwinkelindex unerheblich, in welcher Höhe der stärkste grüne Ast ansetzt.

Steilastigkeit

Steiläste nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition (vgl. Tabelle 3-10) stellen einen Ausschnitt aus der astmorphologischen Bandbreite dar, die der AWI nach HAGEMANN abbildet. Es handelt sich um die Äste, die die höchsten Indexwerte aufweisen – sie setzen mit einem Winkel von unter $22,5^\circ$ an und sind von großer Dimension.

Bei der Modellierung wird auf eine dichotome abhängige Variablen zurückgegriffen. Weist eine Buche Steiläste auf, bekommt sie den Wert Eins zugewiesen, hat sie keine Steiläste, den Wert Null. Das rührt daher, dass die Variable „Anzahl an Steilästen“ weder einer Poisson- noch einer Binomialverteilung entspricht. Die χ^2 -Anpassungstests zeigten bei Likelihood-Ratio-Testgrößen von 58,403 bzw. 108,216 bei jeweils sieben Freiheitsgraden höchstsignifikante Abweichungen mit Werten von $0,000^{***}$ bzw. $0,000^{***}$. Die Verteilung der Variable „Steilastigkeit“ kommt zwar einer negativen Binomialverteilung näher wie die Testgröße von 17,998 ausweist, ist aber laut χ^2 -Test bei sechs Freiheitsgraden und einem Signifikanzwert von $0,006^{**}$ immer noch hochsignifikant davon verschieden. Das relativ beste Modell unter den gemischten binären logistischen Regressionen führt zu folgenden Ergebnissen:

4 Ergebnisse



Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF
Interzept	1,280	0,089-18,513	0,181	0,856	
Schirmdruck: Hegyi-Index	0,998	0,994-1,002	-0,898	0,369	1,714
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	0,507	0,296-0,868	-2,481	0,013*	1,623
Alter	1,050	0,917-1,202	0,712	0,477	1,702

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland
186	1,141	0,617
Schwellenwert	Klassifizierungsgüte	
0,563	0,801	

Abbildung 4-16: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Stellastwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

Die gestrichelte Linie in der Grafik markiert den optimalen Trennwert für die Klassifizierung¹⁴. In der Übersicht Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werten, Anzahl an Beobachtungen, der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung, dem optimalen Schwellenwert für die Klassifizierung und die Klassifizierungsgüte

¹⁴ Mit Hilfe der Modelle können die geschätzten Werte auch in die diskreten Merkmalsausprägungen (0 oder 1) klassifiziert werden. Beim optimalen Schwellenwert liegen die Anteile richtig klassifizierter Individuen am höchsten, die der falsch klassifizierten am niedrigsten (HEIN & WEISKITTEL 2010, HEDDERICH & SACHS 2016 S. 180ff). Eine Klassifizierungsgüte von 1 ist ein perfektes Ergebnis. Die verwendete ROC-Analyse (HEDDERICH & SACHS ebd.) ist in R mit dem Paket ROCR von SING et al. (2005) berechnet.

Das Modell zeigt nur für den Seitendruck einen signifikanten Schätzwert. Mit jeder Einheit, die der innerartlicher Wettbewerb im Voranbau ansteigt, sinkt die Wahrscheinlichkeit eine steilastige Buche anzutreffen, um die Hälfte (*ceteris paribus*). Hingegen ist es unerheblich für die Steilastwahrscheinlichkeit, ob sich der Schirmdruck ändert oder nicht. Die Linien in den Grafiken schneiden in allen Fällen die 0,5-Trennwertlinie, das Ausmaß zwischen linker und rechter Grafik ist nahezu gleich. Es lässt sich nur anhand der Modellschätzung erahnen, dass bei hohen Überschildungsdichten und schwachem Seitendruck steilastige Buchen geringfügig weniger wahrscheinlich sind. Das Alter ist ebenso wie der Schirmdruck nicht signifikant. Dafür sind die mittelalten und jungen Buchen verantwortlich – die Datenpunkte trennen sich horizontal nicht in einen unteren rechten und einen oberen linken Block (schwarze und rote Punkte an den oberen und unteren Rändern). Bei den ältesten Buchen hingegen ist diese seitliche Verschiebung der unteren und oberen Datenpunkte zu erahnen, was sich auch im tendenzgebenden 95%-Konfidenzintervall widerspiegelt.

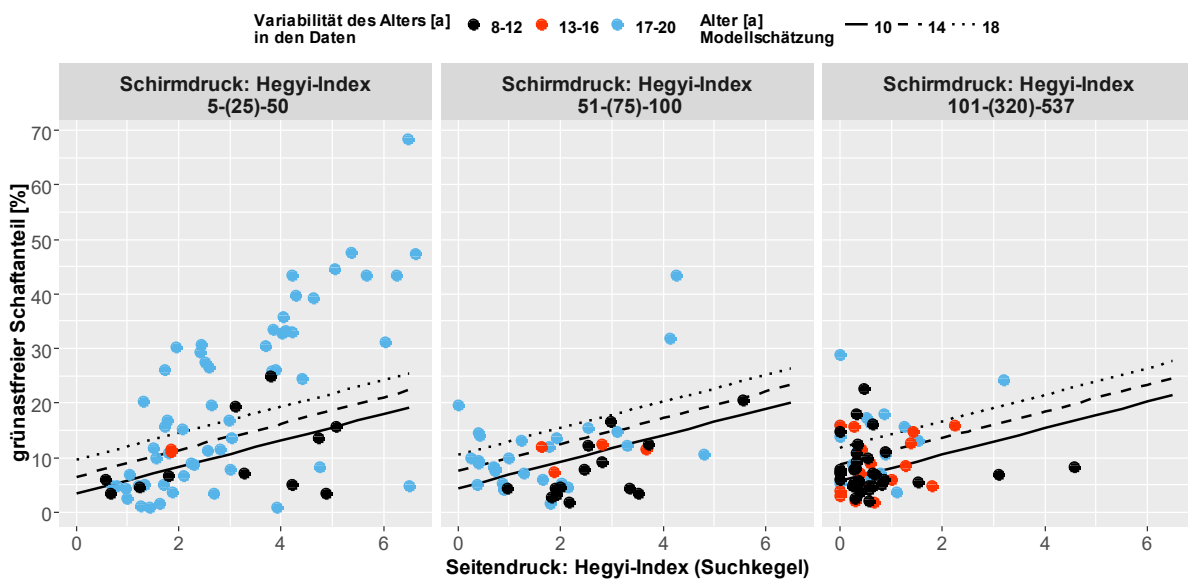
4.2.2.2 Ergebnisse zur Astreinigung

Wenn das Erziehungsziel für Buchenvoranbauten darin besteht, schnell astfreie Schäfte zu erzielen, muss die Astreinigung im Auge behalten werden. Zu unterscheiden ist dabei, ob sich der Schaft lebender Äste und/oder toter Äste entledigt hat.

Schaftanteil ohne Grünäste

Die Astreinigung stellt ein zentrales Element bei der Erziehung qualitativ hochwertigen Holzes dar. Daher widmet sich das nachfolgend vorgestellte Modell der Frage, welchen Einfluss Schirm- und Seitendruck sowie das Alter darauf haben, zu welchem Anteil sich der Baum grüner Äste entledigt hat. Tote Äste können am Stamm jedoch immer noch auftreten.

4 Ergebnisse



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	-7,199	6,318	159	-1,139	0,256	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	2,019	1,742	159	1,159	0,248	1,329
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	2,428	0,488	159	4,971	0,000***	1,229
Alter [a]	0,778	0,297	17	2,623	0,018*	1,164

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
181	2,978	4,789	0,554

Abbildung 4-17: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Prozentanteil des grünastfreien Schaftes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Das Modell zeigt klar den herausragenden Effekt des Seitendruckes auf die Grünastreinigung an. Nimmt er um eine Einheit zu, so erhöht sich der astgereinigte Schaftanteil um 2,4% unter sonst gleichen Bedingungen. Dieselbe Wirkrichtung liegt einem erhöhten Schirmdruck zugrunde. Steigt die Altbestandeskonkurrenz um 10% an, so reagiert die Buche im Voranbau mit einer minimal erhöhten Astreinigung um 0,08 Einheiten. Dieser Effekt ist nicht

signifikant, weil bei den ältesten Buchen, die nur geringfügig überschirmt sind (linke Grafik) sehr hohe Streuungen vorliegen. Sie nehmen zu, wenn sich gleichzeitig der Seitendruck erhöht. Selbst wenn der Konkurrenzdruck im Voranbau hohe Werte von mehr als vier annimmt, gibt es immer noch Buchen mit weniger als 10% astgereinigten Schaftes die solchen mit 50% oder sogar 70% gegenüberstehen. Das Modell unterschätzt folglich bei niedrigen Überschirmungsdichten den grünastfreien Schaftanteil. Würde die Wechselwirkung zwischen Schirm- und Seitendruck in das Modell eingebracht um dieses Phänomen besser abbilden zu können, führte das zwar zu einer signifikanten Modellverbesserung. Sie müsste aber durch eine enorm gestiegene Multikollinearität erkauft werden – für den Seitendruck und den Wechselwirkungsterm bedeutete das inakzeptable Varianzinflationsfaktorwerte von mehr als 20. Die Buchen mit einem Alter von mehr als 16 Jahren sind trotz ihrer großen Bandbreite an astgereinigten Schaftanteilen maßgeblich für die Signifikanz des Alters verantwortlich. So weist das Modell mit höherem Alter auch einen zunehmend astgereinigten Schaftanteil aus.

Ästigkeitsindex

Die Astreinigung kann als Prozess aufgefasst werden, der mit rückläufiger Astvitalität beginnt, zum Absterben des betreffenden Astes führt und damit endet, dass auch der tote Ast nach Zersetzungsprozessen und mechanischer Krafteinwirkung abbricht (BUTIN & KOWALSKI 1983). Der Ästigkeitsindex fasst das Spektrum von Schaftabschnitten ohne Äste bis hin zu solchen mit Grün- und/oder Totästen in einer Maßzahl zusammen. Diese nimmt den Wert Null an, wenn der Schaft ohne jegliche Äste ist und steigt an, je mehr Äste vorhanden sind. Sind bereits Äste abgestorben, aber noch am Baum vorhanden, steigt der Index im Verhältnis gesehen nicht so stark an, als wenn Grünäste vorzufinden sind. Weil davon auszugehen ist, dass die Astreinigung entlang der Schaftachse unterschiedlich verläuft, werden die drei Schaftabschnitte separat ausgewertet. Um zunächst einen deskriptiven Überblick über den Ästigkeitsindex zu geben, sei dieser nachfolgend getrennt nach Schaftabschnitten veranschaulicht.

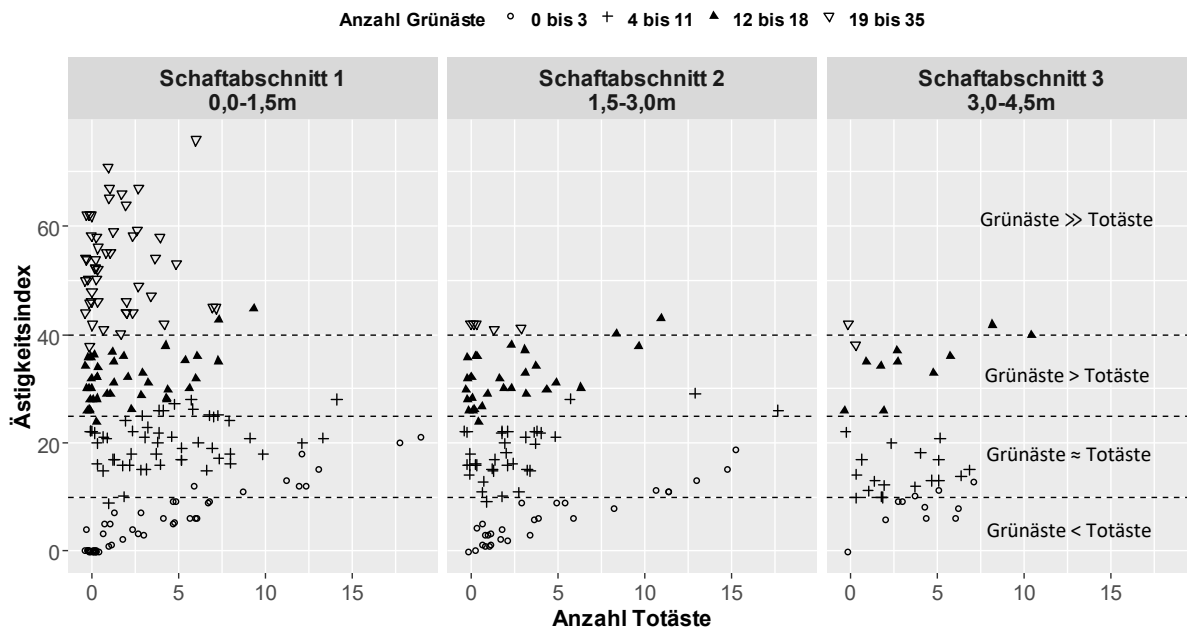
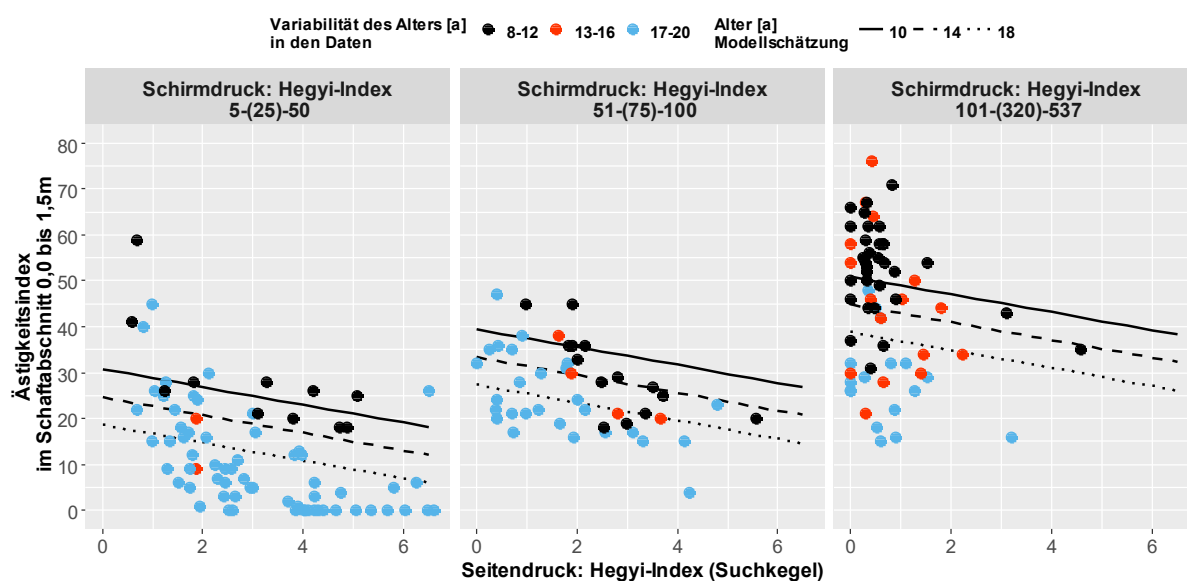


Abbildung 4-18: Darstellung des Ästigkeitsindex⁴ über der Anzahl toter Äste und nach der Anzahl grüner Äste getrennt für die Schaftabschnitte.

Die einzelnen Werte sind wegen der besseren Sichtbarkeit gejittert. Schaftabschnitt 1: n = 186, Schaftabschnitt 2: n = 95, Schaftabschnitt 3: n = 41

Tatsächlich gibt es augenscheinliche Unterschiede zwischen den Schaftabschnitten festzuhalten. Diese bestehen nicht zuletzt in der Zusammensetzung des Probandenkollektivs – im Schaftabschnitt 1 sind alle Bäume enthalten, im zweiten nur solche mit einer Baumhöhe ab 4,50m und im dritten nur Buchen, die mehr als 6,00m Höhe messen. Die linke Grafik zeigt, dass im untersten Abschnitt die höchsten Werte von mehr als 60 erreicht werden. Es handelt sich dabei um Bäume mit sehr hohen Anzahlen an Grünästen. Im zweiten und dritten Abschnitt klettert der Ästigkeitsindex dagegen nur in wenigen Fällen bis auf knapp über 40, was bedeutet, dass in der Regel geringfügig mehr grüne als tote Äste auftreten. Das breiteste Spektrum an Totastanzahlen ist ebenfalls im ersten Schaftabschnitt zu finden. Es reicht von 0 bis 19 und verkleinert sich, je höher die Betrachtungsebene am Baum liegt. Deutlich wird auch, dass der Index ansteigt, wenn sich mehr Totäste am Schaft befinden. Die Klarheit dieser Tendenz nimmt ab, wenn die Grünastanzahl simultan zunimmt.

Die besten Modelle bestehen alle aus den gleichen erklärenden Variablen, aus dem Hegyi-Index für den Schirmdruck, dem suchkegelbasierten Hegyi-Index für die Verjüngungskonkurrenz und dem Alter.



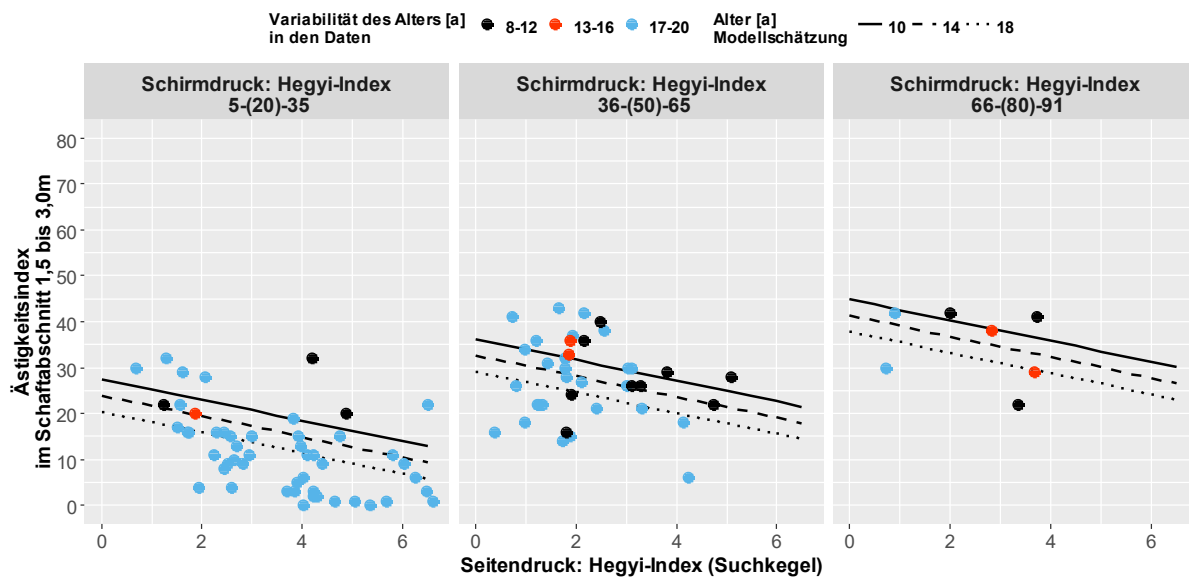
Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	20,447	6,400	164	3,195	0,002**	
Schirmdruck: log10(Hegyri-Index)	18,224	1,854	164	9,828	0,000***	1,385
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-1,946	0,259	164	-7,526	0,000***	1,144
Alter [a]	-1,517	0,286	17	-5,301	0,000***	1,401

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
186	0,001	4,322	1,576

Abbildung 4-19: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 1 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

4 Ergebnisse

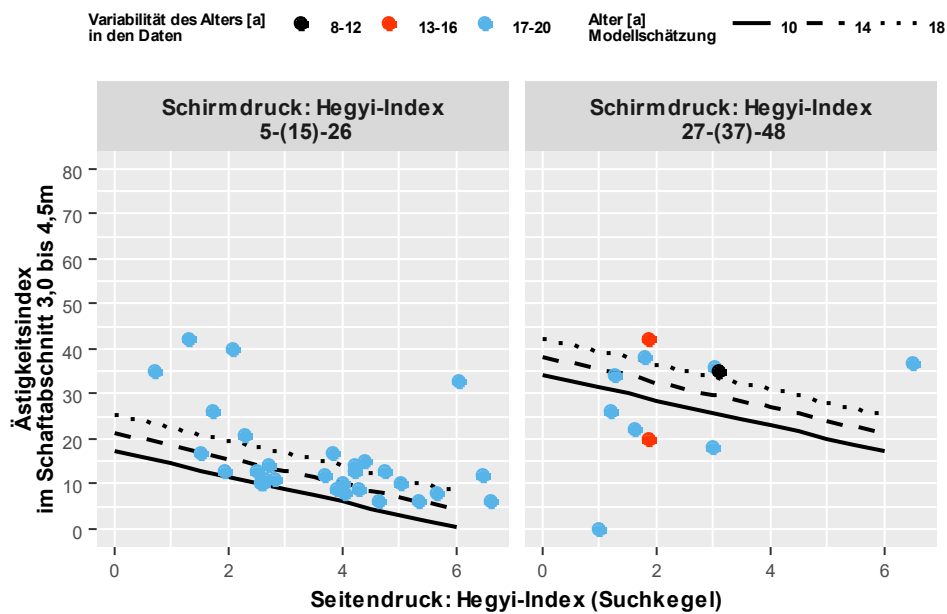


Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	30,562	6,138	77	4,979	0,000***	
Schirmdruck: Hegyi-Index	0,289	0,048	77	6,021	0,000***	1,196
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-2,255	0,423	77	-5,336	0,000***	1,045
Alter [a]	-0,884	0,302	13	-2,925	0,012*	1,175

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
95	0,001	3,068	1,448

Abbildung 4-20: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 2 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	-4,375	13,327	29	-0,328	0,745	
Schirmdruck: Hegyi-Index	0,772	0,122	29	6,347	0,000***	1,357
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	-2,805	0,588	29	-4,770	0,000***	1,841
Alter [a]	1,001	0,735	7	1,360	0,216	2,045

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
41	0,021	0,000	0,069

Abbildung 4-21: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 3 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Die Astreinigung wird in allen drei Schaftabschnitten in höchstsignifikantem Maße von der Überschirmungsintensität gleichgerichtet beeinflusst. Der Einfluss nimmt zu, je höher der betrachtete Schaftabschnitt liegt. Wenn sich die Konkurrenz durch den Altbestand um 10% erhöht, so steigt der Ästigkeitsindex im

Schaftabschnitt eins um 0,8 Einheiten. Wird der Schirmdruck um zehn Einheiten größer, so steigt der Indexwert im zweiten Schaftabschnitt um 2,9 und im dritten Schaftabschnitt um 7 Einheiten. Dieses Ergebnis besagt, dass stark überschirmte Buchen mehr Äste ausbilden, die wiederum als tragende Strukturen für die photosynthetisch aktive Blattmasse dienen. Über die räumliche Anordnung der Äste und Blattmasse trifft das Modell aber genauso wenig eine Aussage wie zu den Astdimensionen.

Ein erhöhter Seitendruck wirkt in die entgegengesetzte Richtung. Steigt er an, so wird höchstsignifikant eine verbesserte Astreinigung erzielt. Erhöht sich die Verjüngungskonkurrenz um eine Einheit, so nehmen die Indexwerte in den Schaftabschnitten 1 bis 3 um 1,9, um 2,3 bzw. um 2,8 Einheiten ab. Der Effekt ist stärker ausgebildet als der des Schirmdrucks. An dieser Stelle ist der Blick auf die Daten wichtig. Die ersten beiden Modelle beinhalten vergleichsweise mehr mittelalte und junge Buchen als das dritte Modell. Sie sind in beiden Fällen dafür verantwortlich, dass das Modell den Ästigkeitsindex bei geringfügig überschirmten Buchen überschätzt (jeweils linke Grafiken).

Für die Schätzwerte des Alters zeigt das einen Bedeutungsverlust an, je höher sich der Schaftabschnitt am Baum befindet. Während die Modelle für die untersten beiden Schaftabschnitte noch signifikant und klar zeigen, dass sich mit höherem Alter die Astreinigung verbessert, gilt das für den dritten Schaftabschnitt nicht. Der Schätzer für das Alter zeigt zwar eine gegenläufige Tendenz an, die aber nur auf drei Bäumen jüngeren Alters mit hohen Indexwerten beruht und daher inhaltlich keine Bedeutung hat. Im dritten Schaftabschnitt unterschätzt das Modell die Ästigkeitsindex-Werte bei sehr geringfügiger Altbestandskonkurrenz (linke Grafik).

Um die Modellergebnisse mit der Frage des Astreinigungsprozesses zu verknüpfen, werden die Grenzen der Indexwerte aus Abbildung 4-18 gedanklich in die Modellgrafiken übertragen und die ältesten Buchen des Datensatzes betrachtet (gestrichelte Linien). Der Grenzwert, ab wann im untersten Schaftabschnitt (Abbildung 4-19) mehr tote als grüne Äste auftreten (Indexwert unter zehn), verschiebt sich mit höherem Schirmdruck weit außerhalb des Abszissen-Wertebereiches der Daten. Nur bei geringer Altholzkonkurrenz ist eine solche schnelle Astreinigung zu erwarten, wenn gleichzeitig der Seitendruck einen Indexwert von rd. 3,7 und mehr annimmt. Im nächsthöheren Schaftabschnitt (Abbildung 4-20) ist dazu ein höherer Seitendruck-Indexwert von mehr als 6,0

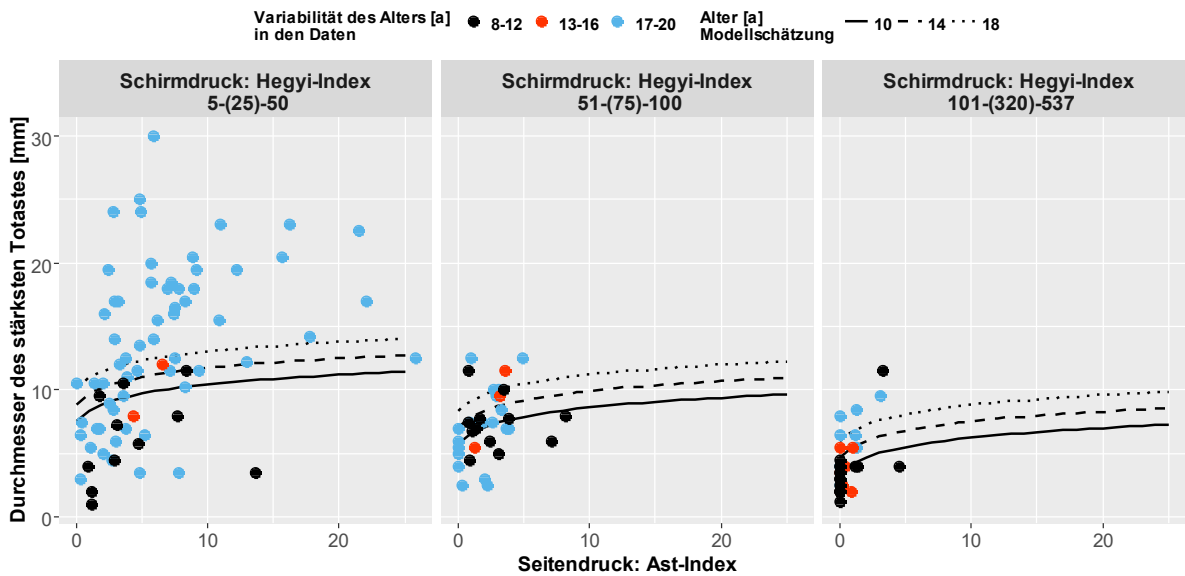
notwendig. Im dritten Abschnitt (Abschnitt 4-21) liegt der Schnittpunkt zwischen Modellgerade und dem Ästigkeitsindex von zehn außerhalb des Wertebereiches der Daten, unabhängig davon, wie dicht der Schirm ist.

Der Bereich, in dem sich ein Gleichgewicht zwischen Grün- und Totastanzahl eingestellt hat (Index zwischen 10 und 25), ändert sich ebenso mit steigender Überschirmung und höherem Schaftabschnitt. Das Modell schätzt in den ersten anderthalb Stammmetern, dass bei Buchen von 14 bzw. 18 Jahren unabhängig vom Seitendruck dieses Gleichgewicht nahezu gehalten wird, wenn sie nur geringfügig durch den Altbestand überschirmt werden. Das bleibt auch in den nächsthöheren 1,5m so (Abbildung 4-20 linke Grafik). Bei mittleren Schirmdichten (Abbildung 4-19 mittlere Grafik) liegen nur Bäume von 18 Jahren in dieser Gleichgewichtszone, wenn sie einem Seitendruck von mindestens rd. 2,7 ausgesetzt sind. Ähnlich verhält es sich im zweiten Schaftabschnitt (Abbildung 4-20 mittlere Grafik). Bei Buchen von 18 Jahren, die nur äußerst geringfügig von Fichten überschirmt sind, nimmt das Modell für den dritten Schaftabschnitt noch unabhängig vom Seitendruck diese Gleichgewichtszone an (Abbildung 4-21). Sobald sich die Überschirmung geringfügig erhöht, überwiegen nach dem Modell eindeutig die Grünäste. Dieser Sprung ist äußerst intensiv, weil beide Grafiken der Abbildung 4-21 nur den Schirmdruck-Wertebereich der jeweils linken Grafiken zu den Modellen für die Schaftabschnitte eins und zwei abdecken.

Die völlige Astreinigung soll noch anhand der Daten überprüft werden. Dazu dient der Indexwert von Null, der anzeigt, dass eine Buche weder grüne noch tote Äste mehr im betreffenden Schaftabschnitt hat. Bis in eine Höhe von 1,5m am Stamm haben Bäume einen Indexwert von Null, wenn die Überschirmung gering ist und die Verjüngungskonkurrenz ausgedrückt durch den Hegyi-Index einen Wert von 2,5 oder mehr annimmt (Abbildung 4-19 linke Grafik). Es handelt sich durchweg um die ältesten Buchen. Das bleibt auch in einer Schafthöhe von 1,5 bis 3,0m so, wiewohl es hier einen höheren Seitendruck mit Werten von vier oder mehr erfordert, um völlig astfreie Schäfte zu erhalten (Abb. 4-20). Versetzt man die Betrachtungsebene um weitere 1,5m nach oben, findet sich nur ein Baum, der in dieser Höhe keine Äste mehr aufweist, was keine eingehende Betrachtung mehr erlaubt (Abb. 4-21).

Durchmesser des stärksten Totastes

Aus dem vorangehenden Abschnitt blieb die Frage offen, um welche Astdimensionen es sich handelt, deren sich ein Baum bereits entledigen konnte. Ein Modell zum absoluten Durchmesser des stärksten Totastes soll diese Lücke füllen.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	7,856	3,126	119	2,513	0,013*	
Schirmdruck: log10(Hegy-Index)	-3,778	1,037	119	-3,643	0,000***	2,036
Seitendruck: log10(Astindex)	2,736	1,064	119	2,572	0,011*	1,870
Alter [a]	0,323	0,122	17	2,635	0,017*	1,311
Astansatzhöhe [m]	0,892	0,482	119	1,849	0,067	1,357

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
142	1,100	1,866	0,429

Abbildung 4-22: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der grafischen Darstellung ist die Astansatzhöhe auf 2m fixiert. In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Der maximale Totastdurchmesser wird im Modell am wahrscheinlichsten durch den Schirmdruck reproduziert. Als Maß für den Seitendruck bewährte sich der Astindex am besten, der vor allem die Konkurrenz um Wuchsraum und Licht in der Krone selbst verkörpert. Bemerkenswert ist weiterhin, dass sich die Wirkrichtung der Überschirmung der Altfichten und der innerartlichen Konkurrenz im Vergleich zum Astreinigungsmodell umkehrt: Wenn die Überschirmung ansteigt, stirbt ein Ast bei immer kleineren Dimensionen ab. Bei einem Mehr an 10% Schirmdruck sinkt der absolute Totastdurchmesser um 0,16mm. Es handelt sich entsprechend der Daten vor allem um Bäume, die entweder keiner oder einer sehr geringen Astkonkurrenz unterliegen (rechte Grafik). Hingegen führt ein um 10% gestiegener Seitendruck zu einem um 0,11mm höheren Totastdurchmesser.

Damit wird deutlich gezeigt, dass ein hoher innerartlicher Konkurrenzdruck im Kronenbereich notwendig ist, wenn starke Äste absterben sollen. Große Totastdurchmesser mit mehr als 10mm Durchmesser sind – wie die Daten zeigen – bei niedrigen Schirmdichten des Altbestandes und bei messbarer Astkonkurrenz in der Krone zu erwarten (linke Grafik). Ab einem Astindexwert von fünf scheint es hingegen unerheblich, ob sich die innerartliche Kronenkonkurrenz intensiviert oder nicht – es sterben immer Äste bis ca. 25mm Dicke ab. Das Modell berücksichtigt dies durch einen sigmoiden Kurvenverlauf, wenngleich die Totastdurchmesser verglichen mit den Daten unterschätzt werden.

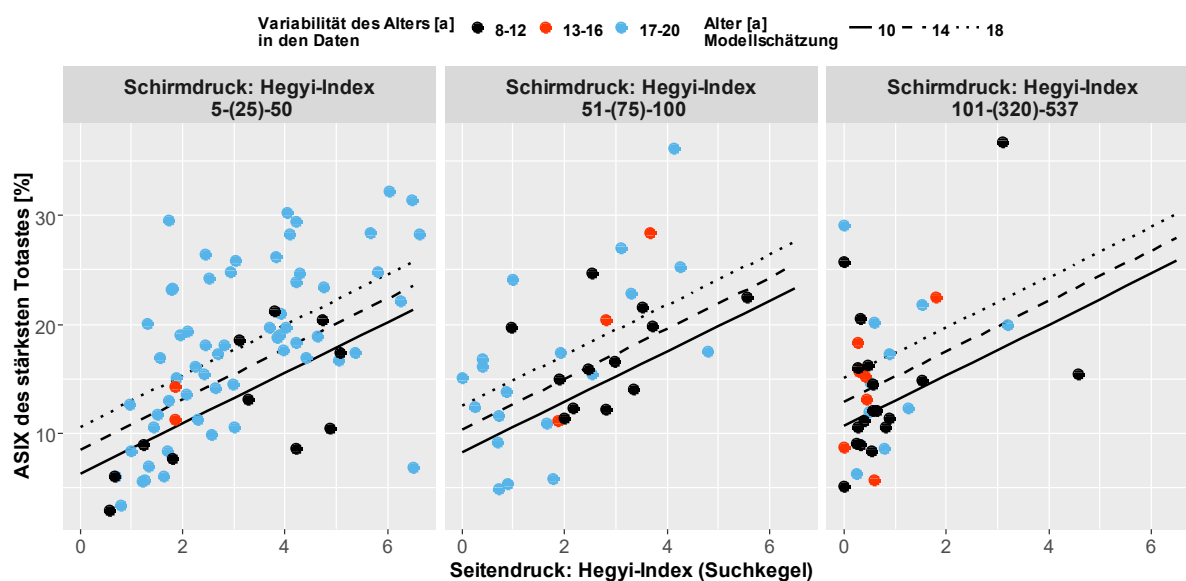
Diese Befunde sind für die ältesten Buchen bei geringer Überschirmungsdichte (linke Grafik) augenscheinlich aus den Daten zu erkennen. Diese hohen Streuungen der Totastdurchmesser bei geringer Überschirmung sind aber nicht ausschließlich auf die Wirkung der Altbestandsdichte zurückzuführen, sondern sie beinhalten auch die Variation der Astansatzhöhe. Das Modell weist den Schätzer für das Alter auch als signifikant aus, ältere Bäume haben folglich dickere Totäste als jüngere.

Damit im Zusammenhang zu sehen ist der Schätzer für die Astansatzhöhe. Er gibt für höher ansetzende Totäste stärkere Totastdimensionen aus, die wiederum bei älteren Buchen zu finden sind. Man kann ableiten, dass sich der seitliche Konkurrenzdruck durch fortschreitendes Wachstum zuerst im unteren Schaftbereich einer Buche intensiviert. Grüne Äste bleiben dann von vornherein vergleichsweise dünn. Zeitgleich sind der Seitendruck und die Selbstbeschattung in höheren Stammbereichen zunächst weniger stark ausgeprägt, sodass sich mit

fortschreitendem Alter auch dickere Grünäste bilden können, die wiederum erst später absterben.

Astreinigungsintensität (ASIX stärkster Totast)

Der relative Totastdurchmesser setzt den absoluten Totastdurchmesser mit dem Wurzelhalsdurchmesser in Beziehung. Er ist ein Maß dafür, inwieweit Starkastigkeit wieder verschwinden kann und bildet somit die Astreinigungsintensität ab.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	-4,036	5,919	119	-0,682	0,497	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	3,995	2,020	119	1,978	0,050*	1,763
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	2,325	0,409	119	5,683	0,000***	1,287
Alter [a]	0,541	0,229	17	2,366	0,030*	1,476
log10(Astansatzhöhe [m])	-2,263	1,748	119	-1,295	0,198	1,505

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
142	1,044	3,094	5,455

Abbildung 4-23: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den relativen Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der grafischen Darstellung ist die Astansatzhöhe auf 2m fixiert. In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

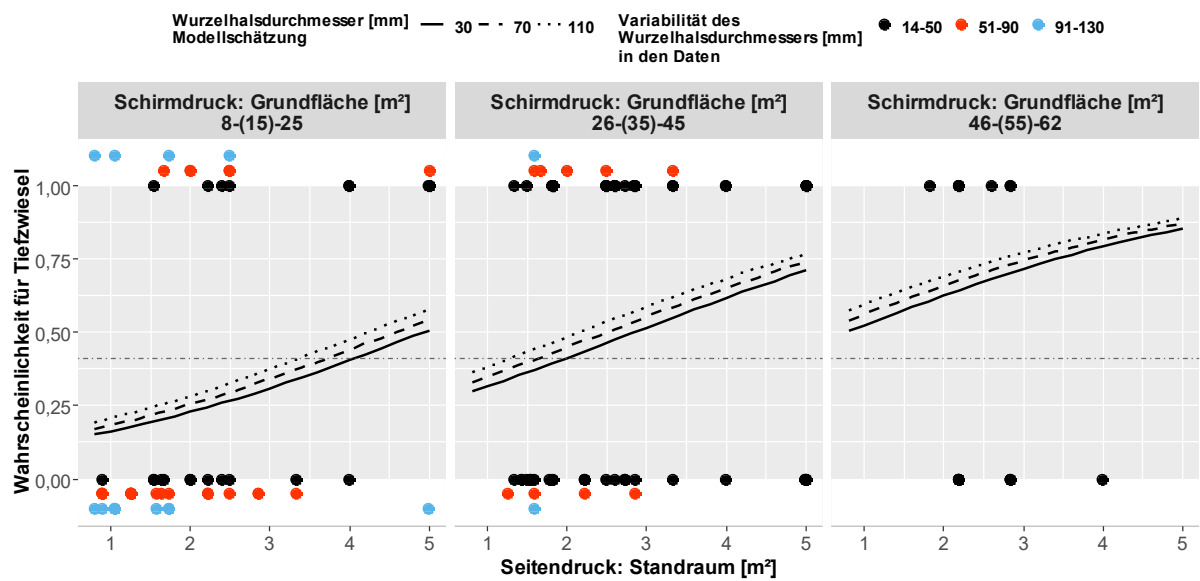
Die bestimmende Größe im Modell ist der Seitendruck. Nimmt er um eine Einheit zu, so erhöht sich der ASIX-Wert höchstsignifikant um 2,3 Einheiten. Ist eine Buche vergleichsweise starkastig, so bedarf es eines immer höheren Seitendrucks, damit starke Äste absterben. Hingegen hat eine erhöhte Schirmdichte einen geringeren Effekt. Die Modellschätzung zeigt, dass sich bei steigender

Altholzkonzurrenz der Totastdurchmesser gegenüber dem Wurzelhalsdurchmesser erhöht. In Zahlen ausgedrückt, bedeutet das bei einem um 10% gestiegenen Schirmdruck eine ASIX-Zunahme um 0,17 Einheiten. Buchen, die stark überschirmt werden, dafür aber geringfügiger unter Seitendruck stehen, haben Totäste der gleichen relativen Dimension wie Bäume mit geringer Überschirmungsdichte und höherem Seitendruck. Im Vergleich der linken und rechten Grafik zeigt sich das anhand der Daten deutlich. Folglich liegen einheitliche Mechanismen zugrunde, nach denen ein Baum einen starken Ast nicht mehr mit Assimilaten versorgt. Der Altersschätzer zeigt für ältere Buchen einen signifikant höheren ASIX-Wert an wie für jüngere. Beim Blick auf die Daten bestätigt sich dies für Bäume mit geringfügiger Überschirmung (linke Grafik). Nimmt die Überschirmung zu, verschwimmt dieser klare Trend (rechte Grafik). Dann haben selbst sehr junge Buchen dasselbe hohe Durchmesser Verhältnis wie die ältesten.

4.2.2.3 Ergebnisse zur Stammform

Vorhandensein von Tiefzwieseln

Wenn sich bei einer Voranbau-Buche der Schaft in zwei annähernd gleichwertige Hauptachsen teilt, handelt es sich um eine forstlich unerwünschte morphologische Eigenschaft (RICHTER 2010 S. 50). Besonders negativ zu bewerten sind Zwiesel, die bereits weit unten am Stamm vorkommen. Aus diesem Grund wurde das Auftreten eines Zwiesels bis in eine Schafthöhe von 3m mit Hilfe gemischter binärer logistischer Regressionen modelliert (WEIDIG 2016 S.111). Den in dieser Weise gezwieselten Bäumen steht die Vergleichsgruppe von Buchen gegenüber, die gänzlich ohne Zwiesel sind.



Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF
Interzept	0,060	0,005-0,700	-2,245	0,025*	
Schirmdruck: Grundfläche [m ² /ha]	1,537 (a)	0,979-2,413	1,896	0,058	1,654
Seitendruck: Standraum [m ²]	1,514	1,060-2,163	2,286	0,022*	1,116
Wurzelhalsdurchmesser [mm]	1,041 (b)	0,856-1,266	0,380	0,704	1,802

(a) Odds Ratio-Schätzer für einen Anstieg von 10m²/ha Grundfläche

(b) Odds Ratio-Schätzer für einen Anstieg von 10mm Wurzelhalsdurchmesser

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland
151	0,000	0,324
Schwellenwert	Klassifizierungsgüte	
0,401	0,689	

Abbildung 4-24: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Tiefzwieselwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Wurzelhalsdurchmesserstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

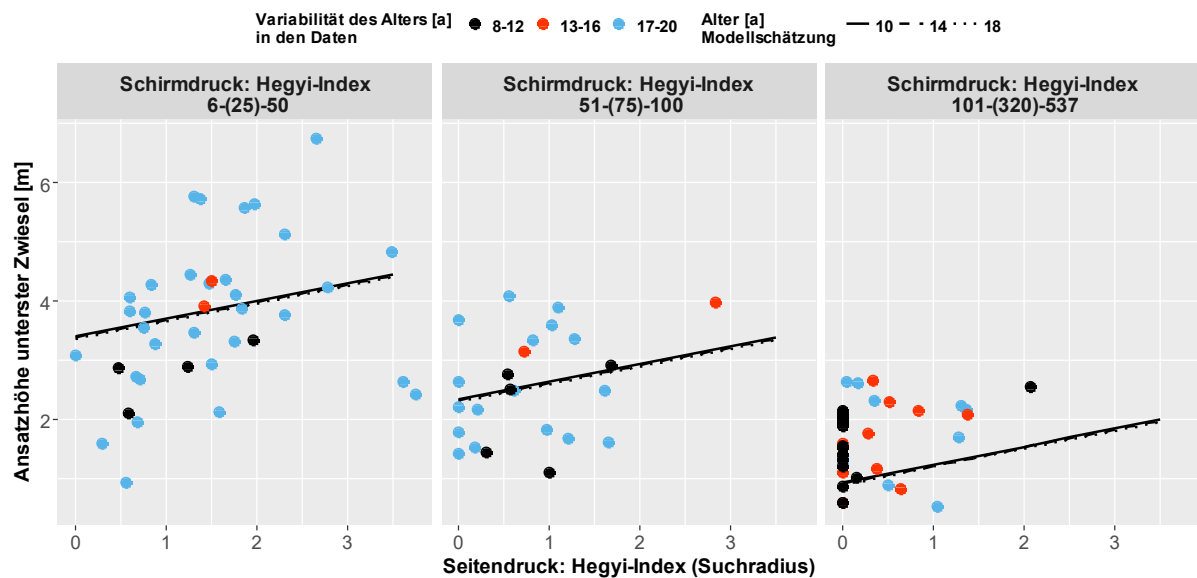
Die gestrichelte Linie in der Grafik markiert den optimalen Trennwert für die Klassifizierung. In der Übersicht Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werten, Anzahl an Beobachtungen, der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung, dem optimalen Schwellenwert für die Klassifizierung und die Klassifizierungsgüte

Das Modell zeigt nur einen signifikanten Effekt für den Seitendruck. Für jeden Quadratmeter mehr an Standraum erhöht sich das Tiefzwieselrisiko signifikant um den Faktor 1,5. Die Wirkung der Grundfläche ist nicht signifikant und weniger

bedeutsam. Steigt sie um $10\text{m}^2/\text{ha}$ an, ist ein Tiefzwiesel anderthalbmal wahrscheinlicher. Dieser Befund basiert auf den Buchen mit mittleren und geringen Wurzelhalsdurchmessern: je mehr der Überschirmungsdruck ansteigt, umso weniger liegen Bäume mit hohen und mittleren Wurzelhalsdurchmessern in den Daten zugrunde. Der Whd selbst hat keinen Einfluss darauf, ob sich das Tiefzwieselrisiko verändert. Der Schätzer liegt bei Eins und wird symmetrisch vom 95%-Konfidenzintervall eingeschlossen.

Ansatzhöhe des untersten Zwiesels

Ist ein Baum gezwiesel, ist es forstwirtschaftlich von Bedeutung, in welcher Höhe der unterste Zwiesel ansetzt. Mit dem folgenden Modell wird die stochastische Beziehung zwischen Zwieselansatzhöhe und den Einflussfaktoren untersucht.



Variable	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	6,538	0,873	79	7,492	0,000***	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	-2,216	0,284	79	-7,809	0,000***	1,558
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	0,299	0,128	79	2,336	0,022*	1,398
Alter [a]	-0,005	0,033	16	-0,151	0,882	1,235

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland	Schätzer SD Rest
100	0,107	0,454	0,272

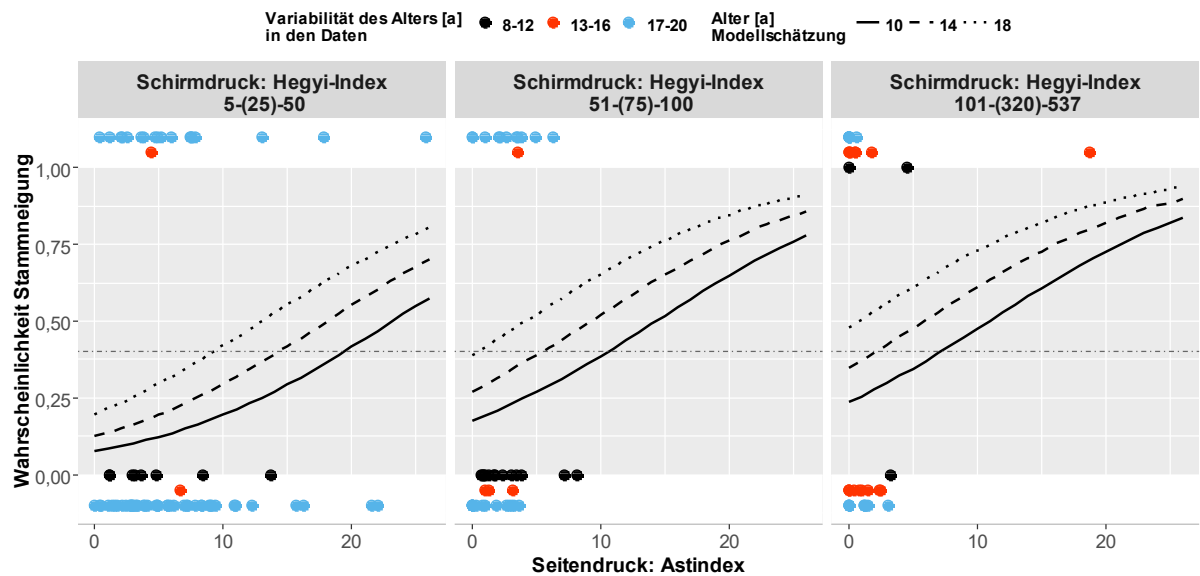
Abbildung 4-25: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den relativen Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

In der Übersicht Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Wenn eine Buche einer zunehmenden Überschirmungsdichte ausgesetzt ist, so teilt sich die Schaftachse bereits in einer niedrigeren Höhe. Sind es 10% an Schirmdruck mehr, dann setzt der Zwiesel um 9,2cm niedriger an. Bei Buchen, die unter einem Seitendruck aufwachsen, der eine Einheit höher ist als bei ansonsten vergleichbaren Individuen, ist die Zwieselansatzstelle um 0,3cm nach oben verlagert. Hingegen ist es vollkommen unerheblich für die Zwieselansatzhöhe, welches Alter eine Buche hat. Der nichtsignifikante Schätzer für das Alter ist mit einem im Verhältnis enormen Standardfehler belegt.

Stammneigung

Wenn eine junge Buche mit ihrer Schaftachse von der Lotrechten abweicht, bildet sich Reaktionsholz aus, welches für die Holzverwendung unerwünscht ist (RICHTER 2010 S. 45). Die Modellierung des Merkmals erweist sich als schwierig, in allen acht geprüften Modellvarianten sind Transformationen von unabhängigen Variablen notwendig. Das relativ beste Modell teilt sich mit den anderen akzeptablen Modellen das Problem, dass die transformierte Variable des Hegyi-Index' (Schirmdruck) in hohem Maß von der abhängigen Variablen „Stammneigung“ getrennt wird: Niedrige Werte der transformierten Variablen „Hegyi-Index“ tauchen geordnet bei geraden Buchen auf und umgekehrt. Weil die Schätzer für die anderen unabhängigen Variablen als unverzerrt angenommen werden können, ist es möglich, die Ergebnisse des besten Modells trotzdem zu präsentieren.



Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF
Interzept	0,088	0,023-0,343	-3,495	0,000***	
Schirmdruck: Hegyi-Index \wedge -1	0,000	0,000-0,000	-2,894	0,004**	1,808
Seitendruck: Astindex	1,114	0,994-1,248	1,857	0,063	1,575
Alter [a]	1,147	1,044-1,260	2,835	0,005**	1,238

Anzahl Beobachtungen

186

Schätzer SD Region

0,000

Schätzer SD Fläche
in Region

0,359

Schwellenwert
0,399Klassifizierungsgüte
0,742

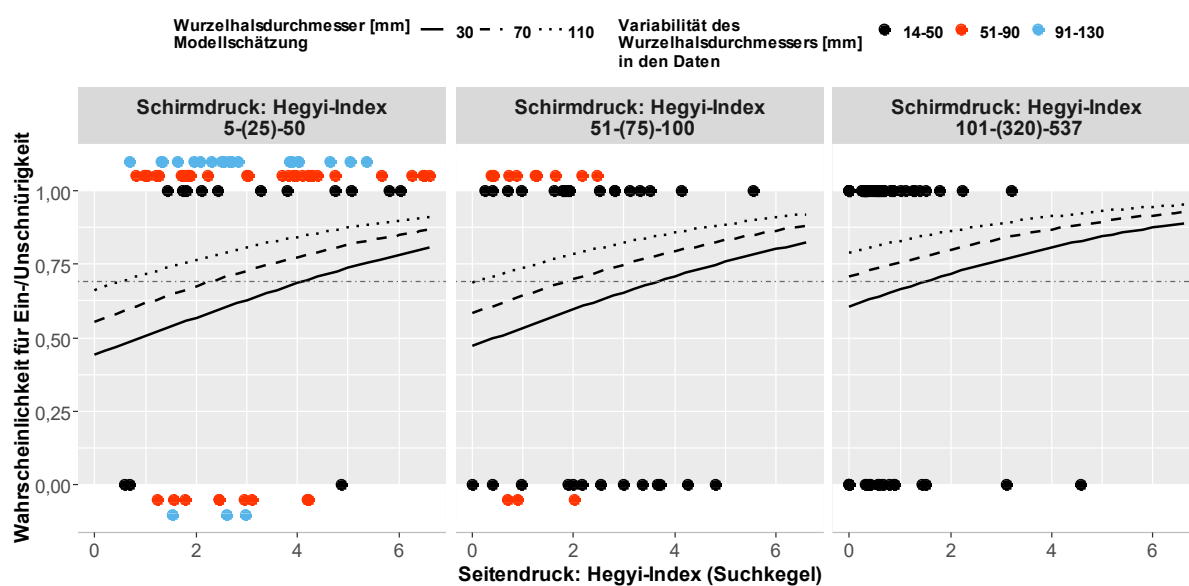
Abbildung 4-26: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Steilastwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

Die gestrichelte Linie in der Grafik markiert den optimalen Trennwert für die Klassifizierung. In der Übersicht Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werten, Anzahl an Beobachtungen, der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung, dem optimalen Schwellenwert für die Klassifizierung und die Klassifizierungsgüte

Für den Schirmdruck existiert aus den oben genannten Gründen kein Maximum-Likelihood-Schätzer, daher hat die Odds Ratio den Wert Null. Der Seitendruck ist nicht signifikant, weist aber in eine Richtung: Wenn der Kronenraum stärker von benachbarten Bäumen durchdrungen wird, ist ein geneigter Baum wahrscheinlicher. Das ist um den Faktor 1,1 der Fall, wenn sich der Astindex um eine Einheit erhöht. Das klarste Bild vermittelt die Reaktion auf ein verändertes Alter. Eine um ein Jahr ältere Buche hat ein um 1,15fach gesteigertes Risiko, geneigt zu sein.

Krummschaftigkeit

Auch die Krümmung der Schaftachse ist unter heutigen Gesichtspunkten der Holzverwendung ein unerwünschtes Merkmal (RICHTER 2010 S. 45). Die einfachste Art und Weise, um die Stammkrümmung einzuschätzen, ist die Angabe der Schnürigkeit (vgl. Tabelle 3-10). Für die Modellierung steht die Frage, ob veränderte Einflussfaktoren zu einem vermehrt krummen oder geraden Schaft führen. Bäume mit einem geraden, zweisehnürigen Stamm stehen Buchen gegenüber, die in einer oder in zwei Ebenen gekrümmt sind. Ein gültiges Modell für das dreistufige, ordinale Merkmal Krummschaftigkeit ist mit den vorhandenen Daten nicht möglich zu berechnen. Die Ergebnisse des besten Modells für das zweigeteilte Krümmungseinstufung sind nachfolgend beschrieben.



Variable	Schätzer Odds Ratio	CI 95 Schätzer	z-Wert	Signifikanz	VIF
Interzept	0,539	0,072-4,011	-0,604	0,546	
Schirmdruck: Hegyi-Index	1,002	0,996-1,008	0,773	0,440	1,892
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchkegel)	1,285	0,947-1,745	1,609	0,108	1,297
Wurzelhalsdurchmesser [mm]	1,011	0,989-1,033	1,047	0,295	1,705

Anzahl Beobachtungen	Schätzer SD Bundesland	Schätzer SD Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland
186	0,787067	0,413
Schwellenwert 0,685	Klassifizierungsgüte	
	0,774	

Abbildung 4-27: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Krümmungs-Wahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Wurzelhalsdurchmesserstufen mit Angabe der Parameterschätzer.

Die gestrichelte Linie in der Grafik markiert den optimalen Trennwert für die Klassifizierung. In der Übersicht Angabe der geschätzten Odds Ratio mit Konfidenzintervall, z-Wert, Signifikanz, VIF-Werten, Anzahl an Beobachtungen, der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung, dem optimalen Schwellenwert für die Klassifizierung und die Klassifizierungsgüte

Keine der untersuchten Einflussgrößen wirkt signifikant darauf, ob ein Baum gerade oder ggf. in zwei Ebenen gekrümmt ist. Bedingt durch die Odds-Ratio-Werte nahe Eins bzw. durch sehr weite Konfidenzintervalle sind die Effektrichtungen wenig verlässlich. Es kann nur von einer schwachen und sehr unsicheren Tendenz die Rede sein wenn gefolgert wird, dass ein höherer Seitendruck genauso wie ein höherer Wurzelhalsdurchmesser eine Ein- oder Mehrebenenkrümmung wahrscheinlicher machen. Für die Überschirmungsdichte ist dem Schätzer einschließlich Konfidenzintervall kein Trend abzuspüren.

Stammkrümmung – maximale Krümmungsstärke

Weil ein gekrümmter Stamm unvorteilhaft für die spätere Holzverwendung ist, wird der Frage nachgegangen, ob sich die maximale Krümmungsstärke in cm/m waldbaulich beeinflussen lässt. Es werden daher nur gekrümmte Bäume in die untersuchten Modelle einbezogen.

Ein plausibles Modell lässt sich für die maximale Krümmungsstärke nicht bauen, weil es entweder massive Konvergenzprobleme gibt oder weil die Varianzinflationsfaktor-Werte den Grenzwert von drei überschreiten. Deswegen sollen die Daten nur auf deskriptiver Ebene beleuchtet werden. Die folgende Abbildung stellt die maximale Krümmungsstärke zunächst der Grundfläche des Altbestandes gegenüber. Sie enthält gekrümmte und nicht gekrümmte Bäume.

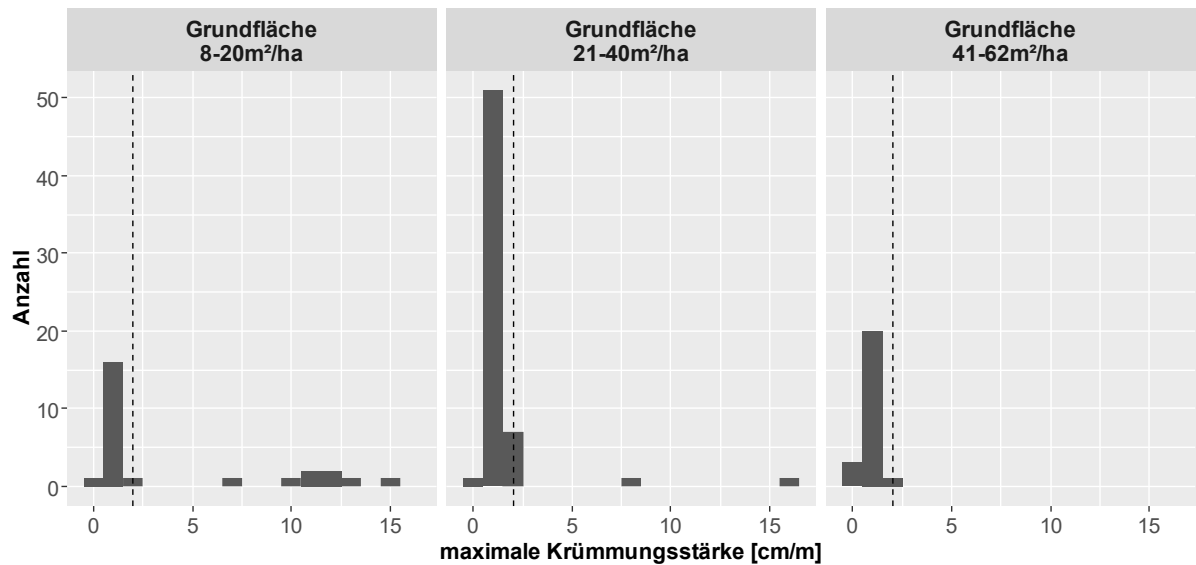


Abbildung 4-28: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Grundflächestufen des Oberstandes.

In den jungen Voranbauten, wie sie hier untersucht werden, bewegt sich das Gros der maximalen Krümmungen unter dem Wert zwei (gestrichelte Linie). Dieser ist für die wirtschaftliche Verwendung von Holz bedeutend, wenn es um die Unterscheidung zwischen den Güteklassen A und B bei Buche geht (RICHTER 2010 S. 190). Aus der Grafik lässt sich ablesen, dass sehr stark gekrümmte Bäume am häufigsten bei niedrigen Grundflächen bis 20m²/ha vorkommen. Diese Anzahlen verringern sich drastisch bei moderaten und hohen Grundflächen des Altbestandes.

4 Ergebnisse

Anders verhält es sich beim Standraum, wie die folgende Abbildung zeigt.

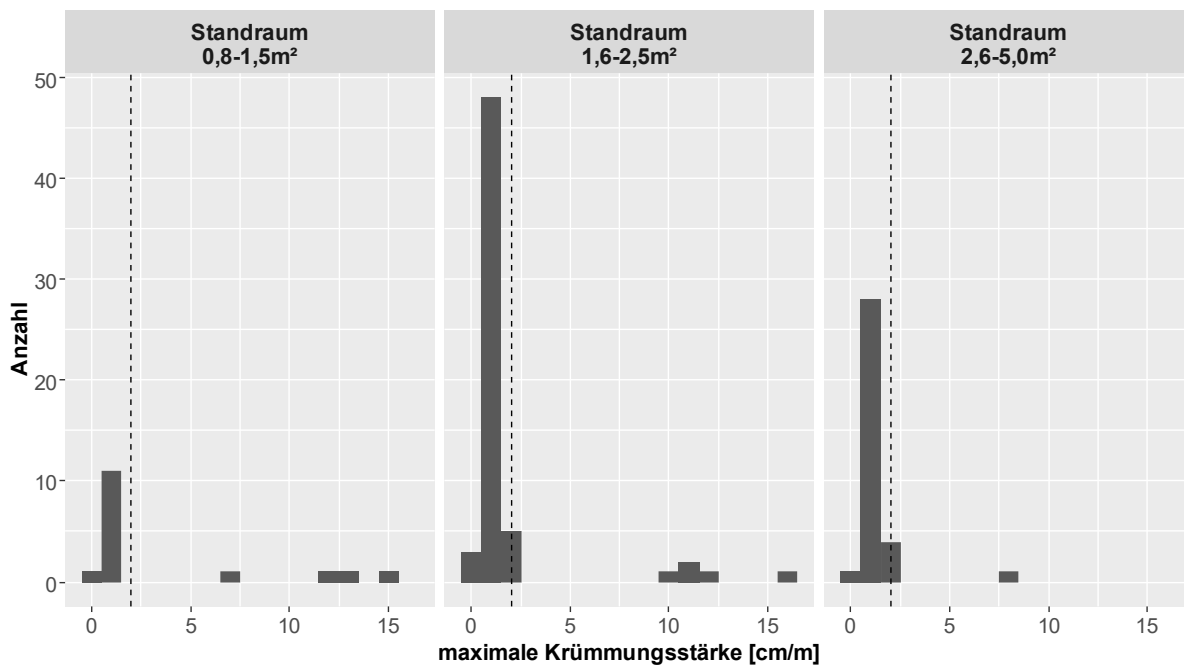


Abbildung 4-29: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Standraumstufen in der Verjüngung.

Hier sind bei sehr eng gepflanzten Voranbauten sogar mehr sehr stark gekrümmte Bäumchen vorhanden als in sehr weit begründeten. Mittlere Standraumverhältnisse zeigen die meisten sehr stark bogigen Exemplare. Abschließend sind in der folgenden Abbildung noch die maximalen Krümmungsstärken nach Wurzelhalsdurchmesser getrennt abgetragen.

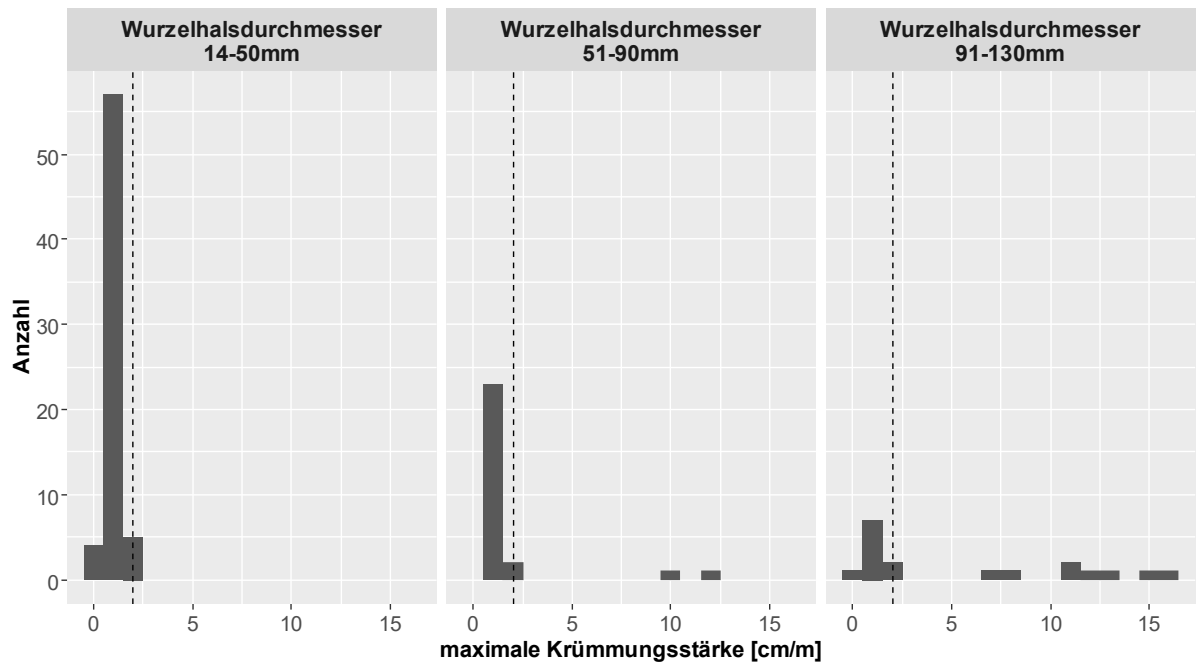


Abbildung 4-30: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Wurzelhalsdurchmesserstufen der Probebuchen.

Hier zeigt sich klar, dass bei dünnen Bäumen nur eine sehr schwache Krümmungsstärke vorhanden ist, die mit dem Wurzelhalsdurchmesser zunimmt: Die meisten sehr stark gekrümmten Buchen kommen bei Whd-Werten ab 91mm vor.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methoden

5.1.1 kritische Würdigung der empirischen Methoden

5.1.1.1 Versuchsanlage, Versuchsdesign und Auswertemethoden

Um in der vorliegenden Arbeit die Buchen bestimmen zu können, die zum Aufnahmekollektiv gehören sollen, wird sich einer **Versuchsanlage** und zwei Versuchsdesigns bedient (vgl. Abschnitt 3.1). Die Versuchsanlage lässt sich als dreifaktorieller, nichtorthogonaler Versuch in die Systematik der biometrischen Versuchsplanung einordnen (JEFFERS 1960 S. 13f, BÄTZ et al. 1972 S. 65f). Die Faktoren „Alter“, „Pflanzverband“ und „Überschirmung“ werden hier variiert um die Versuchsflächen auszuwählen. Außerdem soll die Lage von Versuchsflächen in zwei Regionen NRW und SAX dazu dienen, Unterschiede in den Wuchsbedingungen hinsichtlich der Kontinentalität des Klimas für die Probebuchen abzudecken und damit zu nivellieren. An dieser Stelle muss klargestellt werden, dass es sich bei der vorliegenden Untersuchung nicht um einen Versuch im Sinne der biometrischen Versuchsplanung handelt, sondern um eine Erhebung. Der Unterschied besteht darin, dass die drei Prüffaktoren in ihren Abstufungen nicht gezielt den Versuchsgliedern zugeordnet werden wie es in Feldversuchen möglich ist (KESSEL 1994 S. 32f), sondern eine Auswahl aus vielen möglichen, schon vorhandenen Varianten darstellen (BÄTZ et al. 1972, S. 13, GADOW et al. 2016). Das Ergebnis dieses Prozesses sind in der vorliegenden Untersuchung Flächenausschnitte aus verschiedenen, nicht immer räumlich nebeneinanderliegenden Voranbauten, die von den untersuchten Faktoren möglichst extreme Stufenkombinationen belegen (BÄTZ et al. 1972, S. 34f). Flächenvorschläge der damaligen LÖBF in NRW sowie vor Ort überprüfte Bestände aus der WISA-Datenbank des damaligen Landesforstpräsidiums in Graupa/Sachsen (LFP 2004) (vgl. Abschnitt 2.2) entsprechen diesen Anforderungen. Somit lässt sich die Flächenauswahl auch als Stratifizierung auffassen. Dieses Vorgehen ist in waldbaulichen Untersuchungen häufig zu finden (GOCKEL 1994 S. 19f, OTT 2003 S. 14ff, WEIDIG 2016 Abschnitt 2.2) und ähnlich wird bei waldwachstumskundlichen Streuversuchen verfahren (PRETZSCH 2002 S. 68). Reine Zufallsauswahlen von ganzen Beständen, wie sie in der klassischen Versuchsplanung gefordert werden (RASCH et al. 2007 S. 19), sind in der

waldbaulichen Forschung nicht praktikabel. Ein Grund ist, dass die Grundgesamtheit aller Buchen-Voranbauten im jeweiligen Naturraum nicht bekannt ist, die in das Korsett der konstant zu haltenden Einflussfaktoren passen. Die Grundgesamtheit kann theoretisch mit Hilfe von präzise angelegten Versuchsflächen zwar gut repräsentiert werden, jedoch ist eine Ergänzung mittels Wirtschaftsflächen in Forstbetrieben in dieser Arbeit unausweichlich. In diesem Zusammenhang sprechen GADOW et al. (2016) auch davon, dass reine Beobachtungsdaten ohne gezielte Manipulation von Einflussfaktoren eine brauchbare Ergänzung für geplante, meist langfristig betreute Versuche sein können, weil sie eine inhaltlich breitere Auswertung erlauben. Wenngleich sie die Stärke geplanter Versuche darin sehen, den Prüfgliedern extreme Faktorstufen und ihre Kombinationen zuzuteilen, die in natura nicht existieren und damit Beobachtungsdaten nicht inhärent sind, können bei gezielt angelegten Versuchsflächen gewisse Defizite nicht ausgeschlossen werden, weil sich bei der Anlage die Prinzipien der biometrischen Versuchsplanung „Randomisierung“ und „Wiederholung“ und der Ausschluss von Störfaktoren (RASCH et al. 2007 S. 6) nicht vollumfänglich auf praktikable Weise umsetzen lassen. Geplante Versuche sind GADOW et al. (2016) zufolge unter anderem für Durchforstungs- und Düngungsversuche angemessen. Häufig reicht auch die Variationsbreite der untersuchten Einflussfaktoren nicht aus, um weiterführende Forschungsfragen auf langfristig betreuten Versuchsflächen zu klären, weil bei ihrer Anlage andere Fragen im Vordergrund standen (GADOW et al. 2016). Um mit dieser Versuchsanlage bzw. Erhebung trotzdem zu unverzerrten und genauen Schätzergebnissen zu gelangen (ZAR 2010 S. 18f) die auf den Prinzipien „Randomisierung“ und „Wiederholung“ basieren, sind sowohl die Versuchsdesigns als auch die statistischen Auswertemethoden durch gemischte Modelle darauf abgestimmt.

In der vorliegenden Untersuchung wird mit zwei **Versuchsdesigns** gearbeitet, um den äußerst unterschiedlichen Bestandessituationen Rechnung tragen zu können. Das Kernflächendesign I richtet sich an Voranbauten, die in jeglicher Hinsicht homogen zusammengesetzt sind; das Probekreisdesign II wird bei inhomogen strukturierten Beständen verwendet (Abschnitt 3.1.1). Diese Designs haben die Aufgabe, die mühsam gewonnenen Flächen bestmöglich auszunutzen, indem sie

- für die Einflussfaktoren „Schirm“ und „Standraum“ eine große Variationsbreite liefern (BÄTZ et al. 1972, S. 34f),
- Faktorstufenkombinationen mehrfach bedienen um Wiederholungen zu liefern (RASCH et al. 2007 S. 6) und
- die zu untersuchenden Buchen so voneinander abgrenzen, dass ein gegenseitiger räumlicher Einfluss vermieden wird, sodass es sich um unabhängige Wiederholungen handelt (HURLBERT 1984).

Nachfolgend sollen die beiden Versuchsdesigns näher beleuchtet und hinsichtlich ihrer Eignung in Bezug auf die genannten Punkte diskutiert werden.

Um in einem Bestand **Kernflächen** zu etablieren, dessen Pflanzverband und Alter einheitlich sind, wurde in der vorliegenden Arbeit nach dem statistischen Auswahlverfahren der Stratifizierung vorgegangen (ZÖHRER 1980 S. 73). Sie arbeitet mit dem Prinzip klar abgrenzbarer, in sich homogener Untereinheiten. Das heißt für diese Untersuchung, dass die Varianzen des Prüffaktors „Überschirmung“ zwischen den Gruppen höher sind als innerhalb. Die Ausbeute an lebenden Buchen beträgt je Kernfläche zwischen 41 und 257 Stück bei Flächengrößen von 67,5m² bis 402m². Auf den beiden komplett aufgenommenen Versuchsflächen der damaligen LÖBF sind das auf jeweils 900m² 309 bzw. 386 Stück (vgl. Tabelle 16-1 im Anhang). In der Literatur zu Inventurverfahren wird solch einem stratifizierten Auswahlverfahren Effektivität und Effizienz im Allgemeinen als kennzeichnend zugeschrieben, weil mit nur einem Auswahlmodus viele Probanden gewonnen werden können (ZÖHRER 1980 S. 73f). Diese Methode findet deswegen auch in waldbaulichen Untersuchungen Anwendung (WAGNER & RÖKER 2000, PETRIȚAN et al. 2007, WEIDIG 2016 Abschnitt 2.2). Das Stichprobenverfahren systematisch auf der Fläche angeordneter **Probekreise** ist Inventuren ganzer Forstbetriebe oder Länder zu forstwirtschaftlich relevanten Kenngrößen wie bspw. Vorrat, Baumartenzusammensetzung und Altersstruktur entlehnt (LOETSCH & HALLER 1964 Kap. 1) und wird auch in der waldbaulichen Forschung gerne verwendet (LEDER 1992 S. 51f, OTT 2003 S. 19, WEIDIG 2016 S. 31f). Wie weit die einzelnen Probepunkte voneinander entfernt sind, hängt dabei von der Untersuchungsfrage, den vorhandenen Flächen, der gewählten räumlichen Ebene und anderen Faktoren wie Zeit und Kosten ab. Die hier verwendete Rasterweite ist im Vergleich der Literatur eng gewählt. Bei anderen Autoren liegen die Probepunkte 20m bis 30m auseinander (OTT 2003 S. 19, WEIDIG 2016 S. 31f). In der vorliegenden Arbeit zielt die enge Rasterweite von 6m bis 10m darauf ab, einerseits die vorhandenen

Flächen für die gesuchten Informationen bestmöglich auszunutzen und andererseits in Voranbauten, die das Dickungsstadium erreicht haben, nicht die Übersicht während der Aufnahme zu verlieren, weil nicht mit GPS gearbeitet werden konnte. Das bedeutet aber auch, dass die kürzesten Abstände von Probekreisrändern auf einem Transekt nur 3,48m bzw. 4,48m betragen.

Aus dem bisher Beschriebenen wird deutlich, dass das **Ziel unabhängiger Wiederholungen** in der Reaktion junger Buchen hinsichtlich ihrer Qualitätsentwicklung mit den Versuchsdesigns nicht erreicht werden kann. Insbesondere HURLBERT (1984) macht auf das Problem distanzabhängiger Residuen bei räumlich benachbarten Probanden im Bereich der angewandten Feldforschung aufmerksam. In solchen Versuchsdesigns, die mit Probeflächen arbeiten, sind seiner Aussage nach starke räumliche Abhängigkeiten impliziert, die sich in den Modellfehlern niederschlagen und zu verzerrten Schätzergebnissen führen (PINHEIRO & BATES Kap. 1). Um diesem Dilemma zu entkommen, werden in der vorliegenden Arbeit **gemischte Modelle** zur Datenauswertung herangezogen, die räumlich geschachtelte Versuchsdesigns als Zufallseffekt einbeziehen können (PINHEIRO & BATES 2000 S. 40ff, FARAWAY 2006 S. 161ff, BOLKER et al. 2009, FAHRMEIR et al. 2009 S. 253f). Der Zufallseffekt ist aus den Faktoren „Bundesland“ und „Versuchsfläche“ bzw. „Subplot/Probekreis in Bundesland“ zusammengesetzt (vgl. Abschn. 3.2.5.3). Das bedeutet in der Konsequenz auch, auf der untersten räumlichen Datenebene die **Messwerte zu aggregieren**, d.h. Mediane bzw. Mittelwerte zu bilden, wenn keine genauen Lagekoordinaten vorhanden sind. Dies betrifft namentlich die Auswertung der Qualitätsklassen (vgl. Abschnitt 4.1), wo im Versuchsdesign I als durchgängig vorhandene räumliche Ebene die Kernfläche als Basis für die Aggregation in Frage kommt. Das hätte aber bedeutet, pro Kernfläche die ursprünglich gedachte hohe Probandenausbeute, die die stratifizierte Stichprobe auszeichnet, ad absurdum zu führen und nur einen Durchschnittswert je Fläche zu erhalten. Das wiederum hätte dazu geführt, dass einige Faktorstufenkombinationen extrem unterrepräsentiert gewesen wären, so z. B. sehr eng gepflanzte Voranbauten mit einer Standzeit von mehr als 15 Jahren. Insgesamt wären dieser rigorosen Aggregierungsmaßnahme 174 Werte von jetzt 619 zum Opfer gefallen. Diese Opfer erschienen zu groß, sodass hier stattdessen mit einem „Kunstgriff“ die Kernflächen weiter in Subplots unterteilt sind (vgl. Abschn. 3.1.1.2) Bei zwölf von 21 Kernflächen wurden diese nicht während der Aufnahme abgegrenzt, sondern nachträglich anhand schematischer Lagepläne

festgelegt. Sie sind folglich Ungenauigkeiten unterworfen. Es handelt sich jedoch um hinnehmbare Differenzen, weil ein verzerrender Einfluss auf die im Modell verwendeten aggregierten Mediane bzw. Mittelwerte kaum zu erwarten ist. Weil alle Buchen auf einer Kernfläche nicht als unabhängige Wiederholungen gelten können, ist dies im Grunde genommen auch den Mittelwerten/Medianen benachbarter Subplots inhärent. Das liegt daran, dass diese Subplots unmittelbar aneinander grenzen, sodass eine räumliche Abhängigkeit auch der aggregierten Daten zu erwarten ist (HURLBERT 1984). Ob die Unterteilung in Subplots aus statistischer Sicht problematisch für die Modellergebnisse ist, ist in dieser Arbeit nur anhand der Einzelbaummodelle (vgl. Abschnitt 3.2.6.1) überprüfbar. Für alle diese Modelle ist abgeglichen, ob **spezielle Korrelationsstrukturen** (PINHEIRO & BATES 2000 S. 226ff) die Schätzergebnisse signifikant verbessern bzw. ob die Residuen räumlichen Trends unterliegen. In keinem der Modelle war dies jedoch der Fall. Dieser Befund legt den Schluss nahe, dass die feine räumliche Auflösung des Zufallseffekts bis auf Subplot-bzw. Probekreisebene ausreicht, um die gefürchteten Modellverzerrungen zu vermeiden. AGRESTI (2013 S. 525) führt dazu an, dass Zufallsfaktoren mit vielen Stufen und dafür weniger Beobachtungen pro Stufe zu einer besseren statistischen Inferenz in der Modellschätzung führen als zufällige Effekte mit wenigen Stufen, dafür aber mehr Beobachtungen. Ersteres trifft sowohl für die Modelle zur Qualitätsklassenverteilung als auch für die Einzelbaummodelle zu. Aus dem geschilderten Grund ist es auch nicht notwendig, das Versuchsdesign an sich dem Zufallseffekt noch zuführen zu müssen. Räumliche Hierarchien im Zufallseffekt in Form von „Bundesland“, „Versuchsdesign in Bundesland“ und „Subplot/Probekreis in Versuchsdesign in Bundesland“ minimieren die Reststreuung nicht, wie Vergleichsrechnungen ergeben, stattdessen konvergieren Modelle mit einer per se geringen Anzahl an Beobachtungen nicht mehr, wie das Modell zu den maximalen Grünastdurchmessern im Schaftabschnitt 3,0m-4,5m.

Nachfolgend sind noch die Fragen zu klären, ob die Versuchsdesigns die **Faktorstufenkombinationen** ausreichend variieren und ob sie eine akzeptable Anzahl an **Wiederholungen** in denselben liefern. Aus dem vorher Gesagten erschließt sich, dass diese Bewertung nur anhand der aggregierten Daten erfolgen kann. Die folgende Abbildung vermittelt dazu eine Hilfestellung.

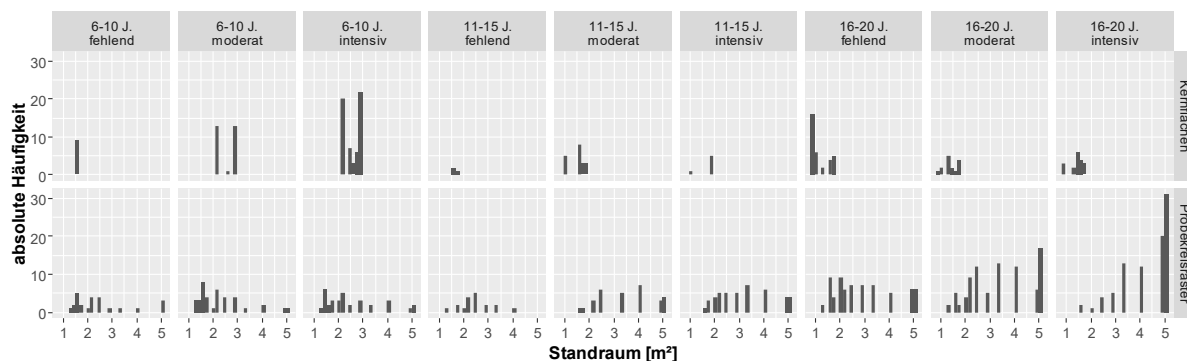


Abbildung 5-1: Verteilung der Stichprobenwerte nach Faktorstufenkombinationen der festen Haupteffekte Alter, Altbaumnähe und Standraum getrennt für die Versuchsdesigns.

Die absoluten Häufigkeiten stellen die räumlich aggregierten Daten dar, $n=619$.

Sie zeigt, dass die Probanden auf den Kernflächen in ihrer Anzahl je Faktorstufenkombination aus Alter, Überschildung und Standraum zwar in einigen Fällen dem Probekreisraster überlegen sind, jedoch die erwünschte Variationsbreite ausbleibt. Hier ist das Probekreisraster entschieden im Vorteil.

Als Fazit aus den gemachten Ausführungen lässt sich festhalten, dass bei ähnlichen Untersuchungen ein Raster aus Probekreisen den Kernflächen vorzuziehen ist. Wenn die Rasterweite weniger eng gewählt wird wie in der vorliegenden Arbeit verringert sich auch das Problem räumlich abhängiger Modellfehler. Das würde aber bedeuten, dass die Variationsbreite und die Anzahl an Wiederholungen im Idealfall aus vielen Flächen mit jeweils wenigen Probekreisen rekrutiert werden muss. Weil das den Aufwand einer solchen Untersuchung enorm vergrößern würde, ist ein Kompromiss aus Anzahl an Flächen und Anzahl an Probekreisen pro Fläche anzuraten. Ein Raster mit 20 bzw. 30m Abstand, wie es bei WEIDIG (2016 S. 31f) auf ähnlichen Flächen verwendet wurde, erscheint im genannten Zusammenhang als praktikabel. Außerdem ist unbedingt anzudenken, für solche Datenauswertungen das Instrument der gemischten Modelle zu verwenden, um möglicherweise noch bestehende räumliche Abhängigkeiten der Modellfehler auszugleichen.

5.1.1.2 Methoden zur Quantifizierung von Konkurrenz

Für den Begriff „Konkurrenz“ gibt es im ökologischen Kontext zahlreiche Definitionen. In der vorliegenden Arbeit wird sie im Sinne von WELDEN & SLAUSON (1986) so verstanden, dass sie in einem betrachteten Organismus eine physiochemische Belastung hervorruft, die direkt auf den Ressourcenzugriff anderer Organismen zurückzuführen ist. Diese von ihnen im engeren Sinne formulierte Beschreibung legt die Anwendung auf Pflanzen und hier im Besonderen auf Individuen (GRIME 1977) zugrunde. Es wird davon ausgegangen, dass die Individuen einen Effekt auf die Ressourcen haben indem sie ihre Verfügbarkeit beeinflussen, und dass die einzelne Pflanze auch eine Reaktion auf die von ihr nutzbare Ressourcenmenge zeigt (GOLDBERG 1990). Dieses Konzept nutzen Konkurrenzindices. Sie bilden in dieser Arbeit die Basis, die kleinräumige Wuchs- und Wettbewerbssituation eines Baumes in Bezug auf seine Baumnachbarn darstellen zu können (PRETZSCH 1995, AMMER 1996 S. 120, BACHMANN 1998 S. 13, AMMER 2000 S. 113). Nach BURTON (1993) beschreiben sie das Ausmaß des räumlichen Einflusses von Nachbarpflanzen auf einen betrachteten Baum als einfache Maßzahlen, die die Stärke von Konkurrenz quantifizieren können (DANIELS et al. 1986). HOLMES & REED (1991) zufolge lassen sich solche Indices in drei Gruppen einteilen, die folgende Beziehungen zwischen Zentralbaum und Nachbarn verwenden:

- die Einflusszonenüberlappung (influence zone overlap),
- den Wuchsraum (growing space) oder das
- Größenverhältnis (size-ratio).

Die erste Gruppe arbeitet mit gedachten, kreisförmigen potenziellen Kronenbreiten und deren Überlappungsfläche mit Einflusszonen der Konkurrenten, die zweite Gruppe mit der Standfläche des Einzelbaumes, die mit Hilfe von merkmalsgewichteten Sektorgrenzen agiert und die dritte Gruppe setzt Wachstumsgrößen von Konkurrenten und Zentralbaum in Beziehung zueinander. Eine detaillierte Erklärung dazu findet sich bei BACHMANN (1998 S. 16f) und AMMER 1996 S. 120ff). Eine Einteilung nach distanzabhängig und distanzunabhängig nehmen BIGING & DOBBERTIN (1992) vor. In der vorliegenden Arbeit werden zwei size-ratio-Indices verwendet, der Index von HEGYI (1974 zit. n. PRETZSCH 2002 S. 267) und der neu entwickelte Astindex. Der Standraum je Pflanze ist ein stark verallgemeinertes Pendant zu Wuchsraumindices. Die

topologische Standfläche eines Baumes kann mit Hilfe der Wichtung mit Nachbarbaumdimensionen zur plausibleren ökologischen Standfläche überführt werden (HESSENMÖLLER 2002 S. 16), was hier jedoch nicht erfolgte. Die Grundfläche je Hektar lässt sich in dieses Schema nicht einordnen.

Immer wieder wird in der Literatur davon berichtet, dass bestimmte Indices besser als andere geeignet sind, die Modellstreuung einer spezifischen abhängigen Variablen signifikant zu reduzieren (DANIELS 1976, DANIELS et al. 1986, PUKKALA & KOLSTRÖM 1987, BIGING & DOBBERTIN 1992, AMMER 1996 S. 136 und 139, BACHMANN 1998 S. 127f, PRÉVOSTO & CURT 2004, SCHRÖDER 2004 S. 110, AMMER et al. 2005, MÜNDER 2005 S. 45ff). Das hängt davon ab,

- um welche Baum- oder Straucharten es sich bei betrachtetem Baum und den Konkurrenten handelt (HOLMES & REED 1991, BURTON 1993, BACHMANN 1998 S. 135f),
- auf welchem Standort die untersuchten Pflanzen wachsen (BURTON 1993),
- welche Wachstumsgrößen in den Index einfließen (DANIELS 1976, MONSERUD & EK 1977, DANIELS et al. 1986, PUKKALA & KOLSTRÖM 1987, HOLMES & REED 1991, BACHMANN 1998 S. 127f),
- wie der Bestand strukturiert ist (DANIELS et al. 1986, PUKKALA & KOLSTRÖM 1987, BACHMANN 1998 S. 136f und 176f) sowie
- ob und welche Suchmodi vorgeschaltet werden, um relevante Konkurrenten zu bestimmen (DANIELS 1976, LORIMER 1983, DANIELS ET AL. 1986, BIGING & DOBBERTIN 1992, BURTON 1993, LEE & GADOW 1997, BACHMANN 1998 S. 127F, NEWTON & JOLLIFFE 1998, MÜNDER 2005 S. 25ff).

Eine Literaturübersicht zu Anwendung und Eignung von Konkurrenzindices im Rahmen waldwachstumskundlicher Zuwachsmodelle bietet BACHMANN (1998 S. 17ff), für Analysen von Konkurrenz zwischen Verjüngung und Vegetation der Strauch-/bzw. Krautschicht listet BURTON (1993) verschiedene Indices auf. Auch in Untersuchungen zur Vitalität, zum Wuchsverhalten und zur Qualität in Verjüngungen werden Konkurrenzindices als erklärende Größe verwendet (MONSERUD & EK 1977, AMMER 1996 S. 133ff, PRÉVOSTO & CURT 2004, SCHRÖDER 2004 S. 148ff, MÜNDER 2005 S. 55ff, LINNERT 2009 S. 86ff).

Das breite Anwendungsspektrum solcher Konkurrenzmaßzahlen im Allgemeinen ist ein Zeugnis für ihre Vorteile, besonders dann, wenn die Eingangsgrößen leicht zu messen sind (AMMER et al. 2005). Insbesondere der hier verwendete Index nach HEGYI (1974, zit. n. PRETZSCH 2002 S. 267) ist in der Literatur weit verbreitet (LEE & GADOW 1997) und wird explizit für die Konkurrenzbemessung in Jungbeständen empfohlen (AMMER et al. 2005). Neuere Studien widmen sich dem Versuch, mit Hilfe von Airborne Laserscanning Konkurrenzindices abzuleiten (PEDERSEN et al. 2012), die aber nur für einschichtige Bestände nutzbar sein könnten oder mit Hilfe von terrestrischem Laserscanning Baumparameter effizient abzuleiten (SEIDEL et al. 2013). Ein weiteres Plus ist, dass Konkurrenzindices mit direkt messbaren Größen wie Strahlung unmittelbar zusammenhängen (DELONG 1991, SCHRÖDER 2004 S. 123ff, AMMER et al. 2005) und deswegen mit ihrer Hilfe ökologisch plausible Erklärungen für das Wachstumsverhalten betrachteter Pflanzen gegeben werden können.

Die folgende Abbildung ordnet die hier verwendeten Indices in ein Schema ein, welches ihre Komponenten und die verwendeten Suchmodi enthält. Zusätzlich ist angegeben, wie oft sie in den Endmodellen aus Kapitel vier vorkommen.

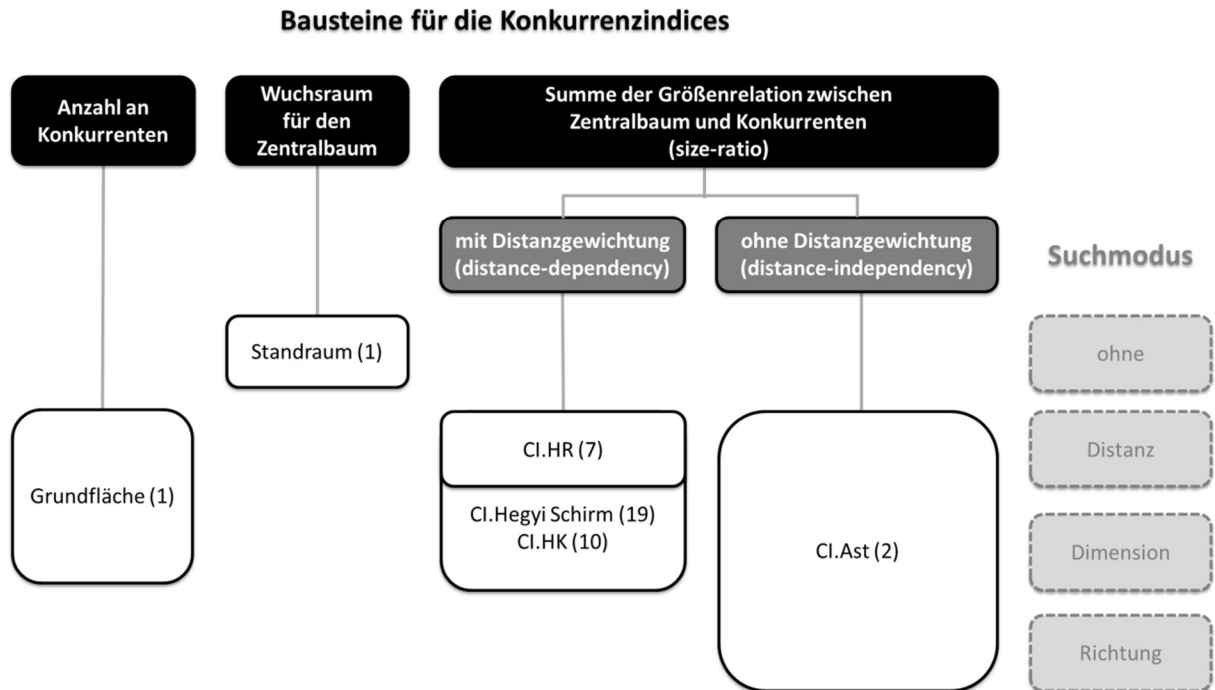


Abbildung 5-2: Zuordnung und Häufigkeit der verwendeten Konkurrenzindices zu den Bauprinzipien mit Angabe der Suchmodi.

Die Häufigkeit der Konkurrenzmaßzahlen in Klammern gibt an, wie oft diese in den Endmodellen (beste Schätzung unter Beachtung der Multikollinearität) vorkommen. Die Angaben zum Suchmodus beziehen sich jeweils auf die Dimension von Konkurrenten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Indices, die mit der Größenrelation zwischen Zentralbaum und Konkurrent arbeiten am besten geeignet sind, die Modellstreuungen zu reduzieren (CI.Hegy Schirm, CI.HR, CI.HK). Außerdem stellt sich heraus, dass der Suchkegel bei gleichem Index in der Verjüngung besser abschneidet als der relative Suchradius (CI.HK versus CI.HR). Der Astindex, der einen restriktiven Suchmodus verwendet, ist demgegenüber nur geringfügig vertreten. Die Indices Grundfläche und Standraum kommen jeweils nur ein Mal vor.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Angaben in der Literatur. Maßzahlen, die Wachstumsgrößen der Konkurrenten beinhalten und ggf. noch Suchmodi vorschalten (DANIELS et al. 1986, BACHMANN 1998 S. 173, PRÉVOSTO & CURT 2004) sind Indices ohne diese Komponenten (MONSERUD & EK 1977, LORIMER 1983) überlegen. Andere Studien zeigen eine Modellverschlechterung, sobald Merkmale

des Zentralbaums in den Konkurrenzindex mit einfließen (AAKALA et al. 2016), weil der räumliche Konkurrenzaspekt überwiegt. Die hohe Erklärungskraft führt jedoch zum Problem miteinander korrelierender unabhängiger Größen in einem Modell (DORMANN et al. 2012). Das ist auch in der vorliegenden Arbeit der Fall. Es bedeutet, dass die eigentlich als unabhängig voneinander postulierten Größen Schirmdruck, Verjüngungskonkurrenz und Einzelbaummerkmal diese Bedingung nicht mehr erfüllen und untereinander zu stark zusammenhängen. Diese Thematik wird ausführlich im Abschnitt 5.1.2.2 besprochen. In früheren Arbeiten fehlt allerdings eine derartige Bewertung (DANIELS et al. 1986, PUKKALA & KOLSTRÖM 1987, HOLMES & REED 1991, CANNEL & GRACE 1993, BACHMANN 1998, DE LUIS 1998).

Die hier verwendeten Konkurrenzindices sind in der Tat mit **Nachteilen** behaftet. Sie quantifizieren zwar die Stärke von Konkurrenz (WELDEN & SLAUSON 1986), können aber nach DANIELS et al. (1986) keine messbare Auskunft darüber geben, um welche Ressourcen konkurriert wird. Deswegen kann im Rahmen dieser Arbeit die Konkurrenz um Licht von derjenigen um unterirdische Ressourcen wie Wasser und Nährstoffe nicht voneinander getrennt werden (WAGNER 1999 S. 38). Es handelt sich zwar durchweg um ausreichend wasser- und nährstoffversorgte Standorte (vgl. Kapitel zwei) sodass die Konkurrenz um diese Ressourcen weniger wahrscheinlich ist als um Licht (AMMER 1996 S. 153f), aber nicht negiert werden kann. Dafür sprechen eindeutig die Ergebnisse aus Abgrabungsexperimenten (WAGNER 1999 S. 127ff, AMMER 2000 S. 139 und 147, PETRIȚAN et al. 2011). Einen Anhalt darüber, ob auch kleine, nahestehende Nachbarn die Merkmalsstreuungen im Modell ebenso reduzieren wie ausschließlich größere, auch weiter entfernte, liefern die verwendeten Suchmodi „relativer Radius“ (CI.HR) und „Kegel“ (CI.HK). Dahinter liegende Mechanismen der Konkurrenz werden im ersten Fall auch als zweiseitige, symmetrische Konkurrenz vornehmlich um unterirdische Ressourcen, und als einseitige, asymmetrische Konkurrenz hauptsächlich um Licht bezeichnet (WEINER & THOMAS 1986), was BERNTSON & WAYNE (2000) anhand eines kontrollierten Experiments mit Gelbbirkensämlingen zeigen können. Allerdings wird der Symmetriegrad auch von der Kronenmorphologie der untersuchten Pflanzen selbst beeinflusst (KIKUZAWA & UMEKI 1996). Beispiele dafür, mit Konkurrenzuntersuchungen in natürlichen Beständen den vorrangig umkämpften Wachstumsfaktor herauszufinden, sind die Untersuchungen von HOLMES & REED (1991), CANNEL & GRACE (1993) oder NEWTON & JOLLIFFE (1998). Ein weiterer

Nachteil ist in der vorliegenden Untersuchung, dass die Indices nicht das ganze Spektrum der ökologisch möglichen Konkurrenzstärke abdecken. Deswegen kann nicht mitgeteilt werden, ob die hier erreichten maximalen Konkurrenzwerte der size-ratio-Indices dem Maximum für einen Buchenunterstand unter Fichte entsprechen. Das liegt vornehmlich in der Zusammenstellung der Untersuchungsflächen und der Variationsbreite der Einflussfaktoren sowie in der Tatsache begründet, dass es sich nur um gepflanzte und nicht natürlich verjüngte oder dicht gesäte Buchen handelt.

Ein wichtiger Aspekt ist auch, dass sich Messungen zu einem Zeitpunkt und daraus abgeleitete Indices wie in der vorliegenden Untersuchung nicht dafür eignen, Konkurrenz als Prozess (WELDEN & SLAUSON 1986, CANNEL & GRACE 1993) der Beeinflussung abzubilden (BURTON 1993) Wie AMMER (1996 S. 154) und LINNERT (2009 S. 39f) schreiben, sind die Konkurrenzwerte zum Aufnahmezeitpunkt nur mittelbar für die betrachtete Wachstumsreaktion verantwortlich, weil sie in erheblichem Maß die spätere Morphologie beeinflussen werden.

Fraglich ist auch, ob die unterschiedlichen Baumarten innerhalb des Voranbaus in ihrem Konkurrenzmaß tatsächlich anders wirken (BURTON 1993), als es mit den hier verwendeten Indices ausgedrückt wird (GUERICKE 2001 S. 98). Dem kann entgegengehalten werden, dass das Ausmaß von interspezifischer Konkurrenz im Voranbau schon allein durch die Auswahl der Einzelbuchen sehr begrenzt ist. Selbige werden nämlich im Kronenraum nicht von Nachbarn anderer Baumarten berührt (vgl. Abschnitt 3.1.1.3). Weiter wirken die Ergebnisse von AMMER et al. (2005) in dieser Hinsicht entlastend. Sie untersuchen an jungen Buchen die Auswirkung von Konkurrenz auf das Durchmesserwachstum. Anhand von sieben Konkurrenzindices, die sie nach Baumart separieren, können sie keine Unterschiede in der Konkurrenzstärke von intra- oder interspezifischem Wettbewerb feststellen. Die Autoren raten darüber hinaus davon ab, baumartenspezifischer Merkmale (PRETZSCH 1995) in einen Index zu integrieren, weil sich in diesen Fällen geschätzte Parameter in Bezug auf die Konkurrenzstärke nicht mehr interpretieren lassen. Ähnlich wie AMMER et al. (2005) können BARBEITO et al. (2014) nur einen sehr geringen Einfluss der Baumart auf das Wachstum von Buche und Ahorn in einem Dichte- und Mischungsversuch feststellen.

Ein weiteres zentrales, den Indices inhärentes Problem ist die Identifikation der Konkurrenten (BURTON 1993, LEE & GADOW 1997). Diese Aufgabe übernehmen in der vorliegenden Untersuchung die vorgeschalteten Suchmodi. Ob damit auch die wirklich relevanten Nachbarn ausgewählt worden sind, muss für diese Untersuchung offen bleiben. Schließlich sind die Suchmodi direkt bei der Datenaufnahme verwendet worden, sodass keine zusätzlichen Suchvarianten nachträglich auf ein großes gemessenes potenzielles Konkurrentenkollektiv rechnerisch angewendet und ihn ihrer Eignung verglichen werden können (BACHMANN 1998 S. 14, SCHRÖDER 2004 S. 42f, MÜNDER 2005 S. 25ff). Weder die Suchmodi noch die Konkurrenzmaßzahlen selbst können eine Auskunft darüber geben, in welchem Maß die Ressourcen von der Pflanze selbst reduziert werden und welchen Anteil die Nachbarn verbrauchen (WAGNER 2005). Es wird immer wieder berichtet, dass zu restriktive Suchmodi (DANIELS 1976, PUKKALA & KOLSTRÖM 1987, DE LUIS et al. 1998) genauso wie zu liberale (BIGING & DOBBERTIN 1992, AMMER et al. 2005) die Erklärungskraft von Konkurrenzindices in Modellen abschwächen bzw. zu geringeren Korrelationen führen (SCHRÖDER 2004 S. 108, PEDERSEN et al. 2012). Das lässt sich auch in der vorliegenden Arbeit für den Astindex feststellen, weil neben den beinhalteten, im Vergleich mit dem Durchmesser weniger zusammenhangsstarke wirkenden Astmerkmalen der restriktiv arbeitende Suchmodus für die nur zweimalige Verwendung in den Endmodellen verantwortlich ist. Die meisten Suchmodi arbeiten, wie auch hier der Fall, mit Distanzen und/oder Wachstumsgrößen der Bäume (DANIELS 1976, DANIELS et al. 1986, PRETZSCH 1992 und 1995, SCHRÖDER 2004 S. 42f, AMMER et al. 2005, MÜNDER 2005 S. 25ff). Dagegen sind nur wenige Ansätze bekannt, in denen entweder der Suchmodus (LEE & GADOW 1997) oder der Konkurrenzindex selbst eine explizit räumliche Komponente enthalten (NEWTON & JOLLIFFE 1998, LINNERT 2009 S. 45f). Darüber hinaus gibt es Konzepte, die zur Zuwachsschätzung die räumliche Konkurrenzwirkung einbeziehen (PRETZSCH 1995) bzw. die Konkurrenz als explizit räumlichen Prozess modellieren (AAKALA et al. 2016). Ein theoretisches Konzept zur räumlichen Darstellung des Effektes von höheren Pflanzen auf Ressourcen ist bei WU et al. (1985) nachzulesen. Seine Theorie der ökologischen Felder berücksichtigt dabei den kombinierten Einfluss von Krone, Stamm und Wurzeln eines Individuums auf die Verfügbarkeit von Ressourcen Strahlung, Wasser und Nährstoffe im Raum. Dieses Konzept findet in der ökologisch-waldbaulichen Forschung Anwendung bei WAGNER (1999 S. 30ff) und

AMMER (2000 S. 105ff), die es für den Altbestandseinfluss auf Wachstum und Entwicklung von Natur- bzw. Kunstverjüngung von Laubbaumarten zugrunde legen. In dieser Arbeit handelt es sich bei dem verwendeten Astindex jedoch nur um einen sehr begrenzten Ausschnitt aus dem räumlichen Konkurrenzgefüge, nämlich die Konkurrenzrichtung des am weitesten auf den Zentralbaum hinragenden Astes eines Nachbarn.

Alternativ zu indirekten Erfassungsmethoden wie Konkurrenzindices nennen CANNEL & GRACE (1993) die Strahlungsschätzung mit Fisheye-Fotos (WAGNER 1994), WAGNER 1999 S. 42ff, AMMER 2000 S. 105, SCHRÖDER 2004 S. 114ff, LINNERT 2009 S. 36ff, PETRIȚAN et al. 2009, PETRIȚAN et al. 2010, PETRIȚAN et al. 2011), einem Plant Canopy Analyzer (KÜßNER 1999 S. 15ff) oder einfachen Geräten wie sphärische Densimeter (PALETTO & TOSI 2009). Für direkte Messungen der Strahlung sind neben dem Plant Canopy Analyzer PAR-Sensoren üblich (KÜßNER 1999 S. 91 und 114, AMMER 2000 S. 106). Alle diese Methoden waren wegen der durchweg sichtbehindernden Verjüngung und/oder ihrer zu großen Höhe von bis zu 11,70m in der vorliegenden Arbeit nicht möglich anzuwenden. Stattdessen wird hier die Grundfläche als näherungsweise Vergleichswert herangezogen, auch wenn damit die detaillierte Kronenausformung nicht berücksichtigt werden kann (SCHMITT et al. 1995).

5.1.1.3 Genauigkeit bei der Bestimmung des Altbestandseinflusses

Die vorliegende Arbeit verwendet zwei Versuchsdesigns, die der unterschiedlich homogenen räumlichen Baumverteilung im Voranbau Rechnung tragen (vgl. 3.1.1.2). Dabei ist jede Versuchsfläche mit einem 15m breiten Randstreifen versehen, auf dem Daten für den aufstockenden Oberstand vorliegen. Es stellt sich nun die berechnete Frage, ob der Einfluss des Altbestandes für alle Einzelbäume mit der gewählten Breite des Randstreifens treffend wiedergegeben werden kann. Die hier verwendete Breite sollte den Messaufwand begrenzen und wurde von SCHRÖDER (2004 S. 30) und MÜNDELER (2005 S. 9) übernommen, die in ähnlichen gearteten zweischichtigen Waldumbaubeständen die Eignung von Konkurrenzindices zur Vorhersage des Höhenzuwachses der Voranbauten testeten. Welche Altbäume in den HEGYI-Konkurrenzindex bzw. die Grundfläche einzubeziehen sind, leitet sich aus den Suchmodi her. Ein vertikaler Suchkegel, der am Fußpunkt einer Buche mit 60° Öffnungsweite aufgesetzt wird (BACHMANN 1998 S. 87f) bzw. das horizontale Grenzwinkelprinzip nach BITTERLICH (1952)

übernehmen diese Aufgabe (vgl. Abschnitt 3.1.2.2). Eine Genauigkeitsüberprüfung lässt sich dergestalt machen, indem von jeder Versuchsfläche die maximalen Höhen bzw. Durchmesser der minimal möglichen Horizontalabstand von 15m zwischen einer Fichte und einer Buche gegenübergestellt werden. Dahinter steht das Ansinnen zu testen, ob die berechneten Konkurrenzwerte für eine Buche mit den tatsächlichen übereinstimmen. Die folgende Abbildung zeigt die Verteilungen des HEGYI-Index‘ (linke Grafik) bzw. der Grundfläche (rechte Grafik) für alle Probestunden. Jede Verteilung ist in zwei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe beinhaltet Voranbau-Buchen, für die der optimale Randstreifen maximal 15m breit ist. Mit anderen Worten: Die berechneten Konkurrenzwerte des Altbestandes entsprechen bei diesen Bäumen denen in der Natur. Bei der anderen Gruppe wäre ein breiterer Randstreifen als 15m notwendig gewesen, sodass bei diesen Konkurrenzwerten Altfichten außen vor gelassen sind, die mit den beiden Suchmodi eigentlich ausgewählt gehört hätten

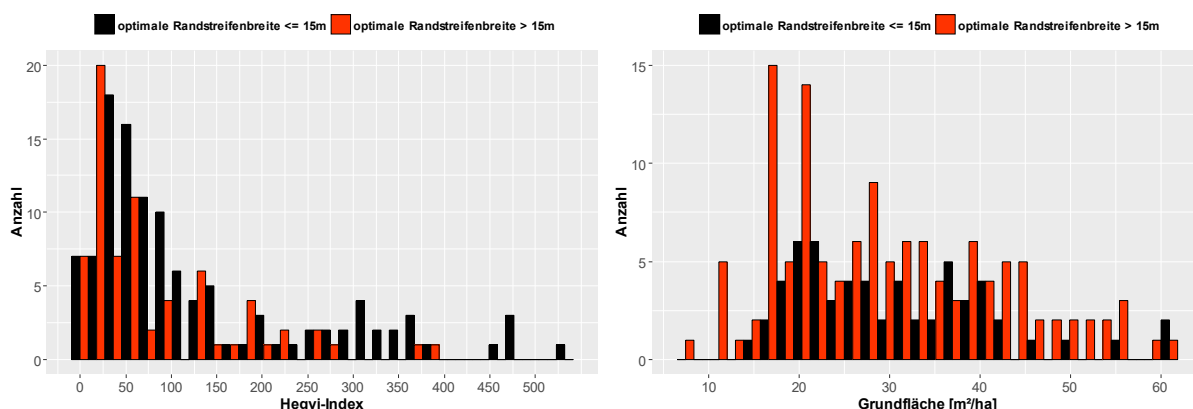


Abbildung 5-3: Darstellung der Genauigkeit der Altbestands-Indices HEGYI-Index und Grundfläche.

Die schwarzen Balken stellen Buchen dar, für die die gewählte Randstreifenbreite von 15m alle Suchmodusrelevanten Altbäume erfasst, die roten Balken zeigen die Buchen, für welche innerhalb der gewählten Suchmodi relevante Konkurrenten des Altbestandes fehlen. n=185

Beim HEGYI-Index (linke Grafik) sind 38% der Werte mit diesem Problem behaftet. Nur für einige Buchen mit sehr hohen Schirmdruck-Werten liegen keine Abweichungen vor. Bei der Grundfläche gestalten sich die Verhältnisse gravierender: Ihre Verteilung zeigt einen rund zweimal so hohen Anteil von Werten, für die ein breiterer Randstreifen als 15m nötig gewesen wäre. Sehr niedrige Grundflächen unter 15m²/ha sind eher mit höheren Werten anzunehmen. Daher rät auch LORIMER (1983) von der Verwendung des Grenzwinkelprinzips als Suchmodus insbesondere mit Zählbreite eins ab. Die hier dargestellten

Verwerfungen führen dazu, dass sich die Punktwolken der Ergebnisgrafiken in Kapitel vier nach rechts verschieben und so vor allem die Streuungen derselben und weniger den Trend verändern. Beim HEGYI-Index wirkt die Tatsache mildernd, dass über den gesamten Wertebereich hinweg verzerrungsfrei widergegebene Index-Werte vertreten sind. Dies ist bei der Grundfläche nicht der Fall.

Insgesamt betrachtet handelt es sich hier um ein Problem mit einem geringen Ausmaß. Dafür sprechen mehrere Gründe. Erstens beinhalten die Ergebnisse in Kapitel 4 bis auf das Modell zum Vorhandensein von Tiefzwieseln den Hegyi-Index als Schirmvariable. Dort ist die Abweichung zwischen realem und berechnetem Index weitaus geringer als bei der Grundfläche. Zweitens ergibt die einzelbaumweise Prüfung, dass die Diskrepanz zwischen optimaler und realer Randstreifenbreite bei zwei Drittel der Buchen nur geringfügig bis 5m abweicht. Diese Befunde decken sich mit den Aussagen von MÜNDER (2005 S. 32f). Bei ihm reichte ein Distanzpuffer von 5m in die Kernfläche hinein aus, um bei 15m Randstreifenbreite Randeffekte des Altbestandes zu vermeiden. Er verwendete u. a. einen Suchkegel am Stammfußpunkt der Probebuchen, dessen Öffnungsweite von 60° nur den Bestandesausschnitt erfasste, der auch vermessen wurde. Drittens ist es an dieser Stelle auch unumgänglich, die oben durchgeführte Überprüfung kritisch zu hinterfragen. Sie arbeitet stets mit den gemessenen maximalen Höhen bzw. Durchmessern einer Fläche. Ob solche Bäume tatsächlich in der angenommenen messrelevanten Umgebung stocken oder ob es sich dabei um weit kleinere Altlichten oder auch größere handelt, kann hier nicht gesagt werden. Insofern sind auch die hergeleiteten optimalen Randbreiten mit Unsicherheiten behaftet, denen hier nicht beizukommen ist.

Die besprochenen Diskrepanzen zwischen realem und berechnetem Indexwert sind zwar vorhanden, aber insbesondere beim HEGYI-Index aus den genannten Gründen von geringer Bedeutung. Um solche Abweichungen gänzlich zu vermeiden findet man sich schnell in einem Problemkreis von (1) Aufwand bei der Datenerhebung, (2) räumlicher Datenfortschreibung, (3) Vergleichbarkeit mit der Literatur und der Forstpraxis und (4) Dimension des zu wählendem Suchmodus' wieder, der (5) bis hin zu alternativen Erfassungsmethoden von Altbestandeskonkurrenz auf junge Buchen reicht.

(1) Bei der Datenerhebung musste in der vorliegenden Arbeit ein rationeller Weg gefunden werden, um Randeffekte mit zu berücksichtigen (BACHMANN 1998 S. 78ff, SCHRÖDER 2004 S. 30, MÜNDER 2005 S. 32), ohne vorher maximale Höhen oder BhdS des Altbestandes zu kennen, anhand derer sich individuelle Streifenbreiten hätten ableiten lassen. Die Randstreifenbreiten hinterher „nachzubessern“ wäre aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich gewesen und hätte vor allem bei der Grundflächenbestimmung zu unverträglichem hohem Aufwand geführt. Weil Abweichungen beim Kernflächendesign doppelt so häufig auftreten wie bei solchen Flächen mit einem Probekreisraster, sollte es in ähnlichen Untersuchungen nicht verwendet oder abgewandelt werden. Zumindest sind in dieser Arbeit zu geringe Seitenlängen dieser Kernflächen dafür verantwortlich, dass die fehlende Horizontaldistanz mit einer gedachten Pufferzone in die Untersuchungsfläche hinein nicht auszugleichen ist (BACHMANN 1998 S. 80, MÜNDER 2005 S. 32). Speziell bei der Grundfläche hätte eine Winkelzählprobe vor Ort alle Probleme behoben. Jedoch war dies wegen der sichtbehindernden Voranbauten durchweg nicht möglich.

(2) Eine Möglichkeit, den Messaufwand einerseits zu begrenzen und andererseits mit den gewählten Suchmodi weiterzuarbeiten, wäre das räumliche Fortschreiben des Stammverteilungsplans. In der waldwachstumskundlichen Forschung wird diese Methode verwendet, indem die Stammverteilungspläne durch Verschieben über die Flächenaußenkante hinaus oder Spiegeln an derselben dupliziert werden (BACHMANN 1998 S. 78ff, PRETZSCH 2002 S. 293f). In der vorliegenden Untersuchung ist das ohne weiteres nicht möglich. In vielen Fällen endet die Fichtenbestockung der aufgenommenen Gesamtflächen, weil sich unmittelbar daran breite Forstwege, Wirtschaftswege, Rückegassen, Bruchlöcher oder Jungbestände anschließen. Auch an den Randlinien, an denen sich die Bestockung der aufgenommenen Fläche fortsetzt, lohnt es sich nicht, räumlich fortzuschreiben, weil nach MÜNDER (2005 S. 33) „...nur mittlere Bedingungen der Versuchsfläche in der Randzone berücksichtigt werden.“ und nach PRETZSCH (2002 S. 298) eine für die Konkurrenzberechnung nachteilige Periodizität in den generierten Strukturen erzeugt wird. Auch das Über- oder Unterschätzen der Konkurrenzverhältnisse ist nach seiner Aussage für Zentralbäume nahe dem Parzellenrand nicht zu vermeiden. Aus den genannten Gründen scheidet ein solches Vorgehen in dieser Arbeit aus. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit Hilfe von Abstandsfunktionen, die aus den Stammverteilungsplänen resultieren,

Strukturen über die gemessenen Bereiche hinaus zu generieren (PRETZSCH 2002 S. 297f), die aber in dieser Arbeit nicht verwendet wird.

(3) Bei den hier gewählten Suchmodi handelt es sich um solche, die in Forschung und Praxis weit verbreitet sind. Die Suchkegel-Öffnungsweite von 60° bewegt sich in einem Rahmen, der von vielen Autoren als zielführend beschrieben wird, wenn es darum geht, die Streuung in Einzelbaumzuwachsdaten oder qualitätsbeschreibenden, morphologischen Daten mit Hilfe von Modellen zu erklären (BACHMANN 1998 S. 173, BIGING & DOBBERTIN 1992, PRETZSCH 1995, SCHRÖDER 2004 S. 43f, AMMER et al. 2005, MÜNDER 2005 S. 50ff). Für die Grundfläche des Oberstandes wird in der vorliegenden Untersuchung das Grenzwinkelprinzip nach BITTERLICH (1952) verwendet, um einen praxisnahen Weiser für die Schirmkonkurrenz an die Hand geben zu können.

(4) Von diesem Prinzip der Vergleichbarkeit abzuweichen würde bedeuten, die Suchmodi abzuwandeln. Dazu könnte die Öffnungsweite des Suchkegels so weit reduziert werden, dass sein Volumen nur Bereiche abdeckt, die vom Stammverteilungsplan erfasst sind. Das wäre in dieser Arbeit mit 42° der Fall. Bei der Grundfläche wäre ein fixer Radius von 15m um die Probebuche herum eine Alternative. PETRIȚAN et al. (2011) verwenden für Grundflächenmessungen einen festen Radius von 10m, um in einem Abgrabungsexperiment die Wurzelkonkurrenz von Altfichten vom Strahlungswettbewerb entkoppeln zu können. In diesem Bereich stellen sie eine straffe Korrelation zwischen Feinwurzelbiomasse der Fichte und Grundfläche fest. Wie aber AMMER (1996 S. 18) ausführt, sind kleine Flächenausschnitte mit hochgerechneten Werten besonders bei inhomogener Bestockung mit Ungenauigkeiten behaftet. Ein größerer Zählerfaktor als eins würde zwar die Suchradien verkleinern, kann aber zu verminderten Korrelationen zwischen Einzelbaumwerten und Grundfläche führen (DANIELS 1976). Wenn für alle Buchen einer Fläche derselbe Wert, nämlich die mittlere Grundfläche aus den gemessenen Daten, verwendet würde führte dies dazu, dass die bewusst gesuchten, kleinräumigen Unterschiede aus dem Probekreisdesign verwischt würden und aufgelöste Trends in den Daten nach sich zögen. Insgesamt zwar schärfere, aber nur sehr grobe Aussagen wären die Folge.

(5) Abschließend sind alternative Quantifizierungsmethoden in die Betrachtungen einzubeziehen. Eine Möglichkeit, um die Schirmkonkurrenz mit hoher Genauigkeit zu erfassen sind hemisphärische Fotos (WAGNER 1994, WAGNER 1999 S. 42f). Damit lässt sich die Strahlungsverfügbarkeit und die Wurzelkonkurrenz in einem

horizontalen 360°-Winkel und einem vertikalen 180°-Winkel erfassen. Daher ist es auch ein breit angewendetes Verfahren (u.a. WAGNER 1999 S. 54ff, SCHRÖDER 2004 S. 49ff, PETRIȚAN et al. 2009, LINNERT 2009 S. 36f). Leider schied es aus technischen Gründen aus, weil viele Buchen dieser Arbeit zu hoch wären. Bis in eine Höhe von 11,70m wäre das Kameraobjektiv zu schieben, ein Bereich, der außerhalb der Reichweite von Tragegestänge und/oder Leiter liegt.

Aus der vorstehenden Erörterung lässt sich das Fazit ziehen, dass Ungenauigkeiten im Vergleich des Altbestandseinflusses der Probebuchen untereinander wahrscheinlich vorhanden sind, aber keine Auswirkung auf den Trend zwischen dem Einflussfaktor „Schirm“ und qualitäts- bzw. wachstumsrelevanten Merkmalen der Einzelbuchen haben. Das wird dadurch untermauert, dass bis auf das Modell zur Tiefzwieseligkeit immer der HEGYI-Index und nicht die Grundfläche in den präsentierten Endmodellen enthalten ist. Grundsätzlich handelt es sich bei dem umrissenen Problembereich um die Entscheidung zwischen Suchmodi, mit denen andere wissenschaftliche Untersuchungen arbeiten bzw. die in der forstlichen Praxis verwendet werden und solchen, die optimal an die Datenlage angepasst sind. Der erstgenannte Weg wird hier beschränkt.

5.1.2 kritische Würdigung der statistischen Methoden

5.1.2.1 Modellspezifikation und Variablenselektion

Ziel des Modellbildungsprozesses sind parameterkarge, einfach zu interpretierende, gut an die Daten angepasste und vollständige Modelle (ZAR 2010 S. 433). Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Spezifikationsprozess ist als hierarchische Prozedur zu diskutieren. Es handelt sich dabei zunächst um die Zusammenstellung von acht festen Grundmodellen (vgl. Tabelle 3-16) und im Anschluss daran an um den schrittweisen Ausschluss dieser vorausgewählten Variablen während der Modellierung.

Spezifikation von Grundmodellen

Die erste Problematik beschäftigt sich mit der Frage, welche Variablen als erklärende Größen dem Modell zuzuführen sind. In der vorliegenden Arbeit enthalten die Grundmodelle je einen Vertreter der Gruppen Schirmdruck, Seitendruck, Individuum bzw. Zeit und ggf. Ansatzhöhe des Merkmals. Diese wurden in acht Varianten miteinander kombiniert und ausgewertet. Die

Modellvarianten eins und fünf bringen dabei die forstpraktisch relevanten Größen Grundfläche des Altbestandes und Standraum des Voranbaus miteinander in Verbindung. Alle anderen Modellzusammenstellungen legen den Fokus auf Vergleichbarkeit mit anderen wissenschaftlichen Untersuchungen (SCHRÖDER 2004, MÜNDELER 2005). Insofern handelt es sich um inhaltlich motivierte Konstellationen der erklärenden Variablen. Aus statistischer Sicht betrachtet verbaut diese Vorgehensweise aber die Möglichkeit, Modelle zu finden, die mit objektiven Kriterien messbar die beste Anpassung an die Daten liefern. Das hätte allerdings bedeutet, dass für jede Responsevariable 24 Modelle statt acht zu prüfen gewesen wären, weshalb dieser Weg nicht beschritten wurde.

Modellverbesserung

Wenn die Grundmodelle gewissermaßen als Startpunkt in der Modellierung aufgefasst werden können, widmet sich die zweite Hierarchieebene der Modellspezifikation der Frage, ob die Endmodelle die ausgewählten Vertreter der Gruppen enthalten sollen oder ob diese durch Modellverbesserungsmaßnahmen teilweise wieder zu entfernen sind. Außerdem ist zu diskutieren, ob Wechselwirkungen aus den Haupteffekten zu berücksichtigen sind.

In der vorliegenden Arbeit wird von statistischen Modellverbesserungsmechanismen kein Gebrauch gemacht. Das Vorgehen ist demzufolge als deterministisch einzustufen, weil Hypothesen getestet werden, die das Vorhandensein von Wirkzusammenhängen und die Stärke eines Zusammenhangs zwischen den unabhängigen Variablen und der interessierenden abhängigen Größe prüfen. Der Verzicht auf das Einbeziehen von Wechselwirkungen wird im Abschnitt 5.1.2.2 behandelt und ist wiederum statistisch motiviert.

Um dieses Vorgehen zu erörtern, sei zunächst auf MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 89) verwiesen. Sie führen dort an, dass Variablen mit einem hohen Beitrag zur Reduktion der unerklärten Reststreuung im Modell belassen werden sollen und umgekehrt. Schwierigkeiten bereiten den Autoren zufolge die weniger deutlichen Zwischenfälle, die, wenn im Modell belassen, zusammen eine verzerrte Auswirkung auf die Responsevariable haben und ein unwirkliches Ergebnis produzieren können. HEDDERICH & SACHS (2016 S. 780) sprechen dann auch von überangepassten Modellen, von overfit bzw. im umgekehrten Fall von underfit. In der Literatur werden Möglichkeiten diskutiert, die Abhilfe schaffen können. Dazu zählen

- Subset-Methoden
- und schrittweise Variablenauswahlmethoden (Forward Selection, Backward Elimination, Stepwise Selection).

Die Subset-Methode als Suche nach dem besten Modell aus allen möglichen Kombinationen von unabhängigen Variablen und allen Wechselwirkungen zählt zu den Grobsuchverfahren. Problematisch wird dabei die objektive Festlegung des besten Modells eingeschätzt (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 92, ZAR 2010 S. 434.). Schrittweise arbeitende Feinsuchverfahren haben den Vorteil, dass mathematisch objektive und stringente Entscheidungsregeln existieren um die statistische Relevanz von Variablen abzuprüfen. Um die Balance zwischen over- und underfit zu behalten, arbeiten sie systematisch entweder mit Auf- oder Abbauvorgängen. Im ersten Fall werden dem Nullmodell solange Variablen zugeführt, bis sich die Anpassungsdifferenz und andere gewählte Kriterien nicht mehr nennenswert unterscheiden (Forward Selection). Im zweiten Fall wird ein Modell aus allen Variablen und Wechselwirkungen schrittweise abgebaut (Backward Elimination) (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 89ff, HOSMER & LEMESHOW 2000 S. 92-134, FAHRMEIR et al. 2009 S. 163 ff, ZAR 2010 S. 435 ff). Auch eine iterativ arbeitende Kombination aus beiden Vorgängen ist denkbar (Stepwise Regression)(MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 91, ZAR 2010 S. 437). FAHRMEIR et al. (2009 S. 164) betonen, dass die Variablenauswahl über t-Werte mit Signifikanzgrenzen zweifelhaft ist und nennen andere Modellwahlkriterien wie z.B. das AIC. Dem pflichten HOSMER & LEMESHOW (2000 S. 118) bei mit der Ergänzung, dass die Signifikanzgrenzen, ab wann eine Variable via t-Tests aus dem Modell entfernt oder einbezogen wird, subjektiver Natur seien. Das ließe ein Restrisiko für über oder unterangepasste Modelle bestehen bleiben. FAHRMEIR et al. (a.a.O.) bescheinigen selektiven Auswahlmethoden insgesamt, dass sie ein sehr gutes Modell liefern. Sie nennen auf Seite 156f die Auswirkungen fehlspezifizierter Modelle. Sobald relevante Variablen fehlten, wären die geschätzten Parameter bei vorliegender Kollinearität zwar verzerrt, gleichzeitig aber mit einer geringeren Varianz behaftet und damit genauer. Außerdem besäße ein solches Modell in einigen Fällen bessere statistische Eigenschaften als das korrekt spezifizierte. Sobald sich irrelevante Variablen im Modell befänden, handelte es sich zwar um unverzerrte Parameterschätzer, die jedoch an Genauigkeit eingebüßt hätten. Sie raten daher zu Modellen möglichst ohne irrelevante Variablen.

Aus den angeführten Punkten folgend ist es aus statistischer Sicht möglich, dass relevante Informationen wie Wechselwirkungen fehlen oder unbedeutende Variablen enthalten sind. Um diesem Engpass zu entkommen, sei der Blick auf Multikollinearität gerichtet. Sie relativiert die Vorzüge von statistisch motivierten Auswahlmethoden.

ZAR (2010 S. 435) lastet Subset-Methoden an, dass sie in Modellen mit enormer Multikollinearität münden. Der Autor sieht auf S. 437 bei schrittweisen Auswahlmethoden Schwierigkeiten bei Vorliegen von Multikollinearität. Bei DORMANN et al. (2012) ist nachzulesen, dass wirklich einflussreiche Variablen in Modellen aus multikollinearen Daten oft nicht signifikant seien und daher von Auswahlmethoden außen vor gelassen würden bzw. bei Entfernung einer kollinearen Variablen die Modellauswahlprozedur auf eine falsche Bahn gelenkt werde. Sie plädieren dafür, mit ökologischem Vorwissen relevante und dem zu untersuchenden Phänomen nahestehende Prädiktoren auszuwählen, um informative Modellergebnisse zu erhalten. Dieser Verfahrensweise wird hier gefolgt, zumal den vorliegenden Daten Multikollinearität inhärent ist (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Weiterhin handelt es sich nur um eine überschaubare Anzahl von erklärenden Größen, die in die Modelle aufgenommen wurden, sodass eine Variablenreduktion aus Übersichtlichkeitsgründen nicht notwendig war. Die angewendete Strategie hat auch den Vorteil, dass die Ergebnisse als Vergleichsbasis für Folgeuntersuchungen verstanden werden können, weil sie die oben genannten Variablengruppen vollständig abdecken (MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 89).

5.1.2.2 Multikollinearität

Multikollinearität wird in der statistischen Literatur immer wieder als Problem genannt, wenn es um die Genauigkeit von Modellen geht. ZUUR et al (2010) führen an, dass kollineare Variablen im Modell dazu führen können, dass kein Parameterschätzwert mehr signifikant ist. Würde einem solchen Modell ein Parameter entnommen, änderten sich die Schätzer und ihre Signifikanzen möglicherweise drastisch. BELSLEY et al. (1980 S. 92) unterstreichen jedoch, dass dies aber nicht unbedingt der Fall sein muss, obwohl Kollinearität vorliegt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse unterliegen alle dem Kollinearitätsproblem. Von den 21 Endmodellen gehören 19 dem Kollinearitätstyp a) an; der Kollinearitätstyp b) ist dem Modell für den stärksten Grünastdurchmesser 1,5-3,0m und dem

Modell für den stärksten Grünastdurchmesser 3,0-4,5m zuzuordnen (vgl. Abschnitt 3.2.6.1). Es handelte sich in beiden Fällen um Korrelationen von mehr als 0,7 zwischen dem HEGYI-Index des Oberstandes und der Baumhöhe der Buchen. Die folgende Abbildung bietet einen Überblick, wie sich die Multikollinearität in den acht Modellvarianten nach unabhängigen Variablen verhält.

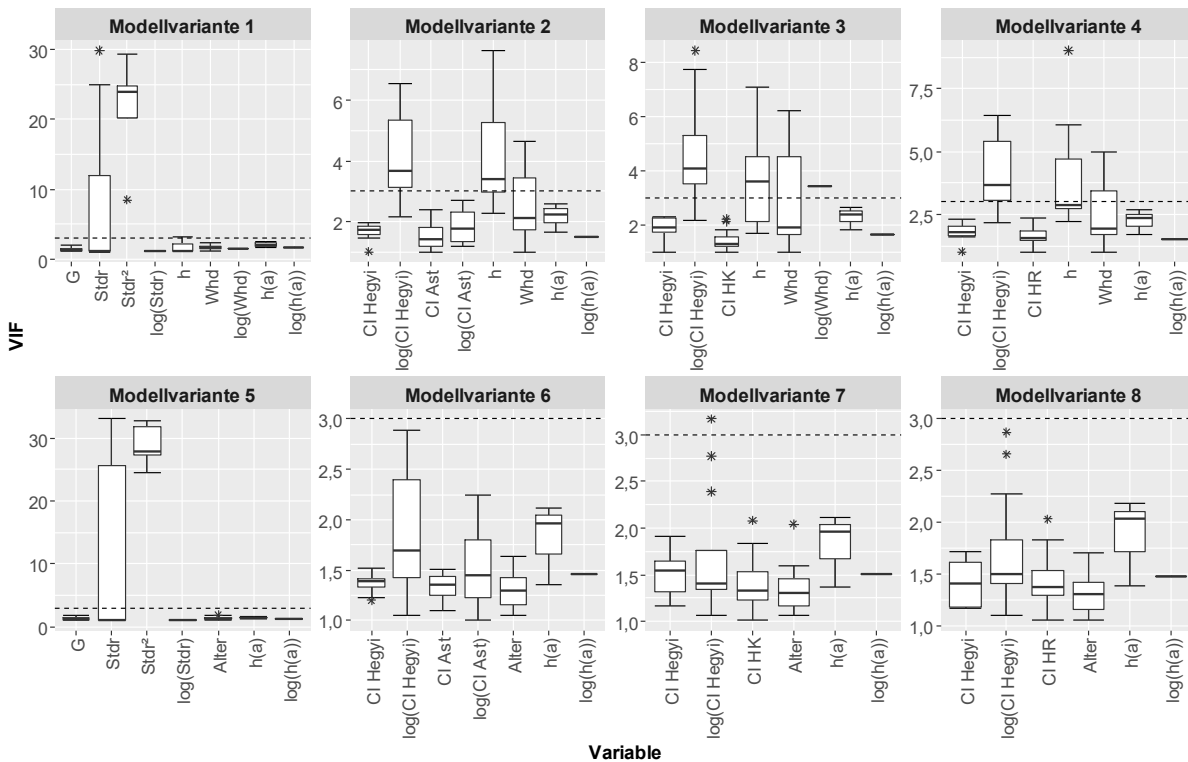


Abbildung 5-4: Darstellung der Multikollinearität für die unabhängigen Variablen nach den Modellvarianten 1 bis 8.

Enthalten sind alle berechneten gültigen Modelle, das Endmodell je abhängiger Variable eingeschlossen.

Es ist ersichtlich, dass einige Modellvarianten per se einen hohen Grad an Multikollinearität aufweisen. Dazu gehören die Varianten zwei bis vier. Innerhalb dieser überschreiten der logarithmierte Schirmdruckindex und die baumindividuellen Parameter wie Höhe und Wurzelhalsdurchmesser den hier verwendeten Grenzwert von drei. Diese Befunde zeigen eindrucksvoll, dass es sich verbietet, inhaltlich sinnvolle Wechselwirkungen zwischen den Haupteffekten in die Modelle aufzunehmen. Würden Hegyi-Index des Oberstandes und baumindividuelle Parameter wie Whd oder Höhe miteinander kombiniert, explodierte die Multikollinearität. Dasselbe träfe zu, sobald die genannten Größen mit den Indices für den Seitendruck verbunden würden (AMMER 2000 S. 145).

Auch die sinnvolle Wechselwirkung aus Schirm- und Seitendruck (AMMER 1996 S. 129 und 155, COLLET & CHENOST 2006) führt bis auf zwei Ausnahmen entweder zu nicht konvergierenden Modellen oder zu inakzeptabler Multikollinearität des Typs c), wie Vergleichsrechnungen mit den Endmodellen ergeben (hier nicht dargestellt). Die hohen VIF-Werte in den Modellvarianten eins und fünf sind auf den Polynom zweiten Grades zurückzuführen und daher nicht problembehaftet im Sinne einer Multikollinearität. Modelle ohne multikollineare unabhängige Variablen kommen in dieser Untersuchung nicht vor.

Das stützt die Aussage von DORMANN et al. (2012), dass empirischen Daten ein gewisser Grad an Multikollinearität immer anhängig ist. Sie begründen dies damit, dass gemessene unabhängige Größen Ausdruck einer latenten, nicht messbaren Größe sein können. In der vorliegenden Untersuchung sind das sowohl die baumeigenen Größen Höhe, Whd oder Alter als auch das Konkurrenzmaß, das vom Fichtenschirm und vom Buchenvoranbau ausgeht (vgl. Tabelle 3-16 und AMMER 2000 S.113 und S. 149). Als weitere Ursache schließen sie auch Fälle von zufälliger Kollinearität nicht aus, was insbesondere bei kleinen Stichprobenumfängen aufträte. Die Frage, ob eine vorliegende Multikollinearität mit statistischen Mitteln vollständig behoben werden kann, beantworten DORMANN et al. (2012) klar mit Nein. Sie bieten einen weitreichenden Überblick darüber, mit welchen Methoden diese unerwünschten Probleme feststellbar sind und eingegrenzt werden können. Sie nennen u.a. Korrelationskoeffizienten und VIF-Werte als Beispiele für Maßzahlen, die für jede unabhängige Variable vorliegen. Sie bescheinigen ihnen eine höhere Detailgenauigkeit als korrelations- oder designmatrixbasierten Kriterien, die einen Wert für den ganzen Datensatz liefern. Als Grenzwerte für eine problematische Multikollinearität nennen DORMANN et al. (2012) Korrelationskoeffizienten $r > 0,7$ und VIF-Werte von mehr als zehn. Sie zeigen in ihren Simulationsbeispielen zu unterschiedlichen Modelltypen eine stabile Modellgenauigkeit, wenn korrelierte Regressoren vor der Analyse ausgeschlossen werden. Diese einfache Technik liefert in ihren Ergebnissen ebenso brauchbare Modelle wie andere komplizierte Methoden. Diese gute Eignung führen sie jedoch auch auf die künstlich erzeugte Kollinearitätsstruktur in ihren Daten zurück. Des Weiteren zeigen sie, dass eine vorliegende Korrelation zweier Variablen nicht notwendiger Weise eine Kollinearität im Modell bedeuten muss. Diese Aspekte führten dazu, in der vorliegenden Arbeit zusätzlich zu den Korrelationskoeffizienten r die VIF-Werte heranzuziehen. BELSLEY et al. (1980 S.

92) bescheinigen wiederum beiden Maßen, dass die Korrelationsmatrix der unabhängigen Größen eines Modells nur bivariate Beziehungen beleuchtet, wogegen kollinear behaftete Beziehungen zwischen mehreren Variablen im Dunkeln bleiben. Dem VIF-Wert wohnt der zusätzliche Nachteil inne, dass es keine allgemeingültigen, theoretisch begründeten Grenzwerte gibt, ab wann es sich um eine problematische Multikollinearität handelt (BELSLEY et al. 1980 S. 93). Der von DORMANN et al. (2012) genannte Grenzwert von zehn wurde in der vorliegenden Untersuchung gegen einen restriktiveren Wert von drei ausgetauscht, wie ihn ZUUR et al. (2010) und ZUUR et al. (2009 S. 387) verwenden. Im Ergebnis spiegelte sich in Modellgrafiken wider, dass die VIF-Werte den Wert drei nicht erreichen dürfen, um nicht in sichtbar kollinear behafteten Zusammenhängen zu münden. Andere hier nicht verfolgte Ansätze, um der Kollinearität beizukommen, verwenden Techniken der Hauptkomponentenanalyse oder der Faktorenanalyse (DORMANN et al. 2012). Die Autoren geben außerdem noch einen Überblick über Verfahren, die weniger anfällig gegenüber Kollinearität sind. Dazu zählen sie u.a. Regressionstypen, die nach einem bestimmten Verfahren penalisieren.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Kronen- und stammformbasierte Qualitätsklassen

Die Ergebnisse zum Auftreten differenzierter Qualitätsklassen sollen nachfolgend anhand der drei untersuchten Einflussfaktoren Alter, Überschildungsdichte und Wuchsraum innerhalb des Voranbaus diskutiert werden. Kronen- und Stammformen junger Buchen sind einerseits bedeutend für die aktuell vorgefundene Qualität, weil sie Starkastigkeit, Astansatzwinkel und Zwieseligkeit gut repräsentieren (WEIDIG 2016 S. 124). Andererseits sind schlechte Kronenformen auch noch im Durchforstungsalter durch mehr steile und starke Äste, eine schlechtere Astreinigung und eine größere Anzahl an Krümmungen gekennzeichnet, als das bei wipfelschäftigen Buchen der Fall ist (HENGST 1964).

5.2.1.1 Einfluss des Alters

Eine Erkenntnis aus dieser Arbeit ist, dass es tatsächlich, wie in den Arbeitshypothesen 1 und 2 (Kapitel 1) unterstellt, eine qualitative Reaktion auf veränderte Strahlungs- und Wuchsraumverhältnisse gibt. Darüber hinaus ist es gelungen, anhand von Qualitätstypen herauszuarbeiten, ab welcher Standzeit diese Reaktion wahrnehmbar unterschiedlich ausfällt (Arbeitshypothese 3, Kapitel

1). Die Ergebnisse zeigen anhand der Häufigkeitsverteilung der Qualitätsklassen klar, dass die Buchenvoranbauten bis zu einem Alter von zehn Jahren nach der Pflanzung auf deutlich verschiedene Schirm- und Standraumbedingungen hinsichtlich des Qualitätstyps kaum differenziert reagieren (LEONHARDT & WAGNER 2006, HOUŠKOVÁ & MAUER 2013). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt KLEIN (1983) in seinen Untersuchungen an Buchen-Voranbauten. Im Gesamtmodell für NRW und SAX unterscheiden sich Buchen mit einer Standzeit von acht bis zehn Jahren in keiner Weise von der Gruppe der älteren Voranbauten. Dagegen berichten LEIBUNDGUT et al. (1976) und FISCHER (1998 S. 148f und 2000) von einer Qualitätsverbesserung mit steigendem Alter. So dominieren in jungen Wuchsphasen tief verbuschte Exemplare und Mehrfachzwiesel sowie Sperrwüchse. Dafür nimmt der Anteil knickiger Eichen im Laufe der Zeit als Folge ehemaliger Zwiesel zu (LEIBUNDGUT et al. 1976). Bei KURTH (1946 S. 617) äußert sich die Qualitätsverbesserung in einer Abnahme des Anteils knickiger Buchen. Stellt man diesen Ergebnissen die Resultate von NINGRE (1987) an Buchen auf Freiflächen im Verband 1,4m x 1,4m gegenüber, offenbart sich Gegenteiliges. So nehmen geradschaftige und nur leicht knickwüchsige Exemplare innerhalb von drei Jahren ab, zwieselige Buchen werden häufiger und extrem gebogene, aufgelöste Formen kommen erstmals vor. Daraus lässt sich ableiten, dass Buchen anfälliger gegenüber Frösten sind. Der Grund, weshalb in dieser Arbeit keine Dynamik der Kronenformen festgestellt werden kann, liegt zum einen daran, dass keine Freiflächenbedingungen mit einbezogen sind. Wenn andererseits die Kronen- und Stammform aus komplexen morphologischen Strukturen besteht, kann das Alter keinen Erklärungsbeitrag im Modell mehr liefern. Einzelne Charakteristika, die die Kronenformen maßgeblich bestimmen wie Astwinkel, relative Astdurchmesser (WEIDIG 2016 S. 121ff) oder die Astanzahl pro Längenheit, verhalten sich nicht gleichgerichtet bei geänderten Umgebungsbedingungen. Somit heben sich die einzeln für jedes morphologische Merkmal gefundenen Korrelationen (vgl. Kapitel vier, WEIDIG 2016 S. 91ff) mit den Licht- bzw. Wuchsraumverhältnissen gegenseitig auf – das Alter als Faktor spielt keine Rolle mehr. Betrachtet man den Faktor Zeit und fasst die qualitative morphologische Ausprägung als dynamischen Prozess denn als statischen Zustand auf, leitet sich die Frage ab, wie zuverlässig eine Qualitätsbeurteilung und auf die Zukunft ausgerichtete Schlussfolgerungen für eine waldbauische Behandlung anhand einer Momentaufnahme bei jungen Bäumen überhaupt sein können. Innerhalb des geschilderten allgemeinen

Alterstrends, der in dieser Arbeit aus den genannten Gründen im Gegensatz zu anderen Studien nicht beobachtet wird, finden immer wieder qualitative Umsetzungen statt (LEIBUNDGUT et al. 1976, GOCKEL 1994 S. 81). Diese Dynamik äußert sich darin, dass bei Buche rund ein Drittel der anfänglich schlechten Exemplare zu guten werden und ein ebenso hoher Anteil sich von gut zu schlecht entwickelt (NINGRE 1987 S. 30ff). Dabei sind knickige Buchen am wenigsten konstant, weil sich jede zweite davon verschlechtern kann (NINGRE 1987 S. 30ff). Bereits FABRICIUS (1929) analysiert junge Buchen in ihrer Form. Er stellt ein positives qualitatives Umsetzen in Höhe von 57% und ein negatives in derselben Größenordnung wie NINGRE (ebd.) fest. GOCKEL (1994 S. 81ff) berichtet von einem qualitativen Umsetzen an acht- bis neunjährigen Stieleichen-Pflanzungen gleicher Dichte, das nach fünf Jahren, im Alter von 13 bzw. 14, mehrheitlich positiv ausfällt. Er bescheinigt wipfelschäftigen Exemplaren mit 61% die größte Konstanz über diese Zeit hinweg. Zwiesel mit Tendenz zur Wipfelschäftigkeit und Mehrfachzwiesel verändern ihre Qualitätsklasse zu 50 bzw. 46% nicht. Eine geringe qualitative Konstanz zeigen aufgelöste Kronen gefolgt von verbuschten Exemplaren. Für Zwiesel ist festzuhalten, dass sich diese an Buchen erst nach drei Jahren als dauerhaft manifestieren, wie NINGRE (1997) anhand von wiederholten und teils retrospektiven Verzweigungsaufnahmen mit objektiven Kriterien wie Höhenunterschied und Durchmesserrelation der beiden Zwiesel-Achsen folgern kann. Dass Zwiesel im Laufe der Zeit verschwinden und sich nach oben verlagern, ist der steigenden Wirkung des Seitendrucks zuzuschreiben (MOSANDL et al. 1991). Aus den aufgeführten Studien lässt sich für die vorliegende Arbeit folgern, dass die Aufnahme von Qualitätstypen nur eine Momentaufnahme eines dynamischen Prozesses darstellt. Buchen, die im Modell als „sehr gut“ oder „gut“ eingestuft sind, können sich nach nur relativ kurzer Zeit, wie die vorstehenden Studien zeigen, verschlechtern und umgekehrt. Wenn es sich um dieselbe Änderungsrate handelte, stellte das kein Problem für die qualitative Beurteilung junger Buchenvoranbauten insgesamt dar. Ob das der Fall ist, kann mit den vorliegenden Messungen anhand einer Chronosequenz allerdings nicht belegt werden. Ein weiterer Aspekt ist der, dass sich die genannten Untersuchungen nur auf Freiflächen und hier teils auf Eichen beziehen. Wenn nach NINGRE (1987 S. 30) eine gesicherte Qualitätsverschlechterung an Buchen nach nur drei Jahren auf der Freifläche auftritt, muss dies nicht für überschirmte Voranbauten gelten. Insofern muss der Typisierung in Qualitätsklassen und

daraus abgeleiteten, auf die Zukunft weisenden Ergebnissen dieser Arbeit eine Unsicherheit beigemessen werden (LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 339ff, NINGRE 1987 S. 30ff, KUEHNE et al. 2013). Allerdings besteht ein Zusammenhang zwischen Kronen- und Stammform. GOCKEL (1994 S. 96ff) kann zwieselige, verbuschte und aufgelöste Formen signifikant häufiger mit knickigen als mit geraden Stammformen verknüpfen. Insofern sind trotz der beschriebenen Dynamik Auswirkungen der derzeit erfassten Kronenformen auf die späteren Stammformen nicht völlig auszuschließen. Schlechte Kronenformen werden in der Literatur immer wieder mit Schadeinwirkungen wie Frost oder Insektenfraß mit Verlust der Terminalknospe in Verbindung gebracht (LE TACON 1985, ROLOFF 1986 S. 22, WEINREICH 2000 S. 81ff, KERR & BOSWELL 2001, NINGRE & COLIN 2007, COLIN et al. 2012), wengleich auch eine genetische Beteiligung an Kronenformen durch erbliche Astablaufwinkel angenommen wird (KRAHL-URBAN 1951/53a, KRAHL-URBAN 1951/53b, KRAHL-URBAN 1953, ROLOFF 2001 S. 45f, RAU et al. 2015).

5.2.1.2 Einfluss der Überschirmung

Wie stark ein Buchen-Voranbau vom Fichtenaltbestand überschirmt ist, wirkt sich am deutlichsten von allen hier untersuchten Einflussfaktoren auf die Qualität der Bäumchen aus. Die größten Anteile an gut geformten Exemplaren sind bei intensiver Überschirmungsdichte zu erwarten. Dieses Ergebnis ist sowohl für die deskriptive Häufigkeitsverteilung als auch für das Gesamtmodell und die beiden Einzelmodelle NRW/SAX zutreffend. In den Modellen handelt es sich bei der Überschirmung durchweg um den einzigen signifikanten Einflussfaktor. Folglich wird die Arbeitshypothese 3 uneingeschränkt angenommen.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit deckt sich mit den Resultaten von WEIDIG (2016 S. 121). Seine Untersuchung an Buchenvoranbauten mit und ohne Fichtenschirm ist am besten mit den hier gefundenen Ergebnissen vergleichbar, weil er dieselbe Qualitätsklasseneinteilung benutzt (WEIDIG 2016 S. 112) und mit Buchen im ähnlichen Altersbereich von 13-26 Jahren arbeitet (WEIDIG 2016 S. 30). Der Autor kann in seinem Modell einen noch strafferen Zusammenhang zwischen der Überschirmung und der Qualitätsklassenausprägung herstellen. Das mag u. a. darin begründet liegen, dass in der vorliegenden Arbeit durch die nachträgliche Datenaggregation auf den rechteckigen Kernflächen bestimmte Schirm-Standraum-Kombinationen und damit sehr gute und gute Buchen unterrepräsentiert sind. Außerdem widmet sich der Autor dem Extrem, nämlich

der fehlenden Überschirmung, und stellt diese einer nicht weiter differenzierten Schirmdichte gegenüber. In dieser Arbeit kann ergänzend zu seinen Befunden gezeigt werden, dass auch die Dichte der Überschirmung eine äußerst bedeutende Rolle für die Qualität der Voranbau-Buchen spielt. Dabei ist es wichtig zu rekapitulieren, dass es sich bei fehlender Überschirmung im Sinne dieser Arbeit nicht um Freiflächenbedingungen handelt (LE TACON 1985, NINGRE 1987 S. 30, NINGRE & COLIN 2007, COLIN et al. 2012), sondern eher um Strukturen, die mit mittelgroßen Lücken im Kronendach vergleichbar sind und höchstens von Überhältern unterbrochen werden (vgl. Tab. 3-4 und Abb. 3-4; LÜPKE 1982 S. 22). Ein intensiver Schirm ist hier mit einem geschlossenen Kronendach des Altbestands gleichzusetzen.

In der Literatur sind die Aussagen zu optimalen Überschirmungsdichten in Bezug auf die Form junger Bäume nicht einheitlich. Zum einen wird von der günstigsten Morphologie bei mittleren Überschirmungsverhältnissen berichtet. Dazu zählen große Astansatzwinkel, geringe Grünastdurchmesser, Feinastigkeit, lotrechter Wuchs und geringe Zwieselhäufigkeiten (u.a. KURTH 1946 S. 619, BROWN 1951 und 1952, LÜPKE 1982 S. 68, DUPRÉ et al. 1986, SCHMITT et al. 1995, WEINREICH 2000 S. 139, LINNERT 2009 S. 67f). So findet LÜPKE (1982 S. 67) die größten Anteile an wipfelschäftigen gepflanzten Buchen bei mittleren Überschirmungsverhältnissen und geringere relative Häufigkeiten unter einem Buchenschirm. KURTH (1946 S. 619) beobachtet mit steigendem Beschirmungsgrad, dass die knickigen Exemplare bei mittleren Schirmdichten mit geringsten Anteilen vorkommen. WAGNER & MÜLLER-USING (1997) berichten von Plagiotropie und damit schlechteren Qualitäten vorangebauter Buchen unter Fichte bei steigender Überschirmungsintensität. Schon ab 15% der diffusen Strahlung des Freilandes und weniger häufen sich solche Buchen im Mittel. Bei WEIHS & KLAENE (2000) liegt diese Grenze schon bei 30% der diffusen Strahlung des Freilandes. Es finden sich aber auch Untersuchungen, in denen von den besten Qualitäten hinsichtlich Wipfelschäftigkeit, Verzieselung, Ästigkeit, Krümmung bzw. Verbuschung mit zunehmend dichtem Schirm berichtet wird (BROWN 1952 und 1955, SAGHEB-TALEBI 1996 S. 119ff, Leder & WEIHS 2000, MOREL & PLANCHAIS 2000, HAGEMANN 2005 S. 50ff). Zufriedenstellende forstliche Resultate werden dabei unter Schirmbaumarten mit geringer Beschattungswirkung wie Birke, Esche und Weide (BROWN 1955) bzw. Kiefer (LEDER & WEIHS 2000) erzielt. In die gleiche Richtung weisen die Ergebnisse an einem Strahlungsgradienten unter Buchenschirm an Naturverjüngung

(SAGHEB-TALEBI 1996 S. 31) und Kunstverjüngung (MOREL & PLANCHAIS 2000). Bei LEDER & GUTSCHE (1997) sind die Bestockungsverhältnisse des Altbestandes hinsichtlich der Dichte mit den beiden hier verwendeten Stufen „fehlend“ und „moderat“ dieser Arbeit vergleichbar. Die Autoren zeigen anhand vorangebauter Buchen aus Wildlingen, dass in einer Lücke geringfügig häufiger wipfelschäftige Bäumchen und etwas geringere Anteile an Zwieseln bzw. krummen Exemplaren auftreten als im benachbarten beschirmten Bestandeteil. Das kehrt die Ergebnisse dieser Arbeit sogar um. Allerdings muss bedacht werden, dass bei LEDER & GUTSCHE (1997) beide Flächenteile trotz Verwendung von Großpflanzen von 1,50m einer erheblichen Verbissbelastung unterliegen. Selbst bei Buchen-Freiflächenkulturen, in denen sich mit der Zeit ein Vorwald etabliert, wirkt dieser günstig auf die qualitativen Eigenschaften, indem feinastige Exemplare häufiger vorkommen als solche mit sperrigem Wuchs (LEDER 1992 S. 198f und S. 226f). Auch in unterschiedlich höhendifferenzierten Freiflächenpflanzungen aus Buche zeigt sich, dass bei gegenseitiger Beschattung der Bäumchen erwünschte Kronentypen zunehmen (OTT et al. 2003).

Fehlt ein schützendes Kronendach gänzlich, wirkt sich das auf die Form der jungen Bäume sehr nachteilig aus. Es dominieren grob- und steilastige, zwieselige und verbuschte Exemplare (KURTH 1946 S. 607, 632 und 637, LÜPKE 1982 S. 67, LE TACON 1985, NINGRE 1987 S. 30, SAGHEB-TALEBI 1996 S. 119ff, MOREL & PLANCHAIS 2000, NINGRE & COLIN 2007, WEIDIG 2016 S. 120f).

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass ein Teil der Quellen die Resultate dieser Arbeit stützt. Eine mögliche Erklärung für die verschiedenen Beobachtungen der Autoren mag sein, dass Kronen- und Stammmerkmale anders zu Qualitätsklassen zusammengefasst werden. Wenn WEINREICH (2000 S. 148f) davon berichtet, dass im Schatten vermehrt schlechte Stammformen an Eichen vorkommen und bei guten Strahlungsverhältnissen eher schlechte Kronenformen dominieren, zeigt das die unterschiedliche Reaktion von Einzelmerkmalen. Auch HAGEMANN (2005 S. 50ff) setzt sich intensiv mit unterschiedlich strukturierten Qualitätsindices auseinander. Ihre Ergebnisse weisen zwar inhaltlich in dieselbe Richtung, die gefundenen Zusammenhänge sind jedoch nicht einheitlich stark. Ein wichtiger Aspekt in der vorliegenden Arbeit ist die Frage, inwieweit die Plagiotropie als Wuchsform für die Qualitätsklassen dieser Arbeit überprägend wirkt. Weil sie für die Qualitätstypisierung auf der Fläche nicht mit einbezogen worden ist, verhilft die nachstehende Übersicht zu einem Überblick, zu welchen Anteilen die

horizontal abgegebene Wuchsform in den verschiedenen Kronenformen enthalten ist.

Tabelle 5-1: Übersicht über die Anzahl orthotroper und plagiotroper Buchen nach ihrer Kronenform.

Es handelt sich um räumlich aggregierte Daten (n=619), unrunde Klassenwerte sind abgerundet.

Wuchsform	Kronenform					Gesamt
	wipfelschäftig, monocorm	monocorm, verzweigt, Tendenz zum Zwiesel	steilastig, starkastig	zwieselig	verbuscht, aufgelöst	
orthotrop	4	84	190	219	74	571
plagiotrop	0	3	14	21	10	48
Gesamt	4	87	204	240	84	619
Anteil	0,0%	3,4%	6,9%	8,8%	11,9%	100%

Es zeigt sich, dass plagiotrope Buchen bis auf wipfelschäftige Exemplare alle Kronenformen aufweisen können. Sie sind in den vorhandenen, aggregierten Daten zu 81% bei intensivem Schirm zu finden und stellen insgesamt zehn Prozent der sehr guten und guten Buchen. Ordnete man diese Bäumchen einer unzureichenden Qualität (Klasse vier) zu, schmälerte das den stetig qualitätsverbessernden Effekt eines immer dichter werdenden Fichtenschirms. In einer Proberechnung zeigt sich, dass sich eine intensive Altbestandsüberschirmung nicht mehr signifikant vom fehlenden direkten Kroneneinfluss unterscheidet¹⁵. In der vorliegenden Arbeit interessiert vorrangig, ob sich allein der Verzweigungstyp, manifestiert in Aststärken, Astdichten und Astwinkeln (WEIDIG 2016 S. 121ff) und nicht kombiniert mit der Wuchsform, mit zunehmender Beschattung verändert. Das Merkmal der Wuchsform ist in den Qualitätsmodellen auch nicht als fester Effekt enthalten, weil sich solche Modelle im Rahmen des Modellbildungsprozesses durchgängig als nicht gültig erwiesen und ohne Konvergenz waren. Interessant ist auch, dass sich Bäume mit einer flach ausgerichteten Krone nur auf den jüngsten und mittelalten Flächen mit starker Überschirmung wiederfinden. Die Buchen der sehr weitständig begründeten und lange Zeit stark überschirmten Fläche 23, Altersstufe drei (vgl. Tabelle 2-2), zeichnen sich nicht durch plagiotrope Wuchsformen sondern feingliedrige, breit aufgefächerte Kronen aus. Insofern ist es nicht problematisch,

¹⁵ \widehat{OR} Altbaumnähe: moderat = 0,67, Signifikanz = 0,127 (n.s.) und \widehat{OR} Altbaumnähe: intensiv = 0,59, Signifikanz = 0,06 (n.s.)

dass die Wuchsform nicht in die Berechnung der Ergebnisse einfließt. Das stringente Abrunden halber Klassenwerte hingegen, das durch das Aggregieren der Variablen „Altbaumnähe“ und „Qualität“ mit Hilfe von Medianen vorgenommen worden ist, hat keine Auswirkung auf die hier vorgestellten Ergebnisse. Die Qualitätsklassen „verbessern“ sich bei intensiver Überschirmung im gleichen Maß wie bei den anderen beiden Schirmdichtestufen.

5.2.1.3 Einfluss des Standraums

Aus den Modellergebnissen wird deutlich, dass es einen Effekt der Variable Standraum auf die Qualitätsklasse gibt, wenngleich dieser nicht signifikant ist. Das bestätigt sich einheitlich über das Gesamtmodell für NRW und SAX sowie für die Modelle getrennt nach Bundesland. Der Einfluss besteht darin, dass sich ein vergrößerter Wuchsraum im Voranbau in einer höheren Wahrscheinlichkeit für eine schlecht geformte Buche äußert. Die Arbeitshypothese 2 (Kapitel 1) wird angenommen.

Damit deckt sich das Ergebnis mit den Angaben in der Literatur. KURTH (1946 S. 585) bescheinigt einer Buchen-Pflanzung mit $0,8\text{m}^2$ Standraum pro Einzelpflanze deutlich schlechtere Formeigenschaften in Bezug auf Feinastigkeit und Wipfelschäftigkeit als einer Buchen-Naturverjüngung mit $0,1\text{m}^2$ Standraum je Pflanze. WEIDIG et al. (2015) und WEIDIG (2016 S. 120f) können anhand von Buchen-Voranbauten klar zeigen, dass größerer Dichtstand zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von guten Qualitätstypen führt: der gesamte Wertebereich in der Untersuchung erstreckt sich im Bereich von umgerechnet ca. $0,8$ bis 16m^2 . BOLVANSKÝ (1980/81) findet bei dichter stehenden Buchendickungen einen größeren Anteil gut geformter Individuen. Auch HOUSKOVÁ & MAUER (2013) bescheinigen gepflanzten Buchen größerer Dichte mehr gute Stammformen und geringere Anteile schlechter Bäumchen. Dasselbe finden FALCONE et al. (1986) und FÄLLMAN et al. (2003) für junge Buchen bzw. Birken in Bezug auf zwieselige Exemplare, die bei geringerem Standraum abnehmen. TIEBEL et al. (2016) können nachweisen, dass sich der Qualitätsindex im Randbereich von Buchenvoranbauten verschlechtert. SAHA et al. (2012) kommen bei einer Meta-Analyse zum Schluss, dass die Anteile monopodial gewachsener Eichen bei Trupppflanzungen und klassischen Reihenpflanzungen höher liegen als in Eichen-Nestern. Der Standraum je Eiche liegt in Trupp- und Reihenpflanzung im Rahmen von umgerechnet $0,9$ bis $3,0\text{m}^2$. Bei Nest-Pflanzungen sind das $0,04$ bis $0,09\text{m}^2$

(SAHA et al. 2012). Nest-Pflanzungen zeichnen sich jedoch durch eine sehr hohe Pflanzdichte auf kleinem Raum und geringe Nestgrößen aus (SZYMAŃSKI 1986). Daher haben sie ein ungünstiges Flächen-Randlinienlängenverhältnis im Gegensatz zu ebenfalls räumlich aggregierten Trupppflanzungen (GOCKEL 1994 S. 35ff). Auch GOCKEL (1994 S. 110) zeigt anhand von Simulationen, dass eine höhere Pflanzendichte zu höheren Z-Baum-Häufigkeiten in der Eiche führt. In die gleiche Richtung zielen die Ergebnisse von KUEHNE et al. (2013), die in einem NELDER-Experiment¹⁶ an jungen Stieleichen und Eschen zunehmend schlechtere Kronen- und Stammformen bei steigendem Standraum ermitteln. Auch STRUCK (1999 S. 50) findet einen negativen Zusammenhang zwischen der Konkurrenzstärke und dem Auftreten von Protzen in jungen Eichenbeständen, jedoch nicht für Zwiesel. Diese Beziehung scheint aber nicht für sehr hohe Pflanzendichten zu gelten. Wie LEIBUNDGUT et al. (1976 S. 337) für natürliche Eichendickungen schildern, führt eine sehr hohe Dichte zu „...Stammkrümmungen, Schiefstand und anderen Fehlern.“. Der Standraum im Alter von ca. acht Jahren bewegt sich bei ihnen umgerechnet im Bereich von 0,10 bis 0,17m² (LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 333). Auch bei MOSANDL et al. (1988) finden sich Hinweise in dicht erwachsenen Eichen-Saatbeständen auf einen hohen Anteil von Stammkrümmungen bei Auslesebäumen, angefangen von der Dichtung bis ins schwache Baumholz. Wenn es sich um interspezifische Konkurrenz handelt, bleibt sie im Fall von Eiche und Birke in ihrer Stärke und Wirkung auf die Kronen- und Stammformen hinter der intraspezifischen zurück. Aus den genannten Studien wird einhellig deutlich, dass sich eine enge Pflanzung vorteilhaft auf die Qualität junger Buchenbestände auswirkt. Weil die vorliegende Untersuchung Pflanzbeständen mit gebräuchlichen Verbänden einbezieht, sind die Auswirkungen einer möglicherweise überdichten Bestockung verbunden mit negativen Wirkungen auf die Qualität hier nicht abbildbar.

¹⁶ NELDER (1962) entwickelte vier mathematisch hergeleitete, rationale Versuchsdesigns für Freilandexperimente, die kreis- oder strahlenförmig angeordnet sind und entweder die Flächengröße bei gleicher Flächenform oder die Flächenform bei gleicher Flächengröße für die Pflanzen variieren.

5.2.2 Merkmale zu Wachstum und Qualität

5.2.2.1 Wachstum

Zunächst ist von Interesse, das Wachstum der Buchen in Abhängigkeit von Schirm- und Seitendruck näher zu beleuchten. Höhe und Wurzelhalsdurchmesser verhalten sich gleich in Bezug auf die Überschirmungsintensität. Nimmt sie zu, verringern sich die Höhen und Whds höchstsignifikant, sodass die Arbeitshypothese 1 uneingeschränkt anzunehmen ist. Eine gesteigerte Dichte im Voranbau erzeugt jedoch ein gegenläufiges Verhalten: Die Höhe nimmt höchstsignifikant zu und der Whd höchstsignifikant ab. Insofern ist auch die Arbeitshypothese 2 vollumfänglich anzunehmen. Ältere Buchen sind sowohl signifikant höher und auch dicker, die Arbeitshypothese 3 kann nicht verworfen werden. Diese Gegenläufigkeit von Höhe und Whd äußert sich in steigenden hd -Werten, sobald die Konkurrenz gleich welcher Art zunimmt. Dieses Verhalten ist altersunabhängig. Trotz dass diese Befunde keine neuen Fakten darstellen, sind sie für die vorliegende Arbeit unverzichtbar. Sie geben den Rahmen sowohl im Vergleich mit anderen einschlägigen Veröffentlichungen als auch im Hinblick auf waldbauliche Empfehlungen vor.

Die Ergebnisse zeigen schon vielfach Dokumentiertes: Höhen nehmen mit steigendem Seitendruck zu (LEDER & BODELSCHWINGH 2008, BARBEITO et al. 2014, LINNERT 2009 S. 91, WEIDIG 2016 S. 65), allerdings nur ab einem bestimmten Wert (KESSEL 1994 S. 54) und bis zu einem gewissen Grad (APHALO et al. 1999, STRUCK 1999 S. 29 und 67). Der letztgenannte Autor bescheinigt das jungen Eichenbeständen, die sich in einer knappen Nährstoffsituation befinden. Er folgert, dass es optimale Dichten in Bezug auf Wachstumsparameter gibt (STRUCK 1999 S. 116), die es nicht zu überschreiten gilt. Das ist in den Daten der vorliegenden Untersuchung allerdings nicht der Fall, wie die positive Korrelation zwischen Konkurrenzindex und Höhe ausweist. Schließlich kommen sehr stark in seitlicher Bedrängung lebende Bäume mit gleichzeitig hohem Schirmdruck in den Daten nicht vor, die sich möglicherweise entgegen des hier festgestellten Trends verhalten würden. Dahingehend sind auch die Resultate von NAGEL & RUMPF (2010) zu interpretieren, die bei einem Standraumspektrum von $0,5\text{m}^2$ bis 9m^2 je Baum keinen gerichteten Einfluss des Dichtstandes auf die Höhen 35-jähriger Eichen feststellen. Stammdurchmesser verringern sich ausschließlich bei ansteigender seitlicher Konkurrenz (u. a. KESSEL 1994 S. 54, DUPLAT et al. 1997,

STRUCK 1999 S. 23f und S. 67, UTSCHIG & PRETZSCH 2001, ALCORN et al. 2007, NAGEL & RUMPF 2010, WEIDIG 2016 S. 65) und die Reaktion auf Standraumveränderungen fällt beim Durchmesser sehr stark aus (MITSCHERLICH 1975 S. 227f).

Stärker überschirmte Buchen erleiden Wachstums- und Zuwachsverluste an Höhe und Whd, wenn sie mit solchen unter Freiflächenbedingungen (BROWN 1955, MOREL & PLANCHAIS 2000, WEIDIG 2016 S. 65 und 67) oder unter leichter Überschirmung (u. a. BROWN 1952, DUPRÉ et al. 1986, SCHMITT et al. 1995, SCHIRMER et al. 1999, KÜßNER & FEBEL 2000, LEDER & WEIHS 2000, WEIHS & KLAENE 2000, VOR & LÜPKE 2004, LINNERT 2009 S. 62, PETRIȚAN & LÜPKE 2009, PETRIȚAN et al. 2007, 2009, 2010) verglichen werden. Allerdings tritt die Reaktion des Höhenwachstums im Vergleich zum Durchmesserwachstum auf geänderte Überschirmungsbedingungen sehr verzögert ein (HAUSKELLER-BULLERJAHN 1997 S. 81, WEIDIG 2016 S. 65 und 70). Das können PETRIȚAN et al. (2011) mit Hilfe eines Abtragungsexperimentes zeigen: Der Höhenzuwachs bei jungen Buchen ist erst im zweiten Jahr nach dem Ausschalten der Altholzwurzelkonkurrenz signifikant höher. Ähnlich wie beim Seitendruck wird von optimalen Bedingungen unter mittleren Überschirmungsverhältnissen in Bezug auf die Höhe berichtet (LÜPKE 1987). Dem bisher Gesagten entgegenstehend kommen PRÉVOSTO & CURT (2004) zum Schluss, dass sich die Höhe und der Höhenzuwachs in dichter überschirmten Buchen vergrößern. Das lässt sich damit erklären, dass es sich um die weniger intensiv beschattenden Baumarten Birke und Kiefer und nicht wie hier um Fichte handelt. WEIDIG (2016 S. 70) kann bei jungen Buchen belegen, dass der Radialzuwachs der Schaftachse sehr deutlich und stärker als das Höhenwachstum auf veränderte Überschirmungsbedingungen reagiert. Auch für naturverjüngte Nadelhölzer (WEIHS 1996: Fichte und Douglasie) trifft diese Reaktion von Höhe und Whd zu.

Dieses Verhalten von Höhe und Durchmesser beschert eine zunehmende Instabilität, indem die Bäume immer schlanker werden, je größer die Überschirmung (KURTH 1946 S. 615, KESSEL 1994 S. 34, MOREL & PLANCHAIS 2000, WEIHS & KLAENE 2000, PRÉVOSTO & CURT 2004, LINNERT 2009 S. 63, PETRIȚAN et al. 2009, WEIDIG 2016 S. 65) und je intensiver der Seitendruck (KURTH 1946 S. 616, STRUCK 1999 S. 30, LEDER & BODELSCHWINGH 2008, NAGEL & RUMPF 2010, WEIDIG 2016 S. 65) ausfallen. Das liegt daran, dass bei seitlicher Einengung durch Nachbarn zuerst das Durchmesserwachstum und später, bei weiter ansteigenden

Konkurrenzwerten, das Höhenwachstum reduziert wird (MITSCHERLICH 1970 S. 71). Folglich spiegelt sich diese Reaktion des Baumes in ansteigenden hd -Werten wider.

Ältere Buchen sind höher und dicker als jüngere unter vergleichbaren Bedingungen, was Teil der in der Waldwachstumskunde beschriebenen Wachstumsgesetze ist (z. B. WENK et al. 1990 S. 29f), wenn sich auch die Steigerungsrate, der Zuwachs, anders verhält. Interessant sind Beobachtungen von Autoren, die über die Zeit hinweg zeigen können, dass sich fortschreitendes Wachstum in anfangs gleichförmigen, jungen Beständen in einer zunehmenden Höhendifferenzierung des Gesamtkollektivs äußert (LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 331, FISCHER 1998 S. 129). Die ablaufenden Prozesse sind damit Ausdruck eines gleichgerichteten und kombinierten Einflusses von Seitendruck und Alter, was sich mit größeren Streuungen in den Durchmesser bei FISCHER (1998 S. 132) ähnlich wie in der vorliegenden Untersuchung äußert. WEIDIG (2016 S. 65) kann das anhand signifikanter Wechselwirkungen zwischen dem Entwicklungsstadium und der Pflanzenzahl für den Whd junger Buchen belegen. Gewisserweise gilt das auch für das hier gemessene Kollektiv an wüchsigen Buchen der oberen soziologischen Schichten, welches sich unter verschiedenem Schirmdruck behaupten muss (NINGRE 1987 S. 7ff). Die hier festgestellte Altersunabhängigkeit der hd -Verhältnisse ist auch bei FISCHER (1998 S. 135f) vorzufinden. Das ist bei KURTH (1946 S. 613) und PRÉVOSTO & CURT (2004) nicht der Fall – ältere Bäume sind dort zunehmend stabiler. Die Bäume in der erstgenannten Studie sind großteils zumindest eine Zeitlang beschirmt gewesen, in der zweiten Studie ist die vergleichsweise geringere Konkurrenzkraft der Schirmbaumarten Birke und Kiefer für das gegenläufige Ergebnis verantwortlich. Auch MOSANDL et al. (1988) finden an jungen Eichen verschiedener Wuchsstadien sinkende hd -Verhältnisse mit höherem Alter. Bei GOCKEL (1994 S. 72) deutet sich die Tendenz an, dass das Höhenwachstum auch von der Kronenform an sich mitbestimmt wird – je weniger monocorm die Bäume wachsen, desto geringer ist ihr Höhenzuwachs. Das wirkt sich auch auf das hd -Verhältnis aus, welches mit zunehmender Verbuschung und Kronenauflösung absinkt (GOCKEL 1994 S. 74).

5.2.2.2 Ästigkeit

Grünast-Dimensionen

Die Ästigkeit ist ein bedeutendes Qualitätskriterium für zu verwertendes Holz (SCHULZ 1961a S. 23f, SCHULZ 1961b, KATÓ & MÜLDER 1978 S. 82ff, BÄUCKER et al. 2007, BÄUCKER & BUES 2009). Von starken grünen Ästen reinigt sich die Buche als Totastverlierer (RICHTER 2010 S. 69) schlechter als von dünnen, sodass in der Folge ein groß dimensionierter asthaltiger Kern die Ausbeute an astfreiem Holz stark schmälert (LEDER & HANKE 2005). Das bedeutet auch, dass Tot- und Faulastbereiche am Stamm häufiger vorkommen (SCHULZ 1961a S. 23). Während des langen Absterbevorgangs ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass die Schutzschicht zwischen totem und lebendem Gewebe von Fäulen durchstoßen wird, sodass sich der rückliegende Gesundastbereich verfärbt und zersetzt (SCHULZ 1961a S. 23f, AUFSESS 1975). Außerdem ist bei spät absterbenden Ästen diese Schutzschicht nur in geringerem Maße ausgebildet, sodass es durchaus zum Eindringen von Stammfäuleerregern kommen kann (AUFSESS 1975). Des Weiteren wird davon berichtet, dass Buchen mit einer größeren Ästigkeit auch häufiger gekrümmt sind (KATÓ & MÜLDER 1978 S. 72, vgl. Abschnitt 5.2.2.4 „*Stammneigung, Krümmhaftigkeit und Ausmaß der Krümmung*“).

Dass die dicksten Grünastdurchmesser eines Stammes, wenn sie vergleichsweise stark ausfallen, auch Ausdruck einer exponentiell gesteigerten Beastungsdichte sind (FISCHER 1998 S. 139, WEINREICH 2000 S. 124), macht das Problem starker Grünäste noch brisanter. Die Modelle zu den stärksten Grünastdurchmessern zeigen entlang des Stammes gleiche Tendenzen. Die Buchen haben einen signifikant niedrigeren Astdurchmesser, je mehr sie durch einen Oberstand beschattet werden. Am deutlichsten ist dieser Trend für den obersten Schaftabschnitt ausgeprägt, um sich dann im weiteren Verlauf des Schaftes in Richtung Boden sukzessive abzuschwächen. Die Äste im tiefen Schatten sind zwar absolut dünner, aber relativ zum Stammdurchmesser gesehen die dicksten, sodass der Baum starkästiger wirkt. Insofern wäre der Einfluss des Schirms auf die Feinästigkeit zunächst als negativ anzunehmen, was durch die absolut niedrigeren Durchmesser wieder nivelliert wird. Daher wird die Arbeitshypothese 1 (Kapitel 1) uneingeschränkt angenommen. Von der positiven Wirkung eines Schirmes auf die Grünaststärken berichten WEIHS (1996) an naturverjüngten Douglasien und Fichten, HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997 S. 99ff) und WEINREICH (2000 S. 101) an jungen Eichen, KÜßNER & FEBEL (2000), MOREL & PLANCHAIS

(2000), CAO (2001) sowie LINNERT (2009 S. 68), PETRIȚAN et al. (2010) und WEIDIG (2016 S. 92) an jungen Buchen. Andere Studien greifen das Thema indirekt auf, indem sie sich der Astbiomasse oder deren Anteil an der Gesamtbiomasse widmen. Niedrigere Astbiomassen bei Beschattung findet AMMER (2003) an jungen, künstlich beschatteten Buchen vor. Im Verhältnis zur Gesamt- bzw. oberirdischen Biomasse kann eine Überschirmung die Astbiomasse sowohl ansteigen (SCHALL et al. 2012) oder auch unverändert lassen (CURT et al. 2005). Dass sich der Effekt der Überschirmung besonders im obersten Schaftabschnitt äußert, stellen KÜßNER & FEBEL (2000) nicht fest – die Astansatzhöhe des stärksten Grünastes reagiert nicht auf unterschiedliche Überschirmung. Möglicherweise liegt das bei ihnen an den recht kleinen Buchen mit Höhen bis ca. 2,5m, die nur zum Teil mit ihren Kronen ineinandergreifen. In der vorliegenden Arbeit kann die Variation mit der Schafthöhe und dem starken Einfluss des Schirms im obersten Abschnitt am geringeren Probandenkollektiv verglichen mit den anderen beiden Stammbereichen liegen. Andererseits kreuzt das Ergebnis das Thema der Divergenz zwischen zurückliegender, auf die vorgefundenen Aststärken wirksame Konkurrenzstärke und dem Wettbewerbsdruck, der zum Aufnahmezeitpunkt herrscht (BURTON 1993). Die Wirkung des Altbestandes auf die Astdurchmesser ändert sich durch das Wachstum der Buchen selbst, weil sie durch auftretenden Seitendruck und Selbstbeschattung stärker modifiziert wird, je weiter unten man den Stamm betrachtet. Das ist auch ein Grund dafür, weswegen in tieferen Schaftabschnitten die Streuungen in den Daten zunehmen. Hinsichtlich des Durchmesserverhältnis‘ zwischen dem stärksten Grünast und dem Stamm in Höhe des Wurzelhalses kann anhand des Modells nicht die Rede davon sein, dass eine geringe Überschirmung die Starkastigkeit überproportional fördert, wie es KURTH (1946 S. 634f) an unterschiedlich dicht beschirmten Buchen, HAGEMANN et al. (2013) an Buchen in Bestandeslücken und WEIDIG (2016 S. 92) bei jungen Voranbau-Buchen feststellen. Dagegen stützen die Ergebnisse von LINNERT (2009 S. 65) die hier gemachten Beobachtungen: Der Autor kann bei dichterem Fichtenüberschirmung an jungen Buchen mehr relativ starke Äste ausmachen als bei mittleren Schirmdichten, wenngleich er auch für die eigentlichen relativen Grünastdurchmesser keine Korrelation mit der Überschirmung finden kann (LINNERT 2009 S. 67). Auch bei BONOSI (2006 S. 83) fehlt dieser Zusammenhang. Wie bereits in Abschnitt 4.2.2.1 geschildert ist, sind in dieser Arbeit für die sehr hohen ASIX-Werte bei hohem Schirmdruck Buchen verantwortlich, die nicht

nennenswertem Seitendruck ausgesetzt sind und eine geringe Höhe im Verhältnis zum Gesamtkollektiv der Buchen aufweisen. Es handelt sich vorwiegend um die jüngsten Bäume. Um die Schirmwirkung genauer zu beleuchten, müssen dem Modell aus Abschnitt 4.2.2.1 zum ASIX-Wert für den stärksten Grünast je Baum drei Teilmodelle gegenübergestellt werden. Diese Modelle trennen die Daten anhand der Astansatzhöhe des stärksten Grünastes. Die Modellergebnisse sind der nachstehenden Übersicht zu entnehmen. Sie unterliegen den gleichen Berechnungs-, Prüfungs- und Modellauswahlmechanismen (vgl. Abschnitt 3.2.6) wie alle im Abschnitt 4.2 präsentierten Modelle.

Tabelle 5-2: Übersicht der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den ASIX des stärksten Grünastes getrennt für die Schaftabschnitte 1 bis 3.

In den Übersichten Angabe der geschätzten Werte mit Standardfehler SE, Freiheitsgraden DF, t-Werten, p-Werten (Signifikanz), VIF-Werten, Anzahl Beobachtungen und der geschätzten Standardabweichungen über die Stufen des Zufallseffekts und der Reststreuung

Variable (Schaftabschnitt 1)	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	2,903	8,604	139	0,337	0,736	
Schirmdruck: log10(Hegyi-Index)	20,352	2,786	139	7,306	0,000***	1,433
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	-3,878	1,137	139	-3,411	0,001***	1,241
Alter	0,395	0,326	14	1,214	0,2448	1,247
Astansatzhöhe	Schätzer entfällt da Astansatzhöhe auf 0,10m bis 1,50m begrenzt ist.					
Variable (Schaftabschnitt 2)	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	42,761	6,743	61	6,342	0,000***	
Schirmdruck: Grundfläche	0,044	0,107	61	0,410	0,683	1,326
Seitendruck: Standraum	0,502	0,963	61	0,521	0,604	1,079
Höhe	-1,690	0,677	61	-2,497	0,0153*	1,326
Astansatzhöhe	Schätzer entfällt da Astansatzhöhe auf 1,51m bis 3,00m begrenzt ist.					
Variable (Schaftabschnitt 3)	Schätzwert	SE	DF	t-Wert	p-Wert	VIF
Interzept	45,877	8,163	27	5,620	0,000***	
Schirmdruck: Hegyi-Index	-0,127	0,090	27	-1,418	0,168	1,503
Seitendruck: Hegyi-Index (Suchradius)	-1,180	1,253	27	-0,942	0,3546	1,010
Alter	-0,528	0,381	7	-1,385	0,209	1,490
Astansatzhöhe	Schätzer entfällt da Astansatzhöhe auf 3,01m bis 4,50m begrenzt ist.					

Bedeutend an diesen Ergebnissen ist das Vorzeichen des Schirmdrucks. Liegt der stärkste Ast in den unteren 1,5m des Stammes, sind alle kleinen Buchen in den Daten enthalten und überproportional vertreten. Der überaus hohe Schätzbetrag des logarithmierten 'Überschirmungsdichte-Index' ist positiv, höchstsignifikant und verstärkt die im Gesamtmodell gemachte Beobachtung, dass mit steigender Altbestands-Dichte die Bäume starkastiger werden. Liegt der stärkste Ast dagegen

zwischen 1,50m und 2,99m Höhe am Stamm, ist der Schätzer für die Altbestandsgrundfläche immer noch positiv, aber nur von geringem Betrag und mit sehr hohen Streuungen belegt. Sobald sich der stärkste Ast ab einer Höhe von 3,00m befindet, bescheinigt ein verstärkter Schirmdruck zunehmendere Feinästigkeit und sinkende ASIX-Werte. Selbst wenn der Schätzer nicht signifikant ist handelt es sich um einen akzeptablen Standardfehler, der diesen Trend unterstreicht. Insofern bestätigt das die Ergebnisse von HAGEMANN et al. (2013) und WEIDIG (2016 S. 92), wenngleich der Zusammenhang in der erstgenannten Studie von großen Streuungen überprägt ist. Die Analogie zu WEIDIG (ebd.) ist hoch, weil der Autor sowohl zwischen Pflanzenzahl im Voranbau und Überschildung eine Wechselwirkung in sein Modell einbeziehen kann als auch das Entwicklungsstadium bezüglich des Dichtschlusses. Die Wechselwirkung ist in der vorliegenden Arbeit wegen zu großer Multikollinearität nicht in das Modell einbezogen.

Das Ergebnis dieser Arbeit, dass mit steigendem Seitendruck die Grünastdurchmesser signifikant in allen drei Schaftabschnitten abnehmen und auch relativ zum Stammdurchmesser gesehen hochsignifikant dünner sind, führt zur Annahme der Arbeitshypothese 2. In der Gesamtheit deckt sich das mit den Angaben in der Literatur. So finden MOSANDL et al. (1988), MOSANDL et al. (1991), STRUCK (1999 S. 49), ROCK (2004), KÜSTER (2000 S. 118ff), OTTO et al. (2009) und PETERSEN et al. (2009) an jungen Eichen niedrigere Grünastdurchmesser mit höherer Pflanzendichte bzw. seitlichem Konkurrenzdruck vor, BUES (1990 S. 32ff) kommt zum selben Ergebnis in einem Fichtenverbandsversuch, MÄKINEN & HEIN (2006) an 16m hohen Fichten, WELLER & SPELLMANN (2014) in einem Douglasien-Standraumversuch, FÄLLMAN et al. (2003) an einem Birkenjungwuchs, FAHLVIK et al. (2005) an jungen Kiefern und TIEBEL et al. (2016) sowie WEIDIG (2016 S. 92) bestätigen das für vorangebaute Buchen. LEDER & WEIHS (2000) sowie MUHLE & KAPPICH (1979) können das an Buchen nicht belegen, desgleichen SCHMALTZ et al. (1997) an Eichen. Möglicherweise sind in der zweiten Studie aus dem Rahmen fallende Herkünfte dafür verantwortlich. Weil Astdurchmesser und Astlänge straff miteinander korrelieren (FABRICIUS 1929, NUTTO 1999 S. 81, KÜßNER & FEBEL 2000, LANGSHAUSEN 2009 S. 141, STORCH/SCHULER 2011 S. 99ff), können auch Ergebnisse, die unterschiedliche Reihen- und Gassenabstände von Pflanzverbänden miteinander vergleichen, die hier gefundenen Zusammenhänge mit dem Grünastdurchmesser stützen. Äste, die sich in die Gassen orientieren,

sind dicker als Reihenäste BUES (1990 S.32ff), wobei dieser Effekt verschwindet, wenn die Gassen sehr breit werden. DUPLAT et al. (1997) können zeigen, dass sich die Äste in Eichendickungen bevorzugt in Richtung der 2m breiten Arbeitsgasse orientieren. STRUCK (1999 S. 54f) dagegen kann Astlängen und Verbandsunterschiede nicht klar in Zusammenhang miteinander bringen. Möglicherweise sind dort die teils inhomogenen Konkurrenzverhältnisse in den Flächen und die nicht gemessene Astansatzhöhe eine Begründung. Immer wieder ist auch Phototropismus mit bevorzugten Wuchsrichtungen von Ästen in südliche oder südwestliche Richtung zu beobachten (BUES 1990 S. 27, PREUHLER & STÖGBAUER 1990, GUERICKE 2001 S. 48). Für den ASIX-Wert junger Buchen findet WEIDIG (2016 S. 92), dass Starkastigkeit in gewisser Weise durch eintretenden Dichtungsschluss abgemildert wird. Bei LINNERT (2009 S. 93) und HOUŠKOVÁ & MAUER (2013) ist derselbe Zusammenhang für die relativ stärksten Äste mit der Konkurrenz innerhalb junger Buchen nachzulesen und ROCK (2004) kommt zum analogen Schluss an Eichen in unterschiedlichen Positionen eines Trupps bei der gleichnamigen Pflanzung. Diese Befunde verweisen auf den generellen Zusammenhang zwischen erhöhtem Standraum und größerem Wurzelhalsdurchmesser, wie er beispielsweise von SPIECKER (1991 S. 39ff), KÜSTER (2000 S. 88ff) und FÄLLMAN et al. (2003) beschrieben wird. Es bedeutet nichts anderes, als dass wüchsigeren Bäume auch starkastiger sind. In der vorliegenden Arbeit wird beobachtet, dass die Grünastdurchmesser stärker vom Seitendruck beeinflusst werden, je höher sie sich am Stamm befinden. Diese Aussage ist dann möglich, wenn für den mittleren Schaftabschnitt das baugleiche Modell¹⁷ mit demselben Konkurrenzindex zum Vergleich mit den anderen beiden Abschnitten herangezogen wird. Damit spiegelt sich das Verhalten der jungen, noch nicht in Dichtschluss befindlichen Bäume wider, die die hohen Streuungen in den ersten anderthalb Stammmetern hervorrufen. Dagegen ist der starke Zusammenhang im dritten Schaftabschnitt davon verursacht, dass sich der stärkste Grünast relativ gesehen im gleichen Kronenabschnitt befindet. Dass folgern auch MOSANDL et al. (1988) bei jungen, dicht gesäten Eichen. Bewegt man sich im gleichen Wuchsstadium der Bäume, so zeigt sich, dass stärkere Grünastdurchmesser höher im Baum ansetzen je mehr sich der Seitendruck steigert (LEDER & WEIHS

¹⁷ geschätzter maximaler Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 1,5-3,0m = $49,6(10,5)^{***}$ Interzept_{ij} - $18,3(3,9)$ * $\log_{10}(\text{Hegy-Schirm})_{ij}^{***}$ - $1,9(0,5)$ * Hegyi-Suchkegel<sub>ij}^{***} + $0,6(0,9)$ * Höhe<sub>ij}^{ns} + u_i * Bundesland + u_{ij} * Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland + ε_{ijk}
Angabe der Standardfehler in Klammern, Signifikanzen mit Sternsymbolik bzw. ns, VIF-Werte alle unter drei.</sub></sub>

2000, ALCORN et al. 2007). Diese Variation entlang der Schaftachse macht das Problem sichtbar, dass es sich bei Konkurrenz keinesfalls um einen statischen Zustand, sondern um einen dynamischen Prozess handelt (WELDEN & SLAUSON 1986). Bei der Durchmesser-Relation zwischen Ast und Whd kehrt sich dieser nach Stammabschnitten gestaffelte Effekt um: Nur im untersten Abschnitt kann man davon ausgehen, dass ein verstärkter Seitendruck Starkastigkeit signifikant reduziert (vgl. Tabelle 5-2, ALCORN et al. 2007). Das liegt daran, dass die Korrelation zwischen Whd und Astdurchmesser mit steigender Astansatzhöhe geringer wird. BARBEITO et al. (2014) zeigen das an ihrem Grünast-Durchmessermodell, in dem sie den Stammdurchmesser an der Astbasis und das Alter der jeweiligen Wachstumseinheit einbeziehen. Es handelt sich dabei um eine Beziehungen zwischen Retrospektivitätsgrad der Messgröße und Lokalisation des Astes innerhalb der Krone. Im Prinzip bestätigt das die negative Korrelation aus Astansatzhöhe und ASIX-Wert im Modell für alle Schaftabschnitte. Die hier vorgestellten Ergebnisse lassen auch eine Wechselwirkung aus Schirm- und Seitendruck vermuten, wie sie bei WEIDIG (2016 S. 92) herausgestellt und in Verbindung mit dem Schirmdruck im vorigen Absatz diskutiert wird. Daraus lässt sich ableiten, dass ein gewisser Mindest-Seitendruck herrschen muss, um die absoluten Astdurchmesser nicht zu stark ansteigen zu lassen, wenn die Überschirmungsdichte nur geringfügig ist. Den Ergebnissen anderer Studien zufolge gibt es für die Grünastdurchmesser optimale Dichten, was bedeutet, dass sich ab einem gewissen Standraum die Grünaststärken nicht mehr nennenswert verringern, selbst wenn sich dieser verkleinert. Davon berichten ALCORN et al. (2007), bei denen sich junge Eukalypten mit einer Dichte von 1.667 Stck/ha in den mittleren Grünaststärken nicht von solchen Bäumen unterscheiden, die mit 3.333 Stck./ha begründet worden sind. Auch bei FAHLVIK et al. (2005) ist von einem Sättigungspunkt in der Dichte-Astdurchmesserbeziehung die Rede. LINNERT (2009 S. 93) findet dagegen an vorangebauten Buchen, dass steigender Seitendruck ab einem gewissen Punkt die Anzahl relativ zum Stamm dicker Äste sprunghaft reduziert. Solche Sättigungspunkte werden in den vorliegenden Modellen zur Grünaststärke und zum Aststärkenindex ASIX durch den linearen Trend nicht abgebildet.

Der Zusammenhang zwischen Alter (Standzeit) des Baumes bzw. seiner Höhe und dem stärksten Grünastdurchmesser in den Schaftabschnitten ist ein biologisch plausibler Befund, der auf den Allometrien¹⁸ zwischen Whd und Höhe bzw. zwischen Whd bzw. Bhd und Astdurchmesser (FISCHER 1998 S. 136f, STORCH/SCHULER 2011 S. 104ff) beruht. Das führt zur Annahme der Arbeitshypothese 3 in Kapitel 1. Empirisch belegt ist der Alters-Astdurchmesser-Zusammenhang an jungen Eichen von FISCHER (1998 S. 136). Bei den relativen Aststärken ist es dagegen ohne Belang, wie alt der Baum ist, weil hier die Allometrie bereits in der unabhängigen Variablen ASIX enthalten ist.

Grünast-Winkel und Grünast-Dimensionen

Hinsichtlich der Winkel, mit denen die Äste ansetzen, werden in der vorliegenden Arbeit mehrere Aspekte beleuchtet. Allen hier ausgewerteten Winkeln ist gemeinsam, dass keine Zwiesel zugrunde liegen. Zunächst handelt es sich um den stärksten Grünast aus einem der drei Schaftabschnitte, der mit dem kleinsten Winkel am Stamm ansetzt. Äste mit kleinen minimalen Winkeln sind qualitativ als besonders negativ zu beurteilen, weil der Astdurchmesserzuwachs dort größer ausfällt wie an Ästen mit größeren Ansatzwinkeln (GOCKEL 1994 S. 77f, NUTTO 1999 S. 84f, HEIN 2008, KINT et al. 2010). Mit dem HAGEMANN-Index (Abschnitt 4.2.2.2) lässt sich beurteilen, inwieweit es sich beim stärksten Grünast je Baum um einen dicken oder dünnen Ast mit kleinem oder großem Astansatzwinkel handelt. Steile, starke Äste werden als Ausschnitt aus dem Spektrum des HAGEMANN-Index' separat betrachtet, weil sie forstwirtschaftlich sehr unerwünscht sind. Die bereits im vorigen Abschnitt beschriebenen Nachteile in Bezug auf die Ausbeute astfreien Holzes und die Prädisposition gegenüber holzzeretzenden Pilzen sind bei steilen und damit starken Ästen besonders gravierend (AUFSESS 1975, LEDER & HANKE 2005, RICHTER 2010 S. 80).

Die Modellergebnisse sagen aus, dass eine höhere Überschildungsdichte des Altbestandes größere Astansatzwinkel und simultan dünnere Äste produziert. Diese Beziehungen sind mindestens signifikant. Für diesen Aspekt ist die Arbeitshypothese 1 (Kapitel 1) anzunehmen. Wie stark die Beschattung durch den

¹⁸ WENK et al. (1990 S. 101) beschreibt Allometrie zwischen zwei Wachstumsgrößen so, dass das Verhältnis ihrer relativen Wachstumsgeschwindigkeiten konstant ist. Liegt es bei gleichen Einheiten der Wachstumsgrößen über Eins, handelt es sich um positive Allometrie, liegt es unter Eins um negative. Ist sie gleich Eins, spricht man den Autoren zufolge von Isometrie.

Oberstand ist, wirkt sich dagegen nicht darauf aus, ob starke Steiläste wahrscheinlicher sind. Daher bestätigt sich für dieses Merkmal die Arbeitshypothese 1 nicht. In der Literatur ziehen etliche Autoren das Fazit, dass Modelle für den Astwinkel ohne einen expliziten Faktor für die Umgebungs- bzw. Konkurrenzbedingungen mit hohen Streuungen behaftet sind (HEIN 2008, LANGSHAUSEN 2009 S.142ff, STORCH/SCHULER 2011 S. 126ff). Aber auch dann, wenn die Schirmdichte den Astwinkeln der stärksten Seitenzweige junger Buchen gegenübergestellt wird, ist nicht immer ein Zusammenhang feststellbar (LEDER & WEIHS 2000). Das Astwinkel-Modell ist auch in der vorliegenden Untersuchung von einer großen Variabilität der Schätzer gekennzeichnet. Das Ergebnis, dass mit steigendem Schirmdruck die minimalen Astwinkel zunehmen und damit waagerechter am Stamm ansetzen, wird ebenso von KURTH (1946 S. 628 und 632), BROWN (1951), CANHAM (1988), PRÉVOSTO & CURT (2004) und WEIDIG (2016 S. 92) an jungen Buchen und von WEINREICH (2000 S. 139) an jungen Eichen konstatiert. Dass eine Überschirmung simultan positiv auf Astwinkel und Astdurchmesser wirkt, ist gleichlautend zu den hier gefundenen Ergebnissen auch bei HAGEMANN (2005 S. 45f) an natürlich verjüngten Buchen in einem nordamerikanischen Laubmischbestand der Fall. Aus dem hier vorgestellten Modell ist abzulesen, dass dieser positive Schirmeffekt bereits bei mittleren Altbestandesdichten eintritt. Anders als es in der Literatur berichtet wird (MOREL & PLANCHAIS 2000, WEINREICH 2000 S. 107, WEIDIG 2016 S. 92), zeigt sich die Steilastwahrscheinlichkeit in der vorliegenden Arbeit unbeeinflusst von der Oberstandsbeschattung. Für diese Abweichung sind die Steiläste im tiefen Schatten verantwortlich. Anscheinend ist der Strahlungsentzug im Vergleich zu den anderen Arbeiten so groß, dass die morphologische Ausprägung einer bereits aufgelösten Krone mit erfasst wird, die zwangsläufig auch kleine Astwinkel beinhaltet (KURTH 1946 S. 628). Das wird von der Studie von CAO (2001) in gewisser Weise gestützt. Wenngleich in dessen Arbeit das Strahlungsspektrum den Schattenbereich abdeckt, so zeigt sich doch bei mittleren Überschirmungsdichten, dass die Astwinkel im tiefen Schatten wieder kleiner werden. Die Steiläste in sind der vorliegenden Arbeit bezogen auf den ganzen Baum aufgenommen worden, allerdings ohne die Ansatzhöhe, sodass diese fehlende Variable auch als mögliche Streuungsquelle in Betracht zu ziehen ist. Darüber hinaus kann der Steilast an sich eine Reaktion des Baumes darstellen, entweder mehr Blattfläche am Strahlungsgenuss der Lichtkrone teilhaben zu lassen (KINT et al. 2010) oder die Blätter verstärkt verteilen zu können, um niedrige

Strahlungsmengen auszunutzen. In diesem Fall geht der geneigte Wuchs des Baumes, die Plagiotropie, damit einher. Diese ist nicht Teil der berechneten Modelle.

Wie die vorgestellten Ergebnisse zu den Astwinkeln belegen, wirkt sich ein hoher Konkurrenzdruck im Voranbau positiv auf die Astmorphologie aus. Sowohl steile Äste sind weniger wahrscheinlich, die Astwinkel nehmen zu und die Astdurchmesser simultan ab. Die junge Buche zeigt eine erwünschte Morphologie mit feinen, waagrecht abgehenden Ästen. Für diese Merkmale bestätigt sich die Arbeitshypothese 2 aus Kapitel 1. In ein solches Bild passen allerdings nicht die Ergebnisse zum minimalen Astwinkel, in dessen zugehörigem Modell der Seitendruck keinen Erklärungsbeitrag liefert. Daher kann die Arbeitshypothese 2 in diesem Fall nicht angenommen werden. Das mag daran liegen, dass der aktuell herrschende Seitendruck weniger im Standraum der Buche, sondern eher in der Astansatzhöhe verborgen ist. Dass Äste im oberen Kronenbereich steiler sind, ist mehrfach belegt (u. a. KURTH 1946 S. 631, CAO 2001, ALCORN et al. 2007, BARBEITO et al. 2014, LANGSHAUSEN 2009 S. 142ff, KINT et al. 2010, STORCH/SCHULER 2011 S. 126ff). Eine schwache Tendenz größer werdender Winkel bei zunehmendem Wettbewerb im Voranbau offenbart ein alternatives Modell, in dem die Astansatzhöhe nicht einbezogen wird¹⁹. Trotzdem wohnt diesem noch eine große Variabilität inne. Studien, die einen klaren positiven Zusammenhang zwischen der Dichte der Bäume und dem Astansatzwinkel herstellen können, sind diejenige von KURTH (1946 S. 633), BARBEITO et al. (2014) und WEIDIG (2016 S. 92). Ein möglicher Grund ist der, dass die vorgenannten Autoren Mittelwerte aus mehreren Ästen verwenden. LEDER & WEIHS (2000) sowie HEIN et al. (2008) finden dagegen keine Korrelation zwischen Astwinkel und Schirmdichte und ALCORN et al. (2007) berichten bis zu einem gewissen Punkt sogar von steileren Winkeln und gesteigerter Steilastanzahl, je dichter junge Eukalypten stehen. STRUCK (1999 S. 53) findet an Eichen in weiten Pflanzverbänden sowohl häufiger steile als auch öfters waagrechte Äste vor. Diese scheinbaren Widersprüche lösen sich möglicherweise in verschiedenen Astansatzhöhen auf. Eine Begründung für die hohe Variabilität in den Astwinkeln sind möglicherweise Faktoren, die nicht im Modell integriert sind. So berichten KINT et al. (2010) davon, dass auch der

¹⁹ bestes Alternativ-Modell für den geschätzten kleinsten Astansatzwinkel [°] = 13,2(10,6)^{ns} Interzept_{ij} + 14,1(3,8) * Hegyi Schirm_{ij}^{***} + 2,7(1,9) * Hegyi-Suchradius_{ij}^{ns} + 0,6(0,3) * Alter_{ij}^{ns} + u_i*Bundesland + u_{ij}*Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland + ε_{ijk}
Angabe der Standardfehler in Klammern, Signifikanz mit Sternsymbolik bzw. ns, VIF-Werte alle unter drei.

horizontale Astabgangswinkel eine Rolle spielt. Nördlich ausgerichtete Äste sind demzufolge per se steiler. Insgesamt gesehen sind forstwirtschaftlich unerwünschte steile Äste durch eine hohe Dichte im Voranbau vermeidbar. Offenbar macht eine solche morphologische Anpassung keinen Sinn, weil die Blattmasse eines steilen Astes sich permanent in der leistungsfähigen Kronenperipherie des Nachbarn befindet. Ein waagrecht abgehender Ast hat dagegen die Möglichkeit, seine Blattmasse schnell aus dieser Kampfzone herauszuverlagern.

Dass sich die Astwinkel mit dem Alter ändern und sich vergrößern (MÄKINEN 1996), findet seinen Ausdruck in den Tendenzen, die aus den Modellschätzern für den minimalen Astwinkel und den HAGEMANN-Index ableitbar sind. Die Arbeitshypothese 3 bestätigt sich aus diesem Grund. Demgegenüber stellt KURTH (1946 S. 629) für mittlere Astwinkel in Buchendickungen das Gegenteil fest. HEIN (2008) verdeutlicht wiederum, dass dieses Absinken nicht für steile, starke Äste zutrifft, die ihren Winkel im Laufe der Entwicklung kaum verändern. Sie können folglich nur über eine gezielte Steuerung des Konkurrenzgefüges im Voranbau vermieden werden.

5.2.2.3 Astreinigung

Grünastfreier Schaft und Astdichte

Eine überaus bedeutende Rolle im Hinblick auf die Holzqualität nimmt die Astreinigung ein (SCHULZ 1961a S. 23, SPIECKER 1991 S. 14f, SPIECKER 2007, HEIN 2004 S. 11). Ist sie verzögert, wirkt sich das sehr negativ auf die spätere Qualität und/oder die Produktionszeit aus. An sich ist das astfreie Stammstück kürzer, worauf im Extremfall grobastige Abschnitte folgen. Außerdem ist das Risiko fauler Äste und damit von Stammfäule gegeben (AUFSESS 1975, LEDER & HANKE 2005). Speziell bei der Buche steigt dann auch das Risiko, dass sie rotkernig wird (WERNSDÖRFER et al. 2005a, WERNSDÖRFER et al. 2005b, LANGSHAUSEN 2009 S. 22ff). Trotz größtenteils gleichen Verwendungsmöglichkeiten wie bei weißem Buchenholz (HAPLA & MILITZ 2008) zieht ein solcher Rot- bzw. Spritzkern Preisabschläge nach sich (DFWR, DHWR 2015 S. 24). Die Ergebnisse dieser Arbeit greifen dieses Thema auf, indem sie Aussagen liefern, wie der grünastfreie Schaft und die Astdichten mit dem Schirm- und Seitendruck variieren. Wenn im untersten Schaftabschnitt entweder keine Äste oder nur Totäste vorhanden sind, dieser also grünastgereinigt ist, nimmt der neu entwickelte Ästigkeitsindex Werte

von Null bzw. kleiner als zehn an. Insofern haben die Modellergebnisse zu grünastfreiem Schaft und Astdichte eine gemeinsame Schnittmenge.

Bezüglich der Altbestandswirkung unterscheiden sich die beiden Modellgruppen deutlich. Während die Schirmdichte keinen Einfluss auf den Schaftanteil ohne grüne Äste hat, ist der Zusammenhang mit dem Verhältnis von grünen zu toten Ästen bzw. der Astanzahl positiv und höchstsignifikant. Daher kann die Arbeitshypothese 1 nur eingeschränkt angenommen werden. Eine stärkere Beschattung führt also dazu, dass mehr Äste vorhanden sind und dazu, dass die Anzahl an lebenden Ästen stark zunimmt. DIACI & KOZJEK (2005) kommen in natürlichen Buchendickungen bei höherer Beschattung zum selben Schluss wie hier, nämlich dass die Astanzahlen zunehmen. BEAUDET & MESSIER (1998) können hingegen die Beschattung nicht mit der Astanzahl an jungen Buchen verknüpfen. Die Mehrheit der Studien stellt anderslautend zu den hier vorgestellten Ergebnissen weniger grüne Äste bzw. eine niedrigere Astdichte im Schatten fest (CANHAM 1988, MOREL & PLANCHAIS 2000, WEINREICH 2000 S. 122, PRÉVOSTO & CURT 2004, HAGEMANN 2005 S. 38, PETRIȚAN et al. 2007, PETRIȚAN et al. 2010, WEIDIG 2016 S. 92). Nur BONOSI (2006 S. 83) findet keine Korrelation zwischen der Grünastdichte und der Strahlung. Eine Begründung dafür mag sein, dass bis auf die Arbeiten von PETRIȚAN et al. (2007, 2010) die Überschirmungsintensität weniger intensiv ausfällt und bei PRÉVOSTO & CURT (2004) die unterschiedlichen Überschirmungsbaumarten eine Rolle spielen. Darüber hinaus verknüpft der Ästigkeitsindex sowohl Informationen zur Astanzahl als auch zum Vitalitätsstatus, wohingegen die genannten Arbeiten sich jedoch nur auf Lebendastzahlen bzw. -dichten beziehen. Das wird besonders dadurch verstärkt, dass in der vorliegenden Arbeit verschiedene Altersstufen ausgewertet werden. Namentlich haben die jüngsten Buchen im tiefen Schatten noch keine Astreinigung vorzuweisen. Außerdem verstärken die Wechselbeziehungen zwischen mehr Strahlungsgenuss, besserem Wachstum, stärkerer innerartlicher Konkurrenz und intensiverer Astreinigung den Alterseffekt. Zusätzlich sind die Astdichten davon bestimmt, wie groß das grünastfreie Schaftprozent ist. Diesbezüglich besteht bei den Buchen dieser Arbeit kein Zusammenhang mit der Überschirmungsdichte. Ähnliches finden KÜßNER & FEBEL (2000), LEDER & WEIHS (2000), PETRIȚAN et al. (2009) sowie WEIDIG (2016 S. 96) für Buchenvoranbauten. Bei HAGEMANN (2005 S. 36f) und LINNERT (2009 S. 66) haben Buchen stärkerer Beschattung einen größeren Schaftanteil ohne grüne Äste verglichen mit Exemplaren unter hohem

Strahlungsgenuss. Dasselbe finden STANCIOIU & O'HARA (2006) an jungen Buchen. DIACI & KOZJEK (2005) konstatieren bei stärkerer Beschattung, dass die Ansatzhöhe des ersten Grünastes sinkt. Bis zu einem Konkurrenzwert von 100 des HEGYI-Index' bzw. Grundflächenwerten bis 35m²/ha ist das auch bei den Buchen dieser Arbeit der Fall. Steigt die Altbestandsdichte noch mehr an, verliert sich dieser Zusammenhang. Insofern ist es möglich, mit dieser Zweiteilung die Ergebnisse von WEIDIG (ebd.) und DIACI & KOZJEK (2005) in Einklang zu bringen. Der Seitendruck kristallisiert sich in der vorliegenden Untersuchung als bestimmender Faktor für die Astdichte und den grünastfreien Schaft heraus. Steigt er an, resultiert das in einem signifikant größeren grünastgereinigten Schaftanteil und in niedrigeren Werten des Ästigkeits-Index'. Die Arbeitshypothese 2 ist demnach uneingeschränkt anzunehmen. Das deckt sich mit der Ergebnislage in der Literatur. So berichten GÜRTH & VELASQUEZ (1991), DONG et al. (2007) und SCHMALTZ et al. (1997) für Eichen vom positiven Dichteeffekt auf die Astreinigung. ALCORN et al. (2007) beschreiben an jungen Eukalypten geringere Anzahlen an toten und grünen Ästen, wenn der Pflanzverband enger ist. Bei LEDER & BODELSCHWINGH (2008) haben plätzeweise gesäte Buchen weniger Grünäste und größere Ansatzhöhen des ersten Lebendastes, wenn die relativ höchsten Bäumchen aus dichteren Saatplätzen mit lückigeren verglichen werden. Bei TIEBEL et al. (2016) finden sich weniger Grünäste in den untersten 1,5m bei Buchen, die in weniger randliniengeprägten Horsten angepflanzt sind und Buchen aus Trupps gegenübergestellt werden. Steigt die Dichte in jungen Kiefern bzw. in Fichten, zeigen sie das gleiche Reaktionsmuster bezüglich der Anzahl an lebenden Ästen (MÄKINEN 1996 bzw. MÄKINEN & HEIN 2006), wenngleich der Zusammenhang schwach sein kann (MÄKINEN & COLIN 1999). Schon MUHLE & KAPPICH (1979) können nachweisen, dass die Anzahl lebender Äste ab- und die Grünastansatzhöhen bei jungen Buchen mit steigender Dichte zunehmen. Zum selben Ergebnis bezüglich der Ansatzhöhe des ersten Grünastes kommen MÄKINEN (2002) und FÄLLMAN et al. (2003) an jungen Birken sowie LEDER & WEIHS (2000) an vorangebauten Buchen. WEIDIG (2016 S. 96) berichtet davon, dass die grünastfreie Schaftlänge junger Buchen mit geringerem Standraum ansteigt und das umso mehr, wenn bereits ein Dickungsschluss eingesetzt hat. STRUCK (1999 S. 42f) kann eine größere relative astfreie Schaftlänge an jungen Eichen mit deren Konkurrenzverhältnissen untereinander in Verbindung bringen. MOSANDL et al. (1988) sowie KÜSTER (2000 s. 150ff) finden in Eichendickungen höherer

Ausgangspflanzenzahl niedrigere Bekronungsprozente und damit größere grünastfreie Schaftlängen vor. Dasselbe trifft auf die Kronenlänge junger Nadelhölzer zu (THORPE et al. 2010). Auch NAGEL & RUMPF (2010) bescheinigen dichter gepflanzten Eichenstangenhölzern einen längeren grünastfreien Schaft und weniger starke Totäste über 4cm Durchmesser. DUPLAT et al. (1997) finden an einer 5m hohen Eichendickung tiefer ansetzende erste Grünäste, wenn die Bäumchen am Rande eines Pflegestreifens mit denen im Inneren der Fläche verglichen werden, damit geht auch eine größere Anzahl an lebenden Ästen in den untersten 2m einher.

Wie BARBEITO et al. (2014) an jungen Buchen konstatieren, nimmt die Astanzahl pro Wachstumseinheit ab, wenn sich der Standraum verkleinert. Dieser Prozess der Astreinigung schreitet im Laufe der Zeit weiter fort, wie die Modellergebnisse aus Kapitel vier zeigen. Auch in anderen Studien ist das Alter eine bestimmende Größe für die Astreinigung (HEIN 2004 S. 69ff, FISCHER 1998 S. 141, NUTTO 1999 S. 59ff, KÜSTER 2000 S. 102ff, LANGSHAUSEN 2009 S. 136, BARBEITO et al. 2014) währenddessen in anderen die Höhe und damit auch der standörtliche Einfluss bestimmend sind (STORCH/SCHULER 2011 S. 134ff, S. 148ff). In der vorliegenden Arbeit wird aber auch deutlich, dass sich der Alterseinfluss mit steigender Höhe am Stamm nivelliert. Auch dieser Befund ist plausibel, weil sich mit fortschreitender Bezugshöhe am Stamm der Wachstumsprozess immer weniger intensiv mit dem Konkurrenzprozess durch benachbarte Buchen überlagert, der wiederum für das Absterben von grünen Ästen verantwortlich ist.

Andere Autoren berichten davon, dass sich die Anzahl an Ästen und die Ansatzhöhe des ersten Grünastes nicht linear ändern, sondern sich bei einer bestimmten Dichte der Pflanzen untereinander einer Asymptote nähern (NEWTON et al. 2012). Wenn davon ausgegangen wird, dass interspezifische Konkurrenz schwächer als intraspezifische ausfällt, lässt sich erklären, weshalb naturverjüngte Birken mit veränderter Dichte an jungen Eichen keine Änderung der Astanzahl und der Ansatzhöhe des ersten Grünastes hervorrufen (PETERSEN et al. 2009) und in Eichenreinbeständen die Kronenprozente niedriger, die astfreien Stammanteile aber größer ausfallen (BÄUCKER & BUES 2009). SPIECKER (1991 S. 95f) und STORCH/SCHULER (2011 S. 91ff) können die prozentuale Kronenansatzhöhe bzw. die Anzahl an lebenden Ästen mit dem Radialzuwachs des Stammes in Brusthöhe verknüpfen, welcher auf eine größere Dichte stark reagiert (MITSCHERLICH 1970 S. 71). Eine sehr schnelles Vergrößern der Kronenansatzhöhe

ist daher mit einem sehr niedrigen Stammdurchmesser und abnehmender Vitalität verbunden, wie SKOVSGAARD et al. (2006) in einem Buchen-Läuterungsversuch feststellen. Sie empfehlen daher genauso wie SPIECKER (2007) die Konkurrenz nicht zu maximieren, sondern einen Kompromiss zwischen Astreinigung und Vitalität zu suchen.

Bei der Bewirtschaftungsform des Buchenvoranbaus ist das Zusammenspiel zwischen Überschirmung und seitlichem Wettbewerb von Bedeutung. Ein Astreinigungsprozess, der sich allmählich zum Abschluss hin bewegt, ist gegeben, wenn das Gleichgewicht zwischen der Anzahl an grünen und toten Ästen erreicht ist. Dann ist bei einer hohen Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die Astmortalität weiter zielgerichtet fortschreitet und so den forstlichen Vorstellungen eines grünastfreien Schaftes näherkommt. Diesbezüglich zeigen die hier gefundenen Ergebnisse klar an, dass ein Mehr an Altfichten mit einer deutlich erhöhten Dichte im Voranbau kompensiert werden muss. Andernfalls überwiegen die Grünäste. Das trifft aber nicht in dieser Form auf den grünastgereinigten Schaftanteil zu. Er wird laut Modell bei hohem Seitendruck maximal, unabhängig davon, wie groß der Schirmdruck ausfällt. Daraus lässt sich folgern, dass die oben beschriebene Kompromissuche auch für Buchen-Voranbauten zielführend ist.

Totast-Dimensionen

Bei der Astreinigung ist von Interesse, welche Astdimensionen – absolut und relativ zum Whd – bereits abgestorben sind. Dicke Totäste verbleiben länger am Baum (BUTIN & KOWALSKI 1983) und bergen das Risiko in sich, Eintrittspforten für Stammfäuleerreger zu bieten (AUFSESS 1975) und bei Buchen höheren Alters durch den Zutritt von Luftsauerstoff Rotkern hervorzurufen (WERNSDÖRFER et al. 2005a, WERNSDÖRFER et al. 2005b). Wenn in den vorliegenden Ergebnissen, die sich ja mit jungen Bäumen beschäftigen, die Totaststärke zunimmt, ist das als ein positives Zeichen zu werten. Es bedeutet nichts anderes, als dass die Astreinigung intensiv ausfällt, sodass schon größer dimensionierte Äste absterben können (WEIDIG 2016 S. 103). Im Rahmen dieser Arbeit sind die stärksten Totästen vergleichsweise nicht äußerst groß dimensioniert: Die Modellschätzwerte für den ASIX betragen nur ein Viertel bis die Hälfte der Grünast-ASIX-Werte. Die vorgestellten Ergebnisse offenbaren eine sehr starke, negative Korrelation der Altbestandsdichte mit den absoluten Totastdurchmessern. Bei den relativen Totastdurchmessern (ASIX) ist der Zusammenhang sehr viel schwächer ausgeprägt. In der Summe führt es dazu,

die Arbeitshypothese 1 anzunehmen.

In der Literatur gibt es wenige Quellen, die sich diesem Thema widmen. WEIDIG (2016 S. 96) untersucht das an Voranbau-Buchen und kommt zum selben Ergebnis – die absoluten Totastdurchmesser nehmen mit größerer Beschattung ab. Bei HAGEMANN (2005 S. 41f) wird die Kombination aus stärkerem Schirm- und Seitendruck insofern abgebildet, als dass die Totastdurchmesser an jungen Buchen geringfügig zunehmen. Bei ihrer Studie kann – folgernd aus der Quellenauswertung des vorigen Abschnitts – der Seitendruck die bestimmende Größe angesehen werden. Letztlich geht die Wirkung des Schirms darauf zurück, dass Astdurchmesser bei stärkerer Beschattung per se geringfügiger zuwachsen und damit schwächer dimensioniert sind. Die Diskussion zu diesem Thema ist bereits im Abschnitt 5.2.2.2 Ästigkeit erfolgt. Diese dünneren Totäste sind aber die, die relativ zum Stamm gesehen dicker sind. Das bedeutet, dass eine größere Überschildungsdichte dafür sorgt, dass eine eventuell eingetretene Starkastigkeit schneller wieder verschwindet. Bei HAGEMANN (2005 S. 42f) verhalten sich die ASIX-Werte der Totäste umgekehrt – sie nehmen in größeren Lücken zu. Im Hinblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit mag auch hier wieder der gestiegene Seitendruck die bestimmende Größe sein.

Es zeigt sich, dass ein gesteigener Seitendruck dafür verantwortlich ist, dass zunehmend stärkere Äste absterben. Offensichtlich ist ein Ineinandergreifen der Kronen, ausgedrückt durch den Astindex, dafür verantwortlich. Lediglich dann, wenn die Äste die Kronenperipherie des Nachbarn überschritten haben, bewirkt ein Mehr an seitlicher Konkurrenz kein Ansteigen des Totastdurchmessers mehr. Auch dann, wenn die Blattfläche eines Astes – auf die Vertikale bezogen – zu weit über der Belaubung eines Zentralbaumastes liegt, schwächt sich die beschattende Wirkung ab. Die summarische Wirkung höherer und näherstehender Nachbarn steigert auch die relativen Totastdurchmesser. Die Arbeitshypothese 2 ist anzunehmen. Dass ein höherer Dichtstand die Totastdimensionen ansteigen lässt, wird von vielen Autoren berichtet. So haben vorangebaute Buchen, die sich geschlossen haben, einen größeren Totastdurchmesser als solche, die sich noch im Jungwuchsstadium befinden (WEIDIG 2016 S. 96). Die jungen Eichen bei KÜSTER (2000 S. 124ff) verhalten sich analog, nach Dichtschluss wird ein straffer Zusammenhang zwischen Konkurrenzwert und Totastdurchmesser aufgezeigt, den auch NAGEL & RUMPF (2010) in einem Eichenverbandsversuch aufzeigen. NUTTO (1999 S. 78ff) kann den stärksten Totastdurchmesser an jungen Eichen mit deren

– konkurrenzsensitiven – Stammdurchmesser verknüpfen. FORRESTER et al. (2012) verbinden die Entnahme von Nachbarn mit einem Ansteigen der Totasdurchmesser an jungen Eukalypten. BÄUCKER & BUES (2009) finden an Eichen in Reinbeständen niedrigere Totastdurchmesser als in vergleichbaren Eichen-Kiefern-Mischbeständen vor. Bei MOSANDL et al. (1988) weisen stammzahlreichere Eichendickungen auch einen größeren Totasdurchmesser auf, der positiv mit dem Stammdurchmesser korreliert. In einer anderen Studie ist jedoch keine Reaktion des Totastdurchmessers auf unterschiedliche Eingriffsszenarien in verschiedenen Wuchsstadien von Eichen feststellbar (MOSANDL et al. 1991). Analog dazu können SCHMALTZ et al. (1997) keinen Einfluss des Pflanzverbandes auf die Totaststärken junger Eichen erkennen. In beiden Arbeiten wird dieser Befund nicht ursächlich erklärt. Im Zusammenspiel von Schirm- und Seitendruck lässt sich anhand der hier vorgestellten Ergebnisse festhalten, dass sie in ihrer Wirkung auf den Totastdurchmesser nicht untereinander austauschbar sind. Im Vergleich mit den ASIX-Werten der Grünäste treten die jüngsten Buchen hier nicht als eigene, stark ergebnisbeeinflussende Gruppe auf. Offenbar hängt das mit denselben Reaktionsmustern aller betrachteten Buchen in Bezug auf die Astmortalität zusammen.

5.2.2.4 Stammform

Zwieseligkeit

Zwieseligkeit ist ein Holzmerkmal, welches die Holzqualität stark herabsetzt. Neben der Gefahr, dass der Stamm beim Fällen aufreißt oder splittert, wirken sich in der Gabelung befindliche Rindenquetschalten und Wassertöpfe mit nachfolgendem Fäuleeintritt holzentwertend aus (RICHTER 2010 S. 50). Darüber hinaus ist Schnittholz, welches unmittelbar unterhalb des Zwiesels gewonnen wird, stärker hirnrissig, krumm und mit Markfehlern behaftet (SCHULZ 1961a S. 49). Besonders unangenehm für die Forstwirtschaft sind deshalb solche Zwiesel, die wegen ihres tiefen Ansatzes die Verwendung des untersten, wertvollsten Stammstückes beeinträchtigen (LEDER & HILLEBRAND 2001). Bei jungen Bäumen ist es wahrscheinlich, dass einmal gebildete Tiefzwiesel nicht mehr so schnell verschwinden (NINGRE 1997). Zwiesel an sich bergen darüber hinaus die Gefahr, preismindernde Rotkernigkeit zu verursachen (WERNSDÖRFER et al. 2005a, WERNSDÖRFER et al. 2005b).

Ob Buchen tief ansetzende Zwiesel haben, hängt den hier ermittelten Ergebnissen zufolge nur schwach von der Grundfläche des aufstockenden Altbestandes ab. Dagegen ist der Schirmdruck für die Ansatzhöhe des untersten Zwiesels die bestimmende Größe. Daher wird die Arbeitshypothese 1 für die Zwieseligkeit einschränkend angenommen.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse hat der Retrospektivitätsgrad des geschätzten abhängigen Merkmals eine große Bedeutung. Für das Tiefzwieselmodell liegt der Zeitpunkt, zu dem der Zwiesel entstanden ist und sich verfestigt hat (NINGRE 1997), immer weiter hinter der aktuell gemessenen Schirmdichte zurück. Wie stark die Überprägung des Schirmdrucks durch den seitlichen Wettbewerb im Voranbau bei der Verfestigung des Zwiesels war, lässt sich genausowenig abschätzen. Daher hat der Einfluss des Altbestandes zwar die genannte Wirkung, die aber nicht mehr signifikant ist. Das ändert sich, wenn die Zwieselansatzhöhe betrachtet wird. Die Altbestandswirkung tritt deutlich zutage, weil das aktuellere Konkurrenzgeschehen abgebildet wird. Dass sich unter stärkerer Beschattung des Oberstandes vermehrt Tiefzwiesel herausbilden, liegt zum einen daran, dass in den hier verwendeten Daten die Kombination aus hohem Seitendruck bei starker Überschirmung nicht besetzt ist. Es gibt aber zum anderen gleichlautende Hinweise aus der Literatur. So finden PETRIȚAN et al. (2010), dass sich die Zwieselbildung bei abnehmenden Strahlungsmengen unter 20% anteilmäßig und stetig steigend vergrößert. Bei STANCIOIU & O'HARA (2006) ist zwar der Trend für unterschiedlich beschattete Buchen ähnlich, der Zusammenhang aber nur schwach ausgeprägt. Andere Autoren stellen wiederum das Gegenteil fest. Dass stetig höhere Strahlungsmengen auch kontinuierlich häufiger Zwiesel bedingen, ist Gegenstand unterschiedlicher Quellen. BROWN (1952), BOLVANSKÝ (1980/81), LE TACON (1985), SCHMITT et al. (1995), SAGHEB-TALEBI (1996 S. 120), MOREL & PLANCHAIS (2000) und ROZENBERGAR & DIACI (2014) können das an jungen Buchen unterschiedlicher Beschattung konstatieren und HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997 S. 99ff) sowie WEINREICH (2000 S. 107ff) an jungen Eichen. Allen Arbeiten ist gemein, dass sie Freiflächenbedingungen oder fast vergleichbare, sehr geringe Überschirmungsintensitäten mit einbeziehen. Das ist in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht der Fall. Eine Lösung des Problems liegt in der Arbeit von DUPRÉ et al. (1986) verborgen. Sie registrieren bei geringfügiger Beschattung die höchsten Zwieselanteile an jungen Buchen, gefolgt von Bäumchen im Schatten. Die niedrigsten Raten sind im Halbschatten zu

finden. Insofern kristallisiert sich ein quadratischer Trend heraus. Das bedeutet, dass die Buchen dieser Arbeit in ihrer Reaktion der Zwieseligkeit dem Halbschatten – bzw. Schattengradienten folgen, den DUPRÉ et al. (1986) finden. Dass Zwieseligkeit eine morphologische Ausprägung ist, die die Lichtausbeute im tiefen Schatten optimieren hilft, belegt die genannte Studie außerdem. Wird die Anzahl an Explorationstrieben als Voraussetzung monopodialen Wachstums einbezogen, kommen Zwieselungen im Schatten signifikant am häufigsten vor. Es handelt sich dabei vorrangig um sympodiale²⁰ Zwiesel (DUPRÉ et al. 1986). In gewisser Weise bestätigen auch die Resultate von WEINREICH (2000 S. 80) diese Erklärung. Mit Hilfe von Verzweigungsanalysen aus Wiederholungsaufnahmen legt er dar, dass bei jungen Eichen Zwiesel die Voraussetzung dafür sind, dass sich Kronen auflösen (LEONHARDT & WAGNER 2006). Andersherum können sich aus aufgelösten Kronen durch Seitendruck wieder bessere Formen entwickeln (GOCKEL 1994 S. 83). Solche aufgelösten Kronen wiederum können, insbesondere wenn sie noch in plagiotropen Wuchs übergehen, die Selbstbeschattung bei knappen Strahlungsmengen vermeiden helfen (DIACI & KOZJEK 2005, NICOLINI & CARAGLIO 1994, WAGNER et al. 2010). Die hohen Zwieselanteile unter Freiflächenbedingungen werden in Verbindung gebracht mit einer größeren Anzahl an Wachstumsschüben, wobei die letzten Triebe vor dem Frost nicht mehr ausreichend verholzen können (KURTH 1946 S. 645f, BROWN 1952, LE TACON 1985, SCHMITT et al. 1995). Demzufolge stirbt das oberste Meristem der Endknospe ab, sodass das Wachstum im Frühjahr durch subterminale oder laterale Knospen fortgeführt werden muss. Dadurch werden vermehrt enge Zwiesel gebildet (LE TACON 1985, CHAAR & COLIN 1999, WEINREICH 2000 S. 73ff, KERR & BOSWELL 2001). Solche frostbedingten Zwiesel sind NINGRE & COLIN (2007) zufolge dauerhafter Natur. Die geschädigten Leittriebe wachsen nur noch vermindert weiter, weil es zum Verlust der Apikaldominanz des Terminaltriebs gekommen ist (BROWN 1955, PEIK 1976, NINGRE & COLIN 2007, COLIN et al. 2012). Auch die Intensität und der Zeitpunkt eines Spätfrostes bestimmen, wieviele Wachstumseinheiten gebildet werden und in welcher Größenordnung sie wachsen (CHAAR & COLIN 1999). Als weitere Ursachen für Zwieseligkeit werden Schäden an der Terminalknospe durch Insekten oder zu hohe Temperaturen genannt (ROLOFF 1986 S. 20, WEINREICH 2000 S. 77, KERR &

²⁰ Nach DUPRÉ et al. (1986) entwickelt sich bei sympodialen Zwieseln der Trieb aus einer Seitenknospe mindestens gleich stark wie der ursprüngliche Leittrieb, bei monopodialen Zwieseln ist der Zwieselast aus der Seitenknospe schwächer ausgebildet als der Zwieselast, der sich aus dem Leittrieb heraus entwickelt hat. der beiden Zwieseläste, bei monopodialen Zwieseln

BOSWELL 2001). Bedeutend ist in diesem Zusammenhang aber auch, dass NINGRE & COLIN (2007) für ein Drittel der zwieseligen Eichen Frost als Ursache ausschließen können und dass WEINREICH (2000 S. 77) zufolge Schäden, die nicht die Terminalknospe betreffen, in 22% der Fälle Zwiesel hervorrufen. Es lässt sich daraus folgern, dass Zwiesel ein Teil der morphologischen Reaktion auf Umweltveränderungen vielerlei Ursachen sind. Außerdem ist eine genetische Determination eines bestimmten Reaktionsmusters, das Zwieseligkeit hervorruft (FABRICIUS 1929), nicht auszuschließen (KRAHL-URBAN 1951/53a, KRAHL-URBAN 1951/53b, KRAHL-URBAN 1953, RICHTER 1990, TUROK 1996 S. 92ff, KERR & BOSWELL 2001, LIESEBACH et al. 2005). Insbesondere ist nach HOFMANN et al. (2015) die Frosthärte genetisch bedingt.

Ob Buchen tief ansetzende Zwiesel haben, hängt den hier ermittelten Ergebnissen zufolge hauptsächlich vom seitlich wirkenden Wettbewerb ab – vergrößert er sich, sind Tiefzwiesel weniger wahrscheinlich. Dasselbe gilt auch für die Ansatzhöhe des untersten Zwiesels. Sie schiebt sich nach oben, je dichter gedrängt der Voranbau aufwächst. Anders als beim Schirmdruck wird die Arbeitshypothese 2 vollumfänglich bestätigt. Diese Ergebnisse decken sich mit den Angaben in der Literatur. KURTH (1946 S. 638) und FALCONE et al. (1986) finden an naturverjüngten Buchen weniger Zwiesel vor als an gepflanzten, auch sind in der niedrigsten soziologischen Klasse innerhalb der Buchendickung die Zwiesel weniger häufig anzutreffen. LEIBUNDGUT et al. (1976 S. 340) und COLIN et al. (2012) bemerken an jungen Stieleichen, dass die Zwieselanzahl mit größerer Dichte der Pflanzen abnimmt und die untersten Zwiesel signifikant höher ansetzen. Außerdem stellen sie heraus, dass mehrfach gezwieselte Bäume eine geringere gabelungsfreie Stammlänge aufweisen. WEIDIG (2016 S. 118) bringt ebenfalls höheren Seitendruck mit einer niedrigeren Tiefzwieselwahrscheinlichkeit und einer geringeren Zwieselanzahl in Verbindung. ROZENBERGAR & DIACI (2014) können die Zwieseligkeit des Terminaltriebs junger Buchen in negativer Abhängigkeit zur Dichte modellieren. In natürlichen Buchendickungen kommen in der soziologischen Oberschicht weniger Zwiesel vor, wenn sie dichter stehen (BOLVANSKÝ 1980/81). Auch MOSANDL et al. (1988) können den positiven Zusammenhang zwischen Dichte von Eichenverjüngungen und Zwieselansatzhöhe nachweisen. Bei SCHMALTZ et al. (1997) bleibt der Anteil zwieseliger Eichen mit größerem Pflanzverband zwar unverändert, aber die Zwieselansatzhöhe sinkt ab. In einem Pflegeversuch haben Birken die geringsten Zwieselanteile, wenn die

konkurrierenden Weichlaubhölzer nicht kurz über dem Boden entfernt, sondern in 70% ihrer Höhe geköpft werden (FÄLLMAN et al. 2003). Eichendickungen mit einer vorwiegenden Negativauslese („Säuberung“) haben größere Zwieselanteile als Bestände ohne diesen Eingriff (LEIBUNDGUT et al. 1976 S. 339). GUERICKE (1996) berichtet von niedrigeren Zwieselhäufigkeiten an Nestereichen, wenn sie zusätzlich mit Weichlaubhölzern umfüttert sind. In Baumartenmischungen, in denen die interspezifische Konkurrenz schwächer als die intraspezifische eingeschätzt wird, äußert sich das in der gleichen Reaktion. BÄUCKER & BUES (2009) finden in reinen Eichenbeständen weniger gezwieselte Exemplare, die noch dazu höher ansetzen als in Eichen-Kiefern-Mischbeständen. Bei NAGEL & RUMPF (2010) haben Eichen, die mit Hainbuchen begründet worden sind, nennenswerte Anteile an Tiefzwieseln. Andere Autoren berichten davon, dass ein gesteigerter Seitendruck keine Änderung der Anteile zwieseliger Bäume und/oder der Zwieselansatzhöhen bewirkt (STRUCK 1999 S. 50, KÜSTER 2000 S. 165ff, HOUŠKOVÁ & MAUER 2013). Eine Begründung für diese einhelligen Befunde findet KURTH (1946 S. 645) ansatzweise darin, dass bei größerem Wuchsraum tendenziell mehr Johannistriebe auftreten, die als Zwieselrisiko angesehen werden.

Offenbar gibt es einen Zusammenhang zwischen der Zwieseligkeit und dem Alter, der aber nicht eindeutig gerichtet ist. Einerseits wird berichtet, dass die Zwieselanteile in sehr jungen Beständen niedrig sind, um dann im Laufe der Zeit teilweise sehr stark anzusteigen (KURTH 1946 S. 636, COLIN et al. 2012). Andererseits stellen LEIBUNDGUT et al. (1976 S. 340) und FISCHER (2000) heraus, dass die Zwieselanteile mit fortschreitendem Alter abnehmen. In der vorliegenden Arbeit spielt das Alter der Buchen keine Rolle dabei, wie hoch die Zwiesel ansetzen. Auch der Wurzelhalsdurchmesser liefert keinen Erklärungsbeitrag dafür, ob ein Baum gezwiesel ist oder nicht. Die Arbeitshypothese 3 ist folglich abzulehnen. Möglicherweise liegt das daran, dass in Bezug auf die Zwieseligkeit in der vorliegenden Arbeit nur Tiefzwiesel betrachtet werden.

Stammneigung, Krummschaftigkeit und Ausmaß der Krümmung

Währenddessen das Merkmal Schaftneigung die vertikale Ausrichtung der gesamten Stammachse im Blick hat, richtet sich die Krummschaftigkeit nur auf Teilbereiche des Schaftes, die vom Lot abweichen. Sowohl geneigte als auch krumme Stämme sind im Sinne der heutigen Holzverwendung als problematisch einzuschätzen. Sie mindern die Ausbeute an Schnittware und bedingen einen

größeren Anteil an Zugholz, sodass sich Bretter verdrehen (SCHULZ 1961a S. 54, SACHSSE 1965 S. 80ff und S. 92ff, RICHTER 2010 S. 45). Schnittholz aus krummen Abschnitten weist mehr Innenrisse auf (SCHULZ 1961a S. 52) und ist je nach Anschnitt bei größerer Oberflächenrauigkeit weniger fest (RICHTER 2010 S. 45).

Die Modellergebnisse dieser Arbeit zeigen an, dass geneigte Stämme bei hohen Altbestandsdichten vorkommen. Anders verhält es sich mit sehr stark gekrümmten Bäumen, die bei niedrigen Grundflächen in den Daten zu finden sind. Ob ein Schaft gekrümmt ist oder nicht, hängt dagegen nicht vom Altbestandseinfluss ab. In Summe gesehen bestätigt sich die Arbeitshypothese 1 bis auf das Vorhandensein einer Krümmung.

In der Literatur wird teilweise synonym von den Begriffen „Neigung“ und „Plagiotropie“ gesprochen (z. B. PETRIȚAN et al. 2009). Für die Buchen dieser Arbeit wird zwischen den Merkmalen differenziert. Daher ist ein geneigter Stamm nicht zwangsläufig plagiotrop wie die Verschneidung der beiden Merkmale offenbart:

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung von Wuchsform und Schaftneigung der Probebuchen.

Wuchsform	nicht geneigt	geneigt	Gesamt
nicht plagiotrop	118	49	167
plagiotrop	13	6	19
Gesamt	131	55	186

Insofern ist ein Vergleich mit der Literatur erschwert. Mitunter wäre für die Buchen dieser Arbeit der Begriff „Schiefstand“ angebracht. Dass plagiotrope Buchen nur bei niedrigen Strahlungsmengen vorkommen, ist gut belegt (z. B. WAGNER & MÜLLER-USING 1997, MOREL & PLANCHAIS 2000, DIACI & KOZJEK 2005, KUNSTLER et al. 2005, STANCIOIU & O'HARA 2006, PETRIȚAN et al. 2009, PETRIȚAN et al. 2010, ROZENBERGAR & DIACI 2014). Wegen der Nichtvergleichbarkeit mit der Stammneigung wird dieses Merkmal hier aber nicht weiter in der Diskussion aufgegriffen. Weil Eiche kein schattenbedingtes plagiotropes Wuchsverhalten zeigt, sind am ehesten Studien vergleichbar, die sich dieser Baumart widmen. Die Zunahme geneigter Eichen-Stämme bei größerer Altbestandsüberschirmung findet übereinstimmend HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997 S. 99ff), wenn diese weniger als 10-15% der Freilandstrahlung erhalten. Bei den jungen Eichen in Femeln ist das ebenso zutreffend (WEINREICH 2000 S. 111ff). Dasselbe stellen DIACI & KOZJEK (2005) an unterschiedlich überschirmten Buchen fest. Das Merkmal Stammneigung unterscheiden die Autoren von der Plagiotropie wie in dieser

Arbeit. Offenbar haben geneigte Stämmchen im Schatten bei Buche mit einer bevorstehenden plagiotropen Ausrichtung der Schaftachse zu tun, bei Eiche dagegen ist das möglicherweise eine Reaktion, dem Licht „hinterherzuwachsen“ (MOSANDL et al. 1988). Was Krümmungen betrifft, findet KURTH (1946 S. 625) weniger gewundene Buchen, sobald sie unter einem Altbestands-Kronendach aufwachsen. Auch das steht im Einklang mit den gefundenen Ergebnissen. Der Autor gibt allerdings zu bedenken, dass ein zu dichter Schirm die Stammkrümmungen wieder zunehmen lässt. HAGEMANN (2005 S. 32f) kann bei Buche keine Unterschiede in der Stammkrümmung bei variierender Überschirmung ausmachen. Bei den Buchen der vorliegenden Arbeit ist festzustellen, dass geneigte Bäume auch stärker gekrümmt sind. Wie ROLOFF (1986 S. 63ff) erklärt, ist bei der Buche dann ein „Schlängelwuchs“ zu beobachten, wenn dem späteren Aufrichten der Schaftachse mehrfach plagiotropes Wachstum vorausgeht. Diese Wechselwirkung aus veränderten Schirmbedingungen und dem Seitendruck, wird in der vorliegenden Arbeit nicht in den Daten abgedeckt. Vielmehr sind die gekrümmten Stämme bei geringer Überschirmungsdichte ein Resultat gleichzeitig vermehrter innerartlicher Konkurrenz im Voranbau durch bessere Wachstumsbedingungen.

Das Qualitätsmerkmal Stammform ist in dieser Arbeit vom Dichtstand der Verjüngung abhängig, sodass die Arbeitshypothese 2 anzunehmen ist. Allerdings fällt der Zusammenhang negativ aus, die Stammform verschlechtert sich mit größerer Dichte. Dass ein sehr hoher Dichtstand die Ausbildung einer geneigten Schaftachse fördert, wird von GUERICKE (1996) an unterschiedlich dicht erwachsenen Nester-Eichen bestätigt. EHRING & KELLER (2016) beobachten in Eichen-Trupppflanzungen, dass bei hoher Konkurrenz ein größerer Anteil schief stehender Eichen zu finden ist. DUPLAT et al. (1997) untersuchen Eichen-Dickungen, in denen alle 6m Pflegestreifen von 2m angelegt sind. Sie können nur für mitherrschende Bäumchen einen Zusammenhang zwischen der Neigungsintensität und der Position im Dickungstreifen feststellen: sie weisen die größte Neigungsintensität in Richtung des Pflegestreifens auf. Das ist verstärkt der Fall, wenn es sich um den Nordrand handelt. Diese Befunde, obwohl es sich um Eichen handelt, zeigen einhellig mit den hier ermittelten Ergebnissen, dass verstärkte Konkurrenz innerhalb der Verjüngung sich in zunehmend geneigten Stämmchen niederschlägt. STRUCK (1999 S. 56) findet einen schwachen Zusammenhang zwischen größerer Neigung und höherer Dichte bei Eiche.

FALCONE et al. (1986) berichten von einem Versuch zur Standraumregulierung in sehr dichten Buchennaturverjüngungen. Sobald die Bäumchen auf einen weiten Verband von 3,5m x 3,5m ausgedünnt werden, weisen sie nach einiger Zeit nicht nur vermehrtes Wachstum, sondern auch deutlich weniger geneigte und gekrümmte Stämmchen auf. Bei TIEBEL et al. (2016) sind Buchen in größeren Verjüngungseinheiten mehr gekrümmt als in mehr randlinienbeeinflussten Trupps. Desgleichen haben Eichen in einem Verbandsversuch bei einem Standraum unter 1m² einen größeren Anteil ein- und unschnüriger Schäfte vorzuweisen (NAGEL & RUMPF 2010). Allerdings messen die Autoren der Stammform einen großen Anteil an genetischer Fixierung bei. Im Kontrast zu den genannten Zusammenhängen stehen einige andere Studien. KURTH (1946 S. 625) stellt bei gepflanzten Buchen mehr Krümmungen fest als bei Naturverjüngung. BÄUCKER & BUES (2009) finden bei Eichen, die einem stärkeren Wettbewerbsdruck ausgesetzt sind, weniger stark gekrümmte Exemplare als bei solchen, die einzelbaumweise mit Kiefer gemischt aufwachsen. SCHMALTZ et al. (1997) bescheinigen jungen Eichen unterschiedlichen Pflanzverbandes tendenziell größere Anteile sehr krummer Individuen, wenn der Standraum zunimmt. Insofern existieren hinsichtlich der Wirkung des Dichtstandes verschiedene Reaktionen der untersuchten Bäume.

Neben der genannten genetischen Beeinflussung als Erklärung schlägt noch der Alterseffekt in Wechselbeziehung mit der Dichte zu Buche. Die Bäume dieser Arbeit sind signifikant häufiger geneigt und haben tendenziell eher Stammkrümmungen aufzuweisen, die auch noch stärker ausfallen, wenn sie älter bzw. dicker sind. Insofern bestätigt sich die Arbeitshypothese 3. Auch MOSANDL et al. (1988) und FISCHER (2000) kommen in unechten Zeitreihen für junge Eichen zum Schluss, dass die Anteile gekrümmter Individuen mit dem Alter zunehmen. Sie machen dafür die verstärkte seitliche Konkurrenz ab der Dickungsphase verantwortlich: Die Eiche „wendet sich dem Licht hinterher“.

5.3 Synthese

5.3.1 Wirkung der Überschirmung

Wenn es sich um zweischichtige Waldbestände wie bei Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm handelt, ändern sich die Konkurrenzverhältnisse um Ressourcen, weil der Oberstand einen Effekt auf deren Verfügbarkeit in Raum, Zeit und Qualität hat (GOLDBERG 1990).

Ist die Beschattung hoch, befinden sich die Pflanzen in einer knappen Situation für photosynthetisch aktive Strahlung (KÜßNER 1999 S. S. 91ff, WAGNER 1999 S. 54ff, NIINEMETS 2010, BARTSCH & RÖHRIG 2016 S. 292), die nach dem Extinktionsgesetz LAMBERT-BEER exponentiell mit dem Blattflächenindex abnimmt (MONSI & SAEKI 1953, zit. n. STRASBURGER et al. & BRESINSKY et al. 2008 S. 974). Daher handelt es sich bei der Konkurrenz um Licht auch um einen asymmetrischen Wettbewerb zwischen Oberstand und Unterstand (LAMBERS et al. 1998 S. 475). Außerdem reduziert ein aufstockender Oberstand Kohlendioxid für die Verjüngung (MITSCHERLICH 1975 S. 141, NIINEMETS 2010) trotz dass unterständige Pflanzen teilweise ihren Bedarf an CO₂ aus der Bodenlösung und der Bodenatmung decken können (MITSCHERLICH ebd.). Weil die Schirmkonkurrenz eng mit der Wurzelkonkurrenz verknüpft ist (WAGNER 1999 S. 192ff), senkt der Oberstand auch die Verfügbarkeit von Nährstoffen wie Stickstoff und Kalium sowie das Bodenwasserpotenzial (NIINEMETS 2010), wie PETRIȚAN et al. (2011) in einem Abgrabungsexperiment belegen. In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss des Altbestandes auf die Verfügbarkeit von Ressourcen nicht betrachtet, sondern lediglich die Reaktion der unterständigen Buchen in den Fokus gerückt. Die Buchen im Unterstand müssen über Mechanismen verfügen, die ihnen eine Existenz und ein Wachstum trotz massivem Wettbewerb in Form asymmetrischer, inter-hierarchischer Konkurrenz (WEINER & THOMAS 1986, BEGON et al. 1991 S. 266, FISCHER et al. 2016) des Oberstandes erlauben. Dabei steht eine Bandbreite an Anpassungsmöglichkeiten zur Verfügung, wobei deren zeitliche und räumliche Ebene aber stark variiert (ACKERLY 1997). Dem Autor zufolge kommt es erst dann zu einer Reaktion der Pflanze (GOLDBERG 1990) auf modifizierte Umweltbedingungen, wenn die Änderung länger andauert als es die Reaktionszeit der Pflanze erfordert. Generell ist dies bei den Buchen dieser Arbeit anzunehmen, weil von einer mittleren Konstanz der Beschattung in den letzten fünf Jahren ausgegangen werden kann (vgl. Abschnitt 2.2). ACKERLY (1997) zeigt, dass die Anpassungszeit von physiologischen hin zu anatomischen und morphologischen

Merkmale (VALLADARES et al. 2002) zunimmt. Die Buche reagiert auf beiden Ebenen, wobei die physiologische Anpassung jedenfalls in jüngeren Entwicklungsstadien (SCHALL et al. 2012) nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt (VALLADARES et al. 2002, BONOSI 2006 S. 13f, WAGNER et al. 2010). CANHAM (1998) postuliert, dass die metabolischen Kosten einer überwiegend physiologischen Anpassung höher sind als für die morphologische. Insofern unterstreicht das den schattenertragenden Charakter von Buche. Nach LAMBERS et al. (1998 S. 470) ist eine solche Spezialisierung typisch, weil es keine „Multiplastizität“ gibt.

Auf physiologischer Ebene erhöht die Buche den Chlorophyllgehalt in den Blättern, (MITSCHERLICH 1975 S. 135), mehr, als das Esche oder Ahorn tun (BONOSI 2006 S. 22). Insgesamt arbeitet der Photosyntheseapparat bedingt durch niedrigere Elektronentransportraten langsamer, aber wegen des höheren Chlorophyllgehaltes mit höherer Energieausnutzung (MITSCHERLICH 1975 S. 139ff, PLANCHAIS & SINOQUET 1998, BONOSI 2006 S. 15, ROBAKOWSKI & ANTCZAK 2008). Allerdings kann die Buche nicht wie die Esche mit sehr stark steigenden Gewichtsanteilen von Blattstickstoff arbeiten, sondern reagiert mit niedrigerer Blattgewebedichte auf zunehmende Beschattung, was zur Bildung von dünnen, aber flächig größeren Blättern mit geringerer Stomatadichte führt (MITSCHERLICH 1975 S. 141, LICHTENTHALER et al. 1981, ARANDA et al. 2001, BONOSI 2006 S. 11ff). ACKERLY (1997) zufolge können Bäume diese morphologische Merkmal innerhalb von ca. 15 Tagen an veränderte Bedingungen anpassen. Diese Schattenblätter jedenfalls zeichnen sich auch dadurch aus, dass sie den Kompensationspunkt zwischen Respiration und Assimilation bereits bei geringeren Strahlungsmengen, verglichen mit Sonnenblättern erreichen (MITSCHERLICH 1975 S. 141). Es existieren daher auch Unterschiede, inwieweit Buchen unter sehr starker Beschattung und solche unter verbesserten Einstrahlungsbedingungen die hohe Energie von Sonnenflecken überhaupt ausnutzen können. Schwanken die Strahlungsanteile kurzfristig, wie es bei den Sonnenflecken der Fall ist, sind sonst sehr stark beschattete Buchen weniger als moderat beschattete in der Lage, diese hohe Energie auszunutzen. Der Photosyntheseapparat braucht länger, um sich darauf einzustellen (ROBAKOWSKI & ANTCZAK 2008) und die Stomata schließen sich nach dem Vorüberziehen des Sonnenflecks bereits eher wieder, als das Blätter im Halbschatten tun (KÜPPERS et al. 1999). Damit sind eine geringere Assimilationsrate und geringeres Wachstum verbunden, wenn auch die Transpirationsverluste stark eingeschränkt werden. Wenn angenommen wird, dass ein Schirm nicht nur die Quantität und die

zeitliche sowie räumliche Verteilung von Strahlung, sondern auch deren Qualität für die Pflanzen im Unterstand verändert, müssen auch hier spezielle Anpassungsmöglichkeiten vorhanden sein. So schreibt RUBAN (2015), dass das niedrigere Verhältnis von hellrotem zu dunkelrotem Licht (red-farred) durch Beschattung dazu führt, dass die resultierenden Energieimbancen zwischen den beiden Photosystemen in schattenadaptierten Pflanzen mit Hilfe spezieller Transfermechanismen besser und effizienter ausgeglichen werden können. Handelt es sich um Baumarten im Oberstand aus Buche und Eiche, kann mit einem niedrigeren R/FR-Verhältnis der Strahlung unterhalb des Kronendaches gerechnet werden (GEMMEL et al. 1996), wohingegen AMMER (2000 S. 54f) bzw. AMMER (2003) keine Veränderung in den Anteilen der photosynthetisch relevanten Wellenlängenbereichen durch einen Fichtenschirm feststellen kann und diesen daher als wellenlängenneutralen Filter ansieht. Das hohe Schattenertragnis jedenfalls, das ein Existieren der Buche bis zu 1% relativer Beleuchtungsstärke ermöglicht findet seinen Ausdruck auch darin, dass im Alter von zwölf Jahren Stückzahlen in der Naturverjüngung bis zu 350.000 Stck./ha überleben können (BARNA et al. 2009, AMMER et al. 2010, WAGNER et al. 2010).

Es wird durch die hohe morphologische Plastizität erreicht (LAMBERS et al. 1998 S. 470, BARNA et al. 2009, WAGNER et al. 2010). Das ist ein Phänomen, das auf schattentolerante Arten im Allgemeinen zutrifft: Auch CHEN (1997) stellt bei der schattenintoleranten *Pinus ponderosa* eine geringere morphologische Plastizität bei steigender Beschattung im Vergleich mit Douglasie und Engelmannfichte als intermediär schattenertragend fest. Auf morphologischer Ebene reagiert die Buche unter starkem Lichtmangel, indem sie ihren Selbstbeschattungsgrad minimiert (PLANCHAIS & SINOQUET 1998, BONOSI 2006 S. 51ff). Das verschafft ihr eine hohe Konkurrenzkraft, weil sie im Schatten verharren kann ohne mit erhöhten Wachstumsraten zu reagieren (WAGNER et al. 2010). Dazu dienen ihr die genetisch fixierte zweizeilige Anordnung der Knospen und die akrotone Verzweigung (KÜPPERS 1989) resultierend im architektonischen Grundmodell nach TROLL (1937 S. 523 und 696f), wonach die Triebe zunächst waagrecht wachsen und sich dann sekundär aufrichten (ROLOFF 1986 S. 63, KÜPPERS 1989). Aus alledem leitet sich ab, dass niedrige Strahlungsmengen zu einem waagrecht verbleibenden Wachstum des Leittriebes führen, sodass sich mit fortschreitender Zeit und gleichbleibenden Bedingungen die gesamte Schaftachse plagiotrop ausformt (WAGNER & MÜLLER-USING 1997, NICOLINI & CARAGLIO 1994, KÜSNER & FEBEL 2000,

MOREL & PLANCHAIS 2000, DIACI & KOZJEK 2005, KUNSTLER et al. 2005, PETRIȚAN et al. 2009, PETRIȚAN et al. 2010, ROZENBERGAR & DIACI 2014). Das ist auch der Grund für eine vergrößerte Neigung des Stammes bei hohen Altbestandsdichten, wie sie in der vorliegenden Arbeit beobachtet werden können. Weiterhin kann die Buche bei Lichtmangel mehr Blattfläche als andere Laubbaumarten aufrechterhalten, so sind die Schattenblätter einerseits großflächiger und dünner (BROWN 1952, BURSCHEL & HUSS 1964, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965b, BEAUDET & MESSIER 1998, KUNSTLER et al. 2005), wenngleich auch weniger in der Anzahl (PLANCHAIS & SINOQUET 1998, AMMER 2000 S. 49). Trotz allem sinkt die Gesamtblattfläche im Schatten drastisch ab (LINNERT 2009 S. 79, PETRIȚAN et al. 2009). In der Verzweigungsstruktur treten dann vermehrt sogenannte Exploitationstriebe mit kurzen Internodienlängen auf, die den horizontalen Raum effizient ausfüllen (THIÉBAUT 1981, THIÉBAUT & PUECH 1984) und die im Schatten verstärkt zu beobachten sind (DUPRÉ et al. 1986, PLANCHAIS & SINOQUET 1998). Das ist mit einer großen Bandbreite an Horizontalwinkeln der Blätter verbunden, sodass kein Blatt einer Astachse 1. Verzweigungsordnung (STRASSBURGER et al. & BRESINSKY et al. 2008 S. 169f) das andere beschattet (PLANCHAIS & SINOQUET 1998, BONOSI 2006 S. 40f.). Zum Zusammenhang zwischen Verzweigungsgrad und Licht gibt es unterschiedliche Befunde, nach DUPRÉ et al. (1986), PLANCHAIS & SINOQUET (1998) und WEINREICH (2000 S. 56) verringert sich dieser im erhöhten Schatten, was CANHAM (1988) sowie BEAUDET & MESSIER (1998) an Buche und PAQUETTE et al. (2007) an Zuckerahorn nicht feststellen können. Die letzteren Autoren führen das auf die an sich schon effiziente Baumarchitektur zurück. Jedenfalls wird das horizontale morphologische Reaktionsmuster der Zweige und Äste sowie die geringe Selbstbeschattung von vielen Autoren beobachtet (ACKERLY 1997, BEAUDET & MESSIER 1998, PLANCHAIS & SINOQUET 1998, KUNSTLER et al. 2005, PAQUETTE et al. 2007, LINNERT 2009 S. 81f, PETRIȚAN et al. 2009, PETRIȚAN et al. 2010). Letztlich ist das auch der Grund dafür, weswegen bei den Buchen dieser Arbeit im tiefen Schatten mehr Tiefzwiesel und Stammgabelungen anzutreffen sind, die in einer immer niedrigeren Höhe ansetzen. Den niedrigeren Blattflächenindex im Schatten kann die Buche zum einen mit größeren Astansatzwinkeln bezogen auf die Vertikale als Folge einer abgesenkten Triebdichte erreichen (CANHAM 1988, BEAUDET & MESSIER 1998), was auch auf die steigenden minimalen Grünastansatzwinkel für die Buchen der vorliegenden Arbeit zutrifft. Zum anderen ist der niedrigere LAI (PLANCHAIS & SINOQUET 1998)

dem Beibehalten der distichen Knospenanordnung und damit der Verzweigung geschuldet: Nur bei guten Wachstumsbedingungen und Jahrestrieben mit langen Internodien findet eine Torsion des Triebs statt, sodass die originär distiche Verzweigung einer radialsymmetrischen weicht NICOLINI (2000). Die Blattmassen und -flächen innerhalb der Krone hängen signifikant mit den Strahlungsverhältnissen in der Lichtkrone zusammen (LINNERT 2009 S. 78), sodass im Schatten eine lockere Kronenstruktur durch Reduktion der Kronenbiomasse (LINNERT 2009 S. 77f) zusätzlich zu den oben beschriebenen Mechanismen notwendig wird. Das ist auch der Grund, weshalb der ASIX des stärksten Grünastes im dritten Schaftabschnitt mit steigender Schirmdichte abnimmt – die Betrachtungsebene für diesen Ast hat bei einer wachsenden Anzahl von Buchen die Lichtkrone erreicht (Abschnitt 5.2.2.2). In Summe der bisher beschriebenen morphologischen Anpassungsmöglichkeiten verwundert es nicht, dass die Buchen dieser Arbeit keine Reaktion des grünastgereinigten Stammteiles auf verschiedene Strahlungsbedingungen zeigen. Es wird davon berichtet, dass die Buche auf stärkeren Schatten hin plastisch reagiert und die Allokation ihrer Assimilate anders verteilt, was zu morphologischen Unterschieden verglichen mit im Licht erwachsenen Pflanzen führt. Dabei wird von einer Optimierungs-Theorie gesprochen, wonach die Pflanze in die Organe am meisten Wachstumsstoffe investiert, die für die Aufnahme der am meisten limitierten Ressource verantwortlich sind (CHAPIN III et al. 1987, HEILMEIER et al. 1997) um ein funktionelles Gleichgewicht herzustellen.

Dabei ist jedoch zu trennen in die echte und die scheinbare morphologische Plastizität (BONOSI 2006 S. 55). Letztere bezeichnet der Autor als altersabhängige Veränderung, wobei er die wirkliche Plastizität als Variabilität innerhalb der ontogenetischen Ausprägungen (BAZZAZ 1997, VAN HEES 1997) ansieht (BONOSI 2006 ebd.). Die Erklärung liegt darin, dass mit zunehmendem Alter bei Bäumen mehr Assimilate in Speicher- und Stützgewebe verteilt werden müssen (HEILMEIER et al. 1994, BALANDIER et al. 2008), wobei die Lignifizierung der Stützgewebe ebenfalls Assimilate verbraucht (SIBLY & VINCENT 1997). Mit steigendem Wachstum erhöht sich die Gravitationskraft und windbeeinflusste Endlasten an Ästen werden größer, sodass auch die Reaktion des Baumes entsprechend darauf erfolgen muss (SIBLY & VINCENT 1997). Auch die schattensensitive Verzweigung ändert sich mit dem Alter, sodass die Kronenanteile mit Explorationstrieben, die durch lange Internodien gekennzeichnet sind, mit dem Alter kontinuierlich abnehmen

(THIÉBAUT 1981, NICOLINI & CARAGLIO 1994). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Schattentoleranz mit höherem Alter abnimmt (PETRIȚAN et al. 2007, PETRIȚAN et al. 2010). Junge Buchen reagieren auf Beschattung, indem sie die Wurzelmasse in Bezug auf die Gesamttrockenmasse reduzieren (BURSCHEL & HUSS 1964, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a, VAN HEES 1997, WELANDER & OTTOSSON 1997, AMMER 2000 S. 52, SCHALL et al. 2012), was PETRIȚAN et al. (2010) nach Bereinigung des Alterstrends nur noch sehr schwach wahrnehmen können. Letztlich hängt das damit zusammen, dass sich der Ressourcenbedarf anteilmäßig für verschiedene ontogenetische Stadien verschiebt. AMMER et al. (2008) sprechen davon, dass im Keimlingsstadium die Wurzelkonkurrenz einen überragenden Einfluss ausübt (MITSCHERLICH 1970 S. 55), der sich anschließend zugunsten des Konkurrenzkampfes um Licht reduziert (AMMER et al. 2010). Die Ergebnisse von LINNERT (2009 S. 73ff) untermalen diesen Aspekt, sie beziehen sich, wie in der vorliegenden Arbeit, auf ein Entwicklungsstadium, in dem die Konkurrenz um Licht vordergründig ist: Bei niedrigen Strahlungsmengen ist das Wurzelraumvolumen junger Buchen niedriger, außerdem ist es auch in Bezug auf das Kronenvolumen herabgesetzt. Bei diffusen Strahlungsmengen zwischen 30 und 40% des Freilandes scheint sich eine gleiche Allokationsrate zwischen Wurzel- und Kronenbiomasse anzudeuten (LINNERT 2009 S. 70). Besonders eindrücklich wird die Reaktion auf die Konkurrenz durch einen Altbestand bei Abtragungsexperimenten deutlich, wo sich die Bäume im Unterstand einer Allokation in den Wurzelbereich mehr oder weniger entledigen können. Bei PETRIȚAN et al. (2011) ist nachzulesen, dass junge Buchen nach Beseitigung der Altbestandswurzeln mehr Biomasse in den Spross verteilen, weil sie im Wurzelbereich keiner Konkurrenz mehr ausgesetzt sind. Dieses Verhalten ist umso ausgeprägter, je dichter die Altfichten beieinander stehen. Ähnlich gelangt ermitteln WAGNER (1999 S. 129) und LÜPKE & HAUSKELLER-BULLERJAHN (2004) einen Anstieg der Höhen junger Buchen mit steigender Abtragungintensität, wobei HAUSKELLER-BULLERJAHN (1997 S. 80ff) einen Abtragungseffekt auf Höhen- und Durchmesserwachstum bei hohen Strahlungsmengen über 50% des Freilandes feststellt. Sie führt das in der Hauptsache auf ein verbessertes Nährstoffangebot des Standortes zurück. Im Baumartenvergleich allerdings ist die Buche mehr als Eiche oder Douglasie in der Lage, im Schatten überhaupt noch in die Wurzelbiomasse zu investieren (LÜPKE & HAUSKELLER-BULLERJAHN 2004, PETRIȚAN et al. 2011), und durch längere Feinwurzeln ein größeres Bodenvolumen zu

erschließen (PETRIȚAN et al. 2011), was ihrer hohen Schattenertragnis zugute kommt. Wird allein die Wurzelmorphologie in Verbindung mit dem Altbestand betrachtet, stimmen die Angaben in der Literatur dahingehend überein, dass eine bessere Strahlungsversorgung in höheren Wurzelvolumina und Feinwurzelmassen bzw. -oberflächen resultiert (BROWN 1952, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965b, AMMER 2000 S. 49, LINNERT 2009 S. 74, PETRIȚAN et al. 2011).

Weil es sich um einen übergeordneten Zusammenhang zwischen Ressourcenverfügbarkeit und Wachstum handelt, trifft dies auch für die oberirdische Biomasse insgesamt und Teile ihrer Kompartimente zu. Die Angaben in der Literatur stimmen darin überein, dass durch Beschattung die Trockengewichte von Spross, Ästen, Blättern sowie Knospen abnehmen und Terminalknospenhäufungen verschwinden (BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a, BURSCHEL & SCHMALTZ 1965b, CANHAM et al. 1996, SAGHEB-TALEBI 1996 S. 107, WELANDER & OTTOSSON 1997, AMMER 2000 S. 49ff, CURT et al. 2005). Für die Stammbiomasse können BEAUDET & MESSIER (1998), KUNSTLER et al. (2005) und BONOSI (2006 S. 63f) keinen Zusammenhang mit der Strahlungsverfügbarkeit bei unterständigen Buchen feststellen. Diese Reaktionen der Bäume sind Ausdruck eines geminderten Wachstums (LINNERT 2009 S. 69), was auch der Grund für die schwächeren Grünastdurchmesser an den Buchen dieser Arbeit unabhängig vom Schaftabschnitt ist. Die Allokationsmuster zwischen Blättern, Ästen und Stamm sind entsprechend den Angaben in der Literatur bei unterschiedlichem Strahlungsgenuss verschieden. Oft wird berichtet, dass im Schatten der Anteil an der Blattbiomasse an der oberirdischen Trockenmasse bzw. der Trockenmasse des Jahrestriebes steigt (THIÉBAUT 1981, BEAUDET & MESSIER 1998, STANCIOIU & O'HARA 2006, BONOSI 2006 S. 51, LINNERT 2009 S. 85, ČATER et al. 2013). Offenbar ist das Bestreben, die geringe Strahlungsmenge noch bestmöglich auszunutzen, der Grund dafür. Bei Stamm- und Astbiomasse verringert sich vergleichsweise die Stammbiomasse im Schatten mehr (LINNERT 2009 S. 70), sodass die Bäume relativ gesehen starkastiger erscheinen. Das stellen auch CURT et al. (2005) an jungen gepflanzten Buchen unter Kiefernschirm fest. AMMER (2000 S. 53) bzw. AMMER (2003) kann das in einem Schattierexperiment mit Buchen nicht belegen, bei seinen Bäumchen nimmt die Astbiomasse stärker ab als die des Sprosses. Allerdings wird die Astbiomasse im Verhältnis zur Sprosslänge weniger reduziert als das Sprosstrockengewicht selbst. Dass eine Verschiebung der

Biomassenanteile durch modifizierte Umweltfaktoren nicht ins Uferlose gehen kann, belegen ENQVIST & NIKLAS (2002). Sie zeigen über eine breite Spanne an Baumartengruppen und Wuchsstadien, dass sich die logarithmierten Werte von Blatt-, Stamm- und Wurzelbiomasse proportional zueinander verhalten und sich mit Hilfe des festen Exponenten $\frac{3}{4}$ zueinander in Beziehung setzen lassen. Das von LINNERT (2009 S. 70) beschriebene Verhalten zeigen die Buchen in dieser Arbeit gleichermaßen, sehr ausgeprägt für den ASIX des stärksten Grünastes bis maximal 4,5 Höhe und abgeschwächt aber erkennbar auch für den ASIX-Wert des stärksten Totastes. Der Grund hierfür liegt scheinbar darin, dass die Äste durch das Astlängenwachstum auch eine entsprechende Stärke aufweisen müssen (NUTTO 1999 S. 91f, LANGSHAUSEN 2009 S. 141, STORCH/SCHULER 2011 S. 99ff), um die Stütz- und Leitungsfunktion erfüllen zu können. Dazu kommt, dass mit dünner werdenden Zweigen und Ästen deren Rindenatmung ansteigt und am Stamm die höchsten Werte erreicht (MITSCHERLICH 1975 S. 177), sodass der Baum mithilfe niedrigerer Respirationsverluste durch überproportionales Absenken der Stammbiomasse die Menge der Assimilate erhöhen kann. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass diese schattenbedingte Änderung der Assimilationsraten bei Stützgeweben eine morphologische Anpassungsstrategie der jungen Buche darstellt (BEAUDET & MESSIER 1998).

Was die Morphologie der Krone betrifft, äußert sich eine Beschattung darin, dass das größte Kronenvolumen im oberen Kronenbereich vorzufinden ist, sodass sich im Gegensatz zu Buchen, die im Licht erwachsen, keine bauchigen sondern trichterförmige Kronen ausbilden (LINNERT 2009 S. 75). Das gilt, trotz dass der größte Teil der Gesamtblattfläche bei unterständigen Buchen unabhängig von der Strahlung im zweiten bzw. dritten Kronenfünftel lokalisiert ist (LINNERT 2009 S. 80, PETRIȚAN et al. 2009). Weil Astlänge und Astdurchmesser in engem Zusammenhang stehen (NUTTO 1999 S. 81, HEIN 2004 S. 81, LANGSHAUSEN 2009 S. 141, STORCH/SCHULER 2011 S. 99ff), sind die entdeckten Formunterschiede mit der Verteilung der stärksten Grünäste gleichbedeutend. In den hier ermittelten Ergebnissen kommt dies allerdings nicht in diesem Maße zum Ausdruck, der relativ stärkste Grünastes setzt bei starker Überschildung nicht in höheren relativen Stammabschnitten an. Einerseits liegt das an den verschiedenen Altersgruppen der Buchen und zum anderen daran, dass nicht wie in der Arbeit von LINNERT (2009 ebd.) die gesamte Kronenlänge, sondern nur feste Abschnitte eingehen, die sich – je nach Höhe des Baumes – in verschiedenen relativen Baumhöhen

befinden. Es ist anzunehmen, dass sich der stärkste Grünast bezogen auf die gesamte Baumhöhe an der Grenze zwischen Licht- und Schattenkrone befindet, wie LANGSHAUSEN (2009 S. 144) an Buchen mit Bhds zwischen sieben und 35cm feststellt, wenngleich diese Frage nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist. Die Kronenmorphologie wird aber auch vom Höhenwachstum an sich mitbestimmt. STANCIOIU & O'HARA (2006) bemerken eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine Kronenform, in der die Äste mehr oder weniger in einer horizontalen Ebene angeordnet sind, sobald sich die Buche im Schatten befindet. Sie führen das auf das oben erwähnte, von NICOLINI (2000) beobachtete Verhalten zurück, wonach sich ein kurzer Höhentrieb nicht verdreht und die ursprünglich distiche Knospenanordnung beibehält. Möglicherweise liefert das auch einen Teil der Begründung, weshalb die Buchen der vorliegenden Arbeit im tiefen Schatten bei intensiver Altbaumnähe weniger schlechte, aufgelöste und folglich unzureichende Kronenformen ausbilden - ohne Einbezug eines plagiotropen Wachses. Außerdem formt sich im Schatten eine mehr breite als lange Krone aus (PRÉVOSTO & CURT 2004, BONOSI 2006 S. 80, STANCIOIU & O'HARA 2006, PETRIȚAN et al. 2009) wobei die letzteren Autoren schon einen Sättigungspunkt bei 20% Strahlungsmenge feststellen.

Diese Vielzahl an morphologischen Anpassungsmechanismen, zu denen junge Buchen im Schatten in der Lage sind, lassen sich nach CANHAM (1988) damit begründen, dass die metabolischen Kosten einer morphologischen Anpassung an Schattenbedingungen niedriger sind als die Kosten, besser physiologisch adaptiert zu sein. Schattentoleranz im Allgemeinen lässt sich nach KOBE et al. (1995, zit. n. PETRIȚAN et al. 2007) durch einen geringen Höhenzuwachs bei großen Strahlungsmengen und einer hohen Überlebensrate im tiefen Schatten grob umreißen, was PETRIȚAN et al. (2007) auch für junge Buchen im Vergleich mit jungen Ahornen und Eschen bestätigen können.

Bei vollem Strahlungsgenuss lassen sich die oben beschriebenen Anpassungsmechanismen auf physiologischer, anatomischer und morphologischer Ebene gewissermaßen umkehren. Allerdings kommt dann dazu, dass die Buche vermehrt zweite und auch dritte proleptische Wachstumsschübe, die sogenannten Johannistriebe, ausbildet (ROLOFF 1986 S. 20). Diese unterscheiden sich auch anatomisch von den Trieben des Frühjahrs, weil sie beispielsweise radialsymmetrisch angeordnete Knospen aufweisen und damit vom regulären distichen Verzweigungsmuster abweichen. Sind die Triebe noch nicht vollständig

verholzt und die Knospen noch zart, minieren im Sommer entweder Insekten in der Terminalknospe oder dieselbe fällt Frühfrösten im Herbst zum Opfer. Das Höhenwachstum wird dann von einer subterminalen oder einer Seitenknospe fortgesetzt (WEINREICH 2000 S. 73ff). Aber auch regelmäßige Spätfröste im Frühjahr während des ersten Wachstumsschubes führen dazu, dass das Höhenwachstum nahezu eingestellt wird (PEIK 1976). Kleinstandörtliche Unterschiede, die durch die Geländemorphologie hervorgerufen werden und teilweise noch Staunässe bedingen, verstärken diese unerwünschten Effekte ungemein (PEIK 1976.). Es kann außerdem vorkommen, dass ein proleptischer Trieb nicht mehr vollständig austreibt, was zu Knospenhäufungen und damit zu einem Verlust der Apikaldominanz führt (ROLOFF 1986 S. 20, SAGHEB-TALEBI 1996 S. 159). In der Summe sind das die Gründe für schlechte Wuchsformen wie Verbuschungen und Zwiesel, was LE TACON (1985) und ROLOFF (ebd). für Frühfröste und Insektenschäden besonders unterstreichen. Obwohl die morphologisch erwünschte Apikaldominanz mit steigender Strahlungsmenge zunimmt (PETRIȚAN et al. 2010), verliert sie sich durch die Schäden.

Was Krümmung und Schaftneigung angeht ist festzuhalten, dass sich nicht nur einzelne Äste dem Licht folgend ausrichten, sondern bei sehr knappen Strahlungsmengen die ganze Schaftachse dem Licht „hinterherwächst“. Das geschieht über einen längeren Zeitraum, in dem sich der Höhentrieb mehrmals in Folge an der Richtung, in der das meiste Licht einfällt, orientiert. Bei APHALO et al. (1999) findet sich dazu eine Erklärung. Ihnen zufolge besitzen Pflanzen Photorezeptor-Proteine, die sogenannten Phytochrome, die das Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht wahrnehmen und daran physiologische Prozesse und ihr Wachstumsverhalten ausrichten. Dazu gehört auch, Beschattung durch Nachbarn zu vermeiden. Die Pflanze nimmt zunehmende Konkurrenz um Licht in einem abgesenkten Rot-Dunkelrot-Verhältnis der Strahlung wahr, weil rotes Licht vermehrt durch andere Pflanzen absorbiert wird. Die Autoren können dieses genetisch fixierte Verhalten für Tabakpflanzen belegen. Andere Faktoren wie die Hangneigung, die speziell direkt über dem Boden gekrümmte Schäfte hervorruft (KURTH 1946 S. 623) können in der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen werden.

5.3.2 Wirkung des Standraums

Die Buchen im Voranbau stehen nicht nur mit dem Fichtenschirm im Wettstreit um Ressourcen, sondern dieser äußert sich sowohl zu den benachbarten Artgenossen in intraspezifischer Form (BEGON et al. 1991 S. 215) als auch zu den möglicherweise auftretenden Baumarten aus natürlicher Verjüngung wie Fichte, Weide, Eberesche und Birke in interspezifischer Form (BEGON et al. 1991 S.261). In beiden Fällen handelt es sich – bezogen auf den gesamten Bestand – um einen Wettbewerb innerhalb derselben Schicht, den FISCHER et al. (2016) auch als intra-hierarchisch bezeichnen. In dieser Arbeit beschränkt sich die Diskussion auf den Wettbewerb der Buchen untereinander, weil bei der Berechnung der Konkurrenzindices keine Baumartengewichtung oder –differenzierung vorgenommen worden ist (vgl. Abschnitt 5.1.1.2).

Der Standraum, den eine Buche zur Verfügung hat oder anders ausgedrückt die kleinflächige Dichte an Buchen bestimmt sehr entscheidend Wachstum und Qualität. Dafür sind maßgeblich die standraumgesteuerten Prozesse der natürlichen Astreinigung und das Dickenwachstum, die miteinander in Wechselwirkung stehen, verantwortlich (SPIECKER 1991 S. 14, NUTTO 1999 S. 3, HEIN 2004 S. 8). Weil die Holzqualität neben Krümmungen, Reaktionsholzbildung und Verletzungen von der inneren Astigkeit bzw. der Dicke des astfreien Mantels abhängt (HEIN 2004 S. 7, LANGSHAUSEN 2009 S. 15), sind die Einflussfaktoren darauf eingehend untersucht. So stellen SPIECKER (1991) und NUTTO (1999) für Eiche, LANGSHAUSEN (2009) und STORCH/SCHULER (2011) für Buche/Eiche und HEIN (2004) für Esche und Ahorn übereinstimmend fest, dass der konkurrenz-sensitive Radialzuwachs des Stammes (MÄKINEN & HEIN 2006) für einen großen Teil der äußeren und inneren Ästigkeit verantwortlich gemacht werden kann. Andere Studien verwenden dabei Konkurrenzmaßzahlen, Angaben zum Standraum bzw. Pflanzverband (BUES 1990, KÜSTER 2000) oder sie beziehen den hd-Wert als indirekten Vitalitäts- und Zuwachsweiser heran (KENK 1990, KINT et al. 2010). Es wird berichtet, dass der Radius des insbesondere gesundasthaltigen Kerns ansteigt (BUES 1990 S. 50ff, KÜSTER 2000 S. 130ff, STORCH/SCHULER 2011 S. 169ff) und sich die Astüberwallungsdauer dickerer Äste vergleichsweise verlängert (NUTTO 1999 S. 80f, HEIN 2004 S. 91ff, STORCH/SCHULER 2011 S. 155ff) wenn sich der Standraum vergrößert. Sicherlich handelt es sich bei der inneren Ästigkeit um ein Merkmal, das „... *weniger vom Standraum im Kultur- und Dickungsstadium als vielmehr von der Standraumentwicklung im Standgenholz und angehenden Baumholz bestimmt.*“ wird (SPIECKER 1991 S. 104), was auch KENK (1990) für

Fichtenbestände folgert. Wohl aber wirkt sich der Standraum als Äquivalent zu Menge und Qualität verfügbarer Ressourcen auf den zweiten qualitätsbestimmenden Prozess, die natürliche Astreinigung aus, wie SPIECKER (1991 S. 98) und HEIN (2004 S. 69ff) indirekt über den Radialzuwachs bzw. den Bhd zeigen können. Die Zusammenhänge, von denen berichtet wird zeigen einheitlich, dass sich eine geringere intra-hierarchische Konkurrenz (sensu FISCHER et al. 2016) auch negativ auf die äußere Ästigkeit auswirkt. Sinkt der Wettbewerb ab, sind größere Grünastdurchmesser und –zuwächse zu verzeichnen (BUES 1990 S. 32ff, KÜSTER 2000 S. 118ff, STORCH/SCHULER 2011 S. 113ff, WEIDIG 2016 S. 92) womit steilere Astansatzwinkel verbunden sein können (NUTTO 1999 S. 84f, HEIN 2004 S. 81, LANGSHAUSEN 2009 S. 142, KINT 2010, STORCH/SCHULER 2011 S. 104ff). Das stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit überein. Aus diesem Grund betonen die Autoren, dass in der Jugendphase ein ausreichender Dichtstand notwendig ist, um die Astreinigung schnell herbeizuführen und abzuschließen, bevor einzelne Individuen in ihrem Durchmesserwachstum gefördert werden (SPIECKER 1991 S. 125ff, NUTTO 1999 S. 137, HEIN 2004 S. 132ff). Als beeinflussende Faktoren nennen KINT et al. (2010) Höhe und Alter des Baumes, seine soziale Stellung, die Bestandesdichte und für Buche die Standortsfeuchte. Welche Äste zuerst absterben, hängt von ihrer Funktion für den Baum, ihrem Alter, ihrer Lage in der Krone und ihrer Wechselwirkung mit anderen Baumkompartimenten ab (MÄKINEN 1999, MÄKINEN & COLIN 1999). Bedingt durch artspezifische Wachstumsmuster (Architekturmodelle), den aufrechten Wuchs und die Apikaldominanz (BARTHÉLÉMY & CARAGLIO 2007) beschatten sich die Baumkronen mit fortschreitender Höhe zunehmend selbst (NICOLINI 1998). Das führt zu einer physiologischen und blattmorphologischen Anpassung, wie sie bei alten Buchen zu finden ist: der obere Kronenteil kann dadurch Lichtenergie optimal ausnutzen währenddessen der mittlere Bereich hauptsächlich für die CO₂-Aufnahme verantwortlich ist (SCARTAZZA et al. 2016). FLECK et al. (2003) zeigen, dass es vor allem die diffuse Strahlung ist, die im oberen Kronenbereich aufgenommen wird, weil Blätter und Äste steil angeordnet sind. Außerdem rollen sich Blätter bei hohen Strahlungsmengen. Auf diese Weise wird ermöglicht, dass Strahlung in tiefere Kronenschichten vordringen kann (FLECK et al. 2003). Dass dies bei steigender seitlicher Konkurrenz immer weniger an Menge ist, zeigen die Ergebnisse von LINNERT (2009 S. 87) bei vorangebauten Buchen: Verdoppelt sich der Konkurrenzwert, sinkt die Strahlungsmenge im unteren Kronenfünftel um fast

20% ab. Um die Funktionalität der gesamten Buchenkrone als Organ aufrechtzuerhalten, ändert sich deren Struktur im Laufe der Entwicklung. So variiert die Verzweigung im Laufe des Wachstums. THIÉBAUT (1981) teilt Buchenkronen nach den vorherrschenden Verzweigungsstrukturen an der Peripherie ein und stellt fest, dass bei ca. zehnjährigen Buchen der obere Kronenbereich Explorationstriebe ausbildet und sich darunter eine Zone mit vorwiegend Exploitationsstrukturen findet. Im Alter von 20 Jahren kommt dem Autor zufolge im unteren Kronenbereich eine dritte Zone, die der Stabilisation und Astreinigung, hinzu. Diese Typisierung innerhalb der Krone geht zwangsläufig davon aus, dass jene seitlich nicht bedrängt wird. Abgesehen von den Verzweigungsstrukturen ändern sich auch die Astwinkel. Sie sind in der Lichtkrone steil und vergrößern sich mit der Kronentiefe, was mit dem Astalter korrespondiert (NUTTO 1999 S. 93, LANGSHAUSEN 2009 S. 142, KINT et al. 2010, STORCH/SCHULER 2011 S. 126ff). Das wird auch in der vorliegenden Arbeit beobachtet. Allerdings können CLUZEAU et al. (1994) für Eschen verschiedener Wuchsstadien keinen Zusammenhang zwischen Kronentiefe und Astwinkel feststellen. Während der Ast-Absenkungseffekt mit steigenden Gravitationskräften und höheren statischen Belastungen dickerer Äste in Verbindung gebracht wird (STORCH/SCHULER 2011 S. 126ff), können das HEIN (2008) und HEIN et al. (2008) nicht nur nicht beobachten, sondern bei HEIN (2008) sogar den umgekehrten Zusammenhang feststellen. Ihm zufolge trifft das insbesondere für starke Äste zu, die sich im Laufe ihrer Entwicklung aufrichten und Teil der Lichtkrone werden bzw. bleiben. Wie MITSCHERLICH (1970 S. 5) schreibt, ist selbst bei wachstumsbedingter, größerer statischer Last nicht zwangsläufig mit einem Absenken des Astes zu rechnen. Stattdessen kann sich nur die Astkrümmung verändern. Äste sind an die Leitungssysteme des Stammes angeschlossen, ohne dass sie in jeder Lebensphase davon vollumfänglich Gebrauch machen. SPRUGEL et al. (1991) stellen dazu die Theorie der Ast-Autonomie auf. Wenn man der Definition von BEGON et al. (1991 S. 135ff) folgt und einen Baum als modularen Organismus auffasst, folgt daraus, dass dieser sich in wiederkehrende Untereinheiten verzweigt aber in seiner Gesamtform stark von den Umweltbedingungen beeinflussbar ist. Daher spricht ROLOFF (2001 S. 23) auch davon, dass sich das angeborene Architekturmodell durch Umweltbedingungen und im Laufe der Zeit ändert, sodass an einem Baum mehrere Architekturmodelle gleichzeitig auftreten können. Diese morphologische Plastizität (vgl. voriger

Abschnitt), die die Buche in besonderem Maße in jungen Entwicklungsstadien zeigt, hängt darüber hinaus auch von ihrer Vitalität und ihrem Reaktionsvermögen ab (ROLOFF 2001 S. 23). Wie die Strahlungsmenge physiologische und morphologische Reaktionen bei der Buche beeinflusst, ist bereits Gegenstand des vorigen Abschnittes. In Bezug auf die Qualität der Strahlung allerdings scheint es Unterschiede zu geben. Wenngleich der Fichtenoberstand die Wellenlängenanteile nicht nachweisbar verändert, ist das bei Buchenblättern aber der Fall (GEMMEL et al. 1996). In diesen Kontext sind die Ergebnisse von APHALO et al. (1999) zu stellen. Sie beobachten in einem NELDER-Experiment mit Birke, dass bei niedriger Dichte sowohl der dunkelrote als auch der hellrote Anteil des Lichtes wegen vorwiegender Reflexion steigen. Andersherum bewirkt eine hohe Dichte wegen zunehmender Absorption der hellroten Anteile, dass das Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis absinkt. Dieses veränderte Verhältnis kann durch Phytochrome wahrgenommen und in interne Entwicklungsprogramme umgedeutet werden. Die Autoren sprechen von einer Schattenvermeidungsreaktion der Pflanzen, indem sie ihre Äste in nicht oder wenig beschattete Bereiche hin entwickeln. Durch diese Fähigkeit sind die Bäume in der Lage, ihre Nachbarn wahrzunehmen, selbst wenn noch keine direkte Beschattung oder Berührung stattgefunden hat. Von den beiden genannten Studien ausgehend ist anzunehmen, dass diese Wahrnehmungs- und Schattenvermeidungs-Mechanismen auch in den Buchen-Voranbauten wirken. Sobald sich der Jungwuchs schließt und in das Dickungsstadium übergeht, ist in der Folge an den Buchen dieser Arbeit wiederholt festzustellen gewesen, dass Äste lange erhalten werden und dass sich nicht etwa eine „Kronenscheu“ (GUERICKE 2001 S. 121) wie bei den Lichtbaumarten Lärche oder Eiche entwickelt. Die Äste schieben sich vielmehr in die benachbarte Buchenkrone und treten sogar teilweise wieder aus ihr heraus. Die Belaubung sitzt gehäuft am Ende eines langen Astes. Meist hat der Ast dazu die Wuchsrichtung gewechselt, sodass der Ast vom Austritt aus dem Stamm aus gesehen seinen Verlauf ändert indem er mehr nach oben und nach der Seite abknickt. Dazu liefert die folgende Abbildung ein Beispiel aus den Versuchsflächen, bei denen die Buchen bereits in Dickungsschluss getreten sind.

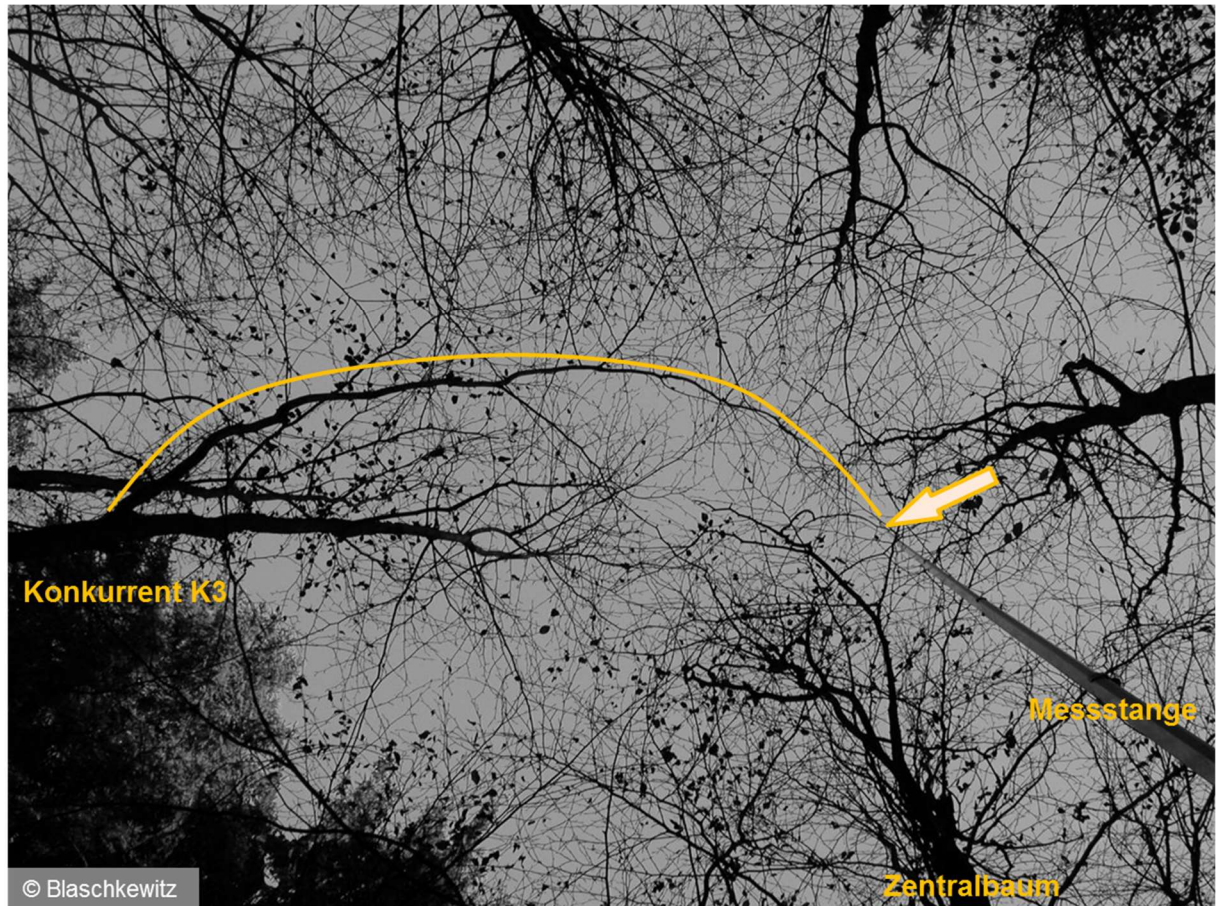


Abbildung 5-5: Kronenraum von Buchen im Dickungsschluss mit bereits eingesetzter Astreinigung aus der Froschperspektive.

Eingezeichnet sind Zentralbaum und Konkurrent K3 (der Baum befindet sich sowohl im Suchradius $1/3$ der Höhe als auch im Suchkegel mit Öffnungsweite von 60°). Die Messstange endet an der Spitze des am weitesten vom K3 horizontal ausladenden Astes, markiert durch den Pfeil. Der Verlauf des Astes ist durch den gelben Bogen schematisch gekennzeichnet.

Dieses „Durchstecken“ der Äste ist scheinbar eine ausgesprochene Fähigkeit der schattenertragenden Rotbuche. Durch FRECH et al. (2003) liegt dazu eine besonders interessante Analyse vor. Die Autoren zeigen für einen Laubmischbestand aus Esche, Hainbuche und Winterlinde, dass sich die Kronen der schattenertragenden Winterlinden untereinander stärker überlappen als das zwischen Eschen oder Hainbuchen untereinander der Fall ist. Auch die relative Kronenausdehnung auf den gleichartigen Nachbarn ist bei der Winterlinde am größten. Das unterstreichen die Ergebnisse von BONOSI (2006 S. 88) sehr klar. Er kann zeigen, dass die Buche im Vergleich zu Ahorn und Esche mit steigender Trockenmasse ihre Astlänge bezogen auf ihre Höhe enorm steigert. Sie bildet also

lange Äste aus. Allerdings findet er keinen Zusammenhang mit der Strahlung (BONOSI 2006 S. 83). Auch bei LINNERT (2009 S. 67) ist das der Fall. In seiner Analyse ist die Wuchsrichtung der Äste nicht von der Richtung des potenziellen Lichteinfalls bestimmt. Die längsten Äste in relativen Kronensektoren weisen alle Wuchsrichtungen auf und verleihen der Krone ein radialsymmetrisches Bild. Dasselbe finden LONGUETAUD et al. (2013) für einen intensiv gemischten ehemaligen Niederwald aus u. a. Eiche, Hainbuche, Ahorn und Buche. Allerdings variiert offenbar die relative Höhe in der Krone, in der die längsten Äste zu finden sind. LINNERT (2009 S. 96) findet exemplarisch bei niedrigen Seitendruckwerten die längsten Äste im unteren Kronenbereich vor, was sich bei stärkster Konkurrenz in das Gegenteil verkehrt. Möglicherweise handelt es sich bei der Wuchsrichtung der Äste um eine summarische Kettenreaktion. MUTH & BAZZAZ (2003) stellen in einem 65-jährigen Laubmischbestand fest, dass eine vermehrt asymmetrische nachbarschaftliche Konkurrenz u. a. infolge verlagerter Schwerpunkte der Nachbarkronen ebenfalls zu einer seitlichen Kronenschwerpunktverlagerung des Zentralbaumes führt. Zum selben Ergebnis kommen SCHRÖTER et al. (2012) in einem alten Buchenwald und AAKALA et al. (2016) in einem nordischen unbewirtschafteten Nadelwald mit lückiger Struktur. Allerdings handelt es sich in den genannten Studien nicht stringent um eine intra-hierarchische Konkurrenz. Dass die Astwuchsrichtung mit der Strahlung korreliert, bestätigen neben den Ergebnissen von AAKALA et al. (2016) auch die Befunde von GUERICKE (2001 S. 47ff) für einen Buchen-Durchforstungsversuch. In beiden Fällen weisen die Autoren einen Fototropismus in südliche und südwestliche Richtung nach. Von dieser „Nachbarflucht“ (MUTH & BAZZAZ 2003) abgesehen gibt es ähnlich wie in der vorliegenden Arbeit Beobachtungen, dass die Buche auch Beschattung ihrer peripheren Laubmasse durch Nachbarn ertragen kann. Das ist für Bestände ab mittlerem Alter untersucht. In Buchen-Lärchen-Mischbeständen und einer Altersspanne von 40-158 Jahren entwickelt GUERICKE (2001 S. 120) ein Modell für den Kronenbreitenzuwachs. Dieses bildet für die Buche überlappende Kronenbreiten in einer Zone von 0,5m ab. In der vorliegenden Arbeit wird zwar nicht der Richtungseffekt mit der Kronenausformung von Nachbarbäumen verknüpft, dafür kann mit Hilfe des neu entwickelten Ast-Konkurrenzindex‘ der Einfluss auf die qualitätsbestimmende Astreinigung nachgewiesen werden. Für den Grundflächenzuwachs hat eine solche Kronendurchdringung allerdings wenig Erklärungskraft, wenn sie als Komponente eines Konkurrenzindex‘ verwendet wird

(LAROQUE 2002). Offenbar sind die Erklärungsverluste durch die Streuungen im allometrischen Beziehungsgefüge mitverantwortlich. Andererseits zeigt es auch, dass der in dieser Arbeit eingeführte Astindex inhaltlich näher an der abhängigen Größe Totastdurchmesser liegt als der Grundflächenzuwachs. Jedenfalls haben Äste, die auf die Krone des Nachbarn hin zuwachsen, einen ressourcenmindernden Effekt auf dessen Äste. Was in dieser Arbeit jedoch nicht geklärt werden kann ist die zeitliche Änderung dieses Effektes. Es ist anzunehmen, dass ein bereits vollkommen „durchgesteckter“ Ast kaum Auswirkung mehr auf die Astmortalität in der betreffenden Krone haben kann.

Die Response eines Baumes auf einen hohen Seitendruck äußert sich an den Buchen der vorliegenden Arbeit darin, dass die stärksten Grünastdurchmesser für alle Schaftabschnitte kleiner sind und auch die Starkastigkeit abnimmt. Steiläste werden weniger wahrscheinlich, die Astreinigung schreitet schneller voran und ist intensiver. Tiefziesel treten in geringerem Ausmaß auf, weil die Ansatzhöhe des untersten Zwiesels signifikant weiter oben ansetzt. Allerdings sind sehr dicht erwachsene Buchen mehr gekrümmt und geneigt. Die Beobachtungen zur Ästigkeit und Astreinigung hängen mit einem veränderten Allokationsverhalten zusammen. STRUCK (1999 S. 91) stellt an jungen Eichen fest, dass die mittlere Biomasse pro Baum mit weiterem Pflanzverband zunimmt. Am deutlichsten beobachtet er diese Zunahme bei der Stamm- und Astbiomasse. GOCKEL (2016 S. 202) findet für junge Ebereschen in unterschiedlicher Wettbewerbssituation, dass tendenziell vor allem die Ast- und Blattbiomasse der Schattenkrone weniger Assimilate erhalten, bis die natürliche Astreinigung einzusetzen beginnt. Dass Äste, die kurz vor dem Absterben sind, eine negative Stoffproduktion haben, wird von MITSCHERLICH (1970 S. 43) angegeben. Werden sie entfernt, verändert der Baum seinen Assimilatstrom, indem der Durchmesserzuwachs ansteigt (MITSCHERLICH ebd.) Auch die Versuche von HENRIKSSON (2001) bestätigen diesen Zusammenhang. Werden einzelne Äste komplett beschattet, bewirkt das bei den unbeschatteten Ästen desselben Baumes größere Triebtlängen und mehr Langtriebe im Folgejahr. Der Autor macht dafür zum einen die Source-Sink-Theorie und zum anderen die Theorie des autonomen Astes verantwortlich (SPRUGEL et al. 1991). Sie geht davon aus, dass mit steigendem Astalter sich dieser sukzessive von der globalen Assimilatverteilung abkoppelt. Es scheint also nicht so zu sein, dass ein stark beschatteter Ast, der vorzeitig altert, als starke Assimilatsenke wirkt und etwa aus

weit entfernten Quellen (Source) Wachstumsbausteine bezieht wie das sonst der Fall ist (SPRUGEL et al. 1991). Im Gegenteil muss sich der Ast zunehmend von seinen selbst erbrachten Assimilaten erhalten. Ist das der Fall, bewirkt das die beobachtete Wachstumssteigerung (MITSCHERLICH 1970 S. 43, HENRIKSSON 2001). Letztlich ist dieses Verhalten die Voraussetzung dafür, dass die Pflanze trotz Selbstbeschattung weiter vielversprechenden Raum erobern kann, ohne dass die Energiebilanz aus dem Ruder gerät (SPRUGEL et al. 1991). Im Endeffekt mag das auch ein Teil der Erklärung dafür sein, dass Buchenäste Beschattung durch benachbarte Kronen lange ertragen können. Das wird außerdem durch die Beobachtungen von MÄKINEN (1999 und 2002) gestützt. Seinen Ergebnissen zufolge können Äste noch ein bis vier Jahre ohne Durchmesserzuwachs überleben, in Ausnahmefällen sogar bis zu sieben Jahren. Je tiefer die Äste ansetzen, desto länger können sie MÄKINEN (1999) zufolge ohne neue Jahrringe überdauern. Die Zersetzung übernimmt dann eine Pilzflora aus Ascomyceten bzw. Deuteromyceten, die je nach Stärke des toten Astes in ihrer Zusammensetzung variieren kann (BUTIN & KOWALSKI 1983). BÖHLMANN (1961 S. 33ff) kann anhand anatomisch-histologischer Untersuchungen im Bereich der Astabzweigung herausarbeiten, dass die Verbindung zwischen Ast und Stamm nur aus einer wenige Zellen breiten Zone leitender Siebröhren besteht. Beim sekundären Dickenwachstum bildet sich in der Astgabel dagegen eine Störzone aus nicht leitenden Tracheiden aus, die von Holzparenchym und hineinragenden Strahlen durchsetzt und damit segmentiert ist. Das bedeutet, dass die Astreinigung der Buche allmählich und nicht plötzlich wie bei der Eiche erfolgt, die im Abzweigungsbereich eine breite und nur an den Randbereichen verholzte Parenchymzone als „Sollbruchstelle“ vorhält (BÖHLMANN 1961 S. 37ff).

5.3.3 Wirkung von Genetik, Pflanzenbehandlung und Standort

Neben den Einflüssen, die die Umwelt auf die Morphologie bzw. äußere Wuchsform der jungen Buchen ausübt (ASSMANN 1961 S. 85), wird die genetische Determination formrelevanter Merkmale in ihrer Bedeutung unterschiedlich diskutiert. So nehmen KRAHL-URBAN (1951/53a, 1951/53b), HENGST (1964) und ROLOFF (2001 S. 45f) erbliche Astablaufwinkel und damit Kronen- und Stammformen bei der Buche an. Die Buchen-Herkunftsversuche von KRAHL-URBAN werten RAU et al. (2015) neu aus und kommen zum Ergebnis, dass bezüglich Geradschaftigkeit und Steilastigkeit Unterschiede zwischen den Herkünften bestehen. Bei der Zwieseligkeit allerdings ähneln sich die Herkünfte im Mittel.

Damit stützten RAU et al. (2015) die Befunde von HANSEN et al. (2003), die darüber hinaus auch Unterschiede in Durchmesser und Volumen sowie der astfreien Schaftlänge und damit dem finanziellen Ertrag konstatieren. Während HOSIUS et al. (2003) anhand genetischer Analysen die bereits von KRAHL-URBAN (1951/53a) und BOLVANSKÝ (1980/81) beobachteten Familienstrukturen²¹ zwieseliger Exemplare in Buchennaturverjüngung feststellen, ist das bei DOUNAVI et al. (2010) wiederum nicht der Fall. Die letzteren Autoren führen das auf Durchforstungsmaßnahmen im Oberstand und auf die fehlende Sensitivität der analysierten Genmarker zurück. Auch genetische Analysen liefern keinen eindeutigen Befund zur Zwieseligkeit. So können HUSSENDÖRFER et al. (1996) keinen genetischen Unterschied zwieseliger und nicht-zwieseliger Buchen feststellen. Wiederum deckt die Arbeit von TUROK (1996 S. 92ff) tendenzielle Unterschiede zwischen den genannten Kollektiven auf. Der Autor vergleicht neun polymorphe Genloci zwieseliger und nicht zwieseliger Buchen, von denen sich ein Genlocus signifikant unterscheidet. Trotzdem wertet er diesen Befund als zufällig, weil er davon ausgeht, dass die Verzweigungsform von einer noch größeren Anzahl variabler Genloci und deren Allelen bestimmt wird. Zwieselige Bäume sind ihm zufolge durch einen Homozygotenüberschuss an mehreren Genloci bei gleichzeitig vergleichsweise höherer genetischer Vielfalt charakterisiert (TUROK 1996 S. 95f), was auch HOSIUS et al. (2003) feststellen. Es sind insbesondere die seltenen Allele, die ihm zufolge bei Zwieseln häufiger vorkommen und ein größeres präadaptives Potenzial verglichen mit wipfelschäftigen Buchen darstellen (TUROK ebd.). Interessanterweise bemerken HUSSENDÖRFER et al. (1996) dasselbe in Bezug auf die proleptische Triebbildung. Junge Buchen neigen zu Johannistrieben, wenn sie an zwei untersuchten Genloci heterozygot sind. Die Autoren stellen das als positiv in Bezug zur Anpassungsfähigkeit der nächsten Generation dar. Das berührt unmittelbar die Frage, inwieweit eine Fixierung auf forstlich erwünschte Formen der Anpassungsfähigkeit zukünftiger Bestände abträglich ist. Schon allein starke Durchforstungseingriffe erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass seltene Allele allmählich aus der verbleibenden Population verschwinden, wenngleich deren Bedeutung für die Anpassungsfähigkeit der Bestände im Laufe ihres Lebens nicht eindeutig geklärt zu sein scheint (CREMER et al. 2005, KONNERT et al. 2007). Insofern ist das forstwirtschaftliche Bestreben nach guten Kronenformen als

²¹ Familienstrukturen definieren sich in der gleichen äußeren Form von Mutterbaum und der Naturverjüngung, die sich unmittelbar unter diesem befindet. Gleiche Merkmale wie Zwieseligkeit treten dann räumlich geklumpt in der Verjüngung auf und finden sich verstärkt unter zwieseligen Altbuchen (vgl. BOLVANSKÝ 1980/81).

Voraussetzung für hohe Qualitäten in Bezug auf die im Hinblick des Klimawandels notwendige Anpassungsfähigkeit (WAGNER 2004) auch durchaus kritisch zu hinterfragen.

In Bezug auf den Voranbau als Standardverfahren für den Umbau von Fichtenreinbeständen (WAGNER & LUNDQVIST 2005) wird die oft praktizierte Größensortierung in den Baumschulen als problematisch eingeschätzt (KONNERT & SCHMIDT 1996, KONNERT et al. 2007). Erstere Autoren zeigen anhand von Fichten- und Weißstannensämlingen, dass eine solche Sortierung genetisch eingegengtes Pflanzenmaterial hinterlässt und unterbleiben sollte. KONNERT et al. (2007) empfehlen außerdem nicht nur sorgfältiges Augenmerk auf die zu beerntenden Bestände und darin auf die auszuwählenden Erntebäume zu legen, sondern auch die Windrichtung beim Auslegen der Sammelnetze zu beachten, um die größtmögliche genetische Variation bei den Bucheckern sicherzustellen. Den Autoren zufolge ist die künstliche Bestandesbegründung mit dem größten Verlustrisiko genetischer Vielfalt verbunden, am besten schneiden kleinflächige Naturverjüngungsverfahren mit langem Verjüngungszeitraum ab. Es ist daher folgerichtig, dass MÜLLER-STARCK (1996) stammzahlarm begründeten Kunstverjüngungen ein größeres genetisches Risiko zuschreibt als Beständen mit engerem Pflanzverband. Neben dem Fakt, dass gepflanzte Buchenverjüngungen mit den benannten Risiken behaftet sind, tragen die Arbeitsgänge Roden in der Baumschule, Transport, Einschlag am Pflanzort, erneutes Ausheben und Transportieren bis zum Verwendungsort und der Pflanzschock an sich dazu bei, dass die Feinwurzeln massiv beeinträchtigt werden (BRINKMANN et al. 2003). Kommen Wurzelschnitte hinzu, verstärkt sich das negative Ausmaß bis hin zum Absterben der jungen Bäume (ANDERSEN 2001). Deshalb verbinden BUFFET et al. (1981) mit dem Verlust an (Fein-)Wurzelmasse ein höheres Risiko an Verzweiselungen, weil mit verzögerter Bewurzelung das Höhenwachstum leidet und simultan die Apikaldominanz abgeschwächt wird (DUPRÉ et al. 1986, ROLOFF & RÖMER 1989, NICOLINI & CARAGLIO 1994).

Für die Qualitätsholzerzeugung stellt sich die Frage, inwieweit der Standort einen Einfluss ausüben kann. In der Literatur werden diesbezügliche Fragen einzeln oder in Kombination mit unterschiedlichen Herkünften aufgegriffen. KLEINSCHMIT (1977), der den Buchenprovenienzversuch von KRAHL-URBAN bereits früher auswertet, bescheinigt Herkünften aus dem nördlichen Bereich des natürlichen Buchenverbreitungsgebietes schlechtere Formen. Bezüglich der Höhenlage gibt es

verschiedene Aussagen. Wenngleich MITSCHERLICH (1970 S. 20) und TEISSIER DU CROS (1981) für Buchen aus Höhenlagen eher einen durchgehender Stamm und eine schmale Krone beschreiben, finden DUPRÉ et al. (1986) keinen Einfluss auf die Anteile zwieseliger Buchen vor. Im Prinzip bestätigt das die Ergebnisse von BUVAT & THIÉBAUT (1981) sowie THIÉBAUT & PUECH (1983), bei denen Buchenkeimlinge bis zu fünf Wachstumsschübe mit Primärblättern haben, egal von welcher Höhenlage das Saatgut geerntet wurde. Aus einer Analyse von Buchenaltbeständen auf Standorten unterschiedlicher Trophie geht hervor, dass keine Unterschiede bezüglich der Kronenformen bestehen (MARVIE-MOHADJER 1975 S. 68ff). Allerdings sind auf guten Standorten Krümmung und Ästigkeit geringer (MARVIE-MOHADJER 1975 S. 79ff). Stattdessen scheint die Standortsgüte einen Einfluss auf die Zwieseligkeit auszuüben. Bei MARVIE-MOHADJER (1975 S. 68) steigt der Zwieselanteil tendenziell mit größerer Standortsgüte an. Insbesondere bei guten Standorten mit hohem Niederschlag treten Unterschiede im Wachstum und in der Johannistriebbildung zwischen Herkünften deutlich hervor (DUPRÉ et al. 1986, TEISSIER DU CROS & THIÉBAUT 1988) bzw. ist ein polyzyklisches Wachstum deutlich ausgeprägter (SAGHEB-TALEBI 1996 S. 95). Johannistriebe wiederum werden mit einem erhöhten Zwieselrisiko in Verbindung gebracht (TEISSIER DU CROS & THIÉBAUT 1988). Insgesamt gesehen kann die Einteilung von Zwieseln nach ihrer Dauerhaftigkeit und Beeinflussbarkeit durch waldbauliche Maßnahmen von DRÉNOU (2000) hilfreich sein. Seinen Ausführungen zufolge bedingt der genannte Polyzyklismus in der Vegetationsperiode wiederkehrende und unvermeidliche Zwiesel oder Verletzungszwiesel (ROLOFF 1986 S. 20ff, NICOLINI & CARAGLIO 1994), die in jedem Fall dauerhaft sind (NINGRE & COLIN 2007). Letztlich spielt das phänologische Verhalten im Zusammenhang mit dem Standort eine Rolle für die Morphologie junger Buchen. Buchen in tieferen Lagen treiben früher aus als solche im Gebirge, benötigen aber dazu insgesamt eine größere Temperatursumme (WOLF 2009). Mit der Verwendung nicht angepasster Herkünfte bzw. Ökotypen kann sich folglich das Risiko für Spätfrostschäden und folglich für eine schlechte Form steigern. Neben der Höhenlage hat auch der Kleinstandort eine entscheidende Bedeutung für formverschlechternde Spätfrostschäden. Das geht aus der Analyse von PEIK (1976) hervor, wo selbst unwesentliche Unterschiede in der Geländemorphologie für das Schadausmaß von Spätfrösten ausschlaggebend sind, jedoch keine Unterschiede zwischen Herkünften bestehen. In Summe lässt sich festhalten, dass es eine Wechselwirkung zwischen Genetik und Standort auf

die Qualität junger Buchen gibt (DUPRÉ et al. 1986), die letztlich daher rührt, dass eine Vielzahl genetischer Merkmale an der morphologischen Ausprägung beteiligt sind (TUROK 1996 S. 95f) und die Reproduktion der Buche einem räumlich und zeitlich komplexen Modus auf Bestandesebene unterliegt. Schon FABRICIUS (1929) konstatiert, dass Zwieseligkeit an sich nicht vererbt wird, sondern andere prädisponierende Eigenschaften. Das sind die Gründe dafür, weshalb KRAHL-URBAN (1962) keine eindeutigen Ergebnisse bei den Absaaten von Buchen verschiedenster Formeigenschaften feststellt.

Einen wesentlichen Punkt stellt die Reaktion von Buchen auf Trockenheit dar, sobald die globale Klimaerwärmung in die Betrachtung einbezogen wird. Die rasche Veränderung, die schneller voranschreitet als sich Waldbäume daran anpassen können (WAGNER 2004, WOLF 2009) geht auch mit einer standörtlichen Drift einher (EICHHORN 2016). Daher ist die Wasserspeicherkapazität ein zentrales Kriterium, nach dem die Anbauwürdigkeit von Baumarten beurteilt wird (EISENHAUER et al. 2016). Daher sind zentrale Fragen, ob es Unterschiede zwischen Herkünften bezüglich ihrer Anpassungsfähigkeit an Trockenheit gibt. WOLF (2009) vermutet, dass Provenienzen vom östlichen Rand des Verbreitungsgebietes geringere Leitfähigkeitsverluste durch weniger Embolien im Xylem aufweisen als westliche. Die mittlerweile angelegten Transferversuche haben ergeben, dass bayerische Buchen im trockeneren Bulgarien besser zurechtkommen als gedacht (HUBER et al. 2014). In einem Baumschulversuch zeigen die Autoren, dass das Auflaufergebnis in Bulgarien zwar deutlich schlechter, der Höhenzuwachs in den beiden ersten Vegetationsperioden nach der Keimung jedoch kaum geringer ist als bei den bulgarischen Buchen. Die Trockenheit führt im Wesentlichen nur zum Verlust der Johannistriebbildung (HUBER et al. 2014). Inwieweit Buchen ihre Vitalität durch Trockenheit einbüßen sodass Qualität und Wert beeinträchtigt werden bzw. verlorengehen, ist noch nicht abschließend geklärt. Den Aussagen von BONN (1998 S. 136f) zufolge reagieren Buchen im Radialzuwachs deutlicher auf extreme Witterungsereignisse als Eichen, trotz allem sind sie in seiner Untersuchung den Eichen auf einer breiten Standortsamplitude überlegen. Eine Ausnahme bilden ihm zufolge die staunassen oder grundnassen Eichenzwangsstandorte. Erst wenn extreme Trockenperioden in einer Frequenz von weniger als zehn Jahren auftreten, verliert die Buche zugunsten der Eiche an Konkurrenzkraft (BONN 1998 S. 141). CZAJKOWSKI & BOLTE (2006) schreiben, dass Buchen am östlichen Rand des Verbreitungsgebietes wesentlich besser sowohl an

Winterfrost als auch an Trockenheit adaptiert sind als solche aus dem Zentrum des Verbreitungsgebietes. Zu letzterem Aspekt verhelfen den östlichen Buchenherkünften eine größere Feinwurzelbiomasse, ein größeres Wurzel-Spross-Verhältnis und eine Reduktion der Wurzelquerschnittsfläche, die dem insgesamt niedrigeren Xylemwasserpotenzial Rechnung trägt (ROSE et al. 2009). Wie die anatomische und physiologische Reaktion von jungen Buchen auf Trockenheit ausfällt, zeigen die Studien von TOGNETTI et al. (1994), VAN HEES (1997) sowie LÖF & WELANDER (2000): Bei Wassermangel sinkt das Xylemwasserpotenzial enorm ab, die Blattbiomasse wird zugunsten der Wurzelbiomasse reduziert und die stomatäre Leitfähigkeit und damit die Transpirationsrate nehmen ab. Buchen, die im Schatten erwachsen sind, zeigen diesbezüglich noch eine Besonderheit: sie reduzieren den Chlorophyllgehalt der Blätter und stellen die waagrecht verlaufenden Äste zunehmend steiler, um den latenten Hitzaustausch zu reduzieren und Schädigungen des Photosyntheseapparates zu verringern (TOGNETTI et al. 1994). Offenbar gibt es bei der Trockentoleranz Unterschiede zwischen Buchen, die dem östlichen bzw. südöstlichen Rand des Verbreitungsgebietes entstammen und solchen, die aus dessen Zentrum kommen (ROSE et al. 2009): So haben erstere ein höheres Wurzel-Spross-Verhältnis an Trockenmasse und eine größere Feinwurzelbiomasse bei gleichzeitig niedrigerer Wurzelquerschnittsfläche. Damit tragen sie dem niedrigeren Xylemwasserpotenzial Rechnung (ROSE et al. 2009). Auch in der Hinsicht sich ändernder Klimaverhältnisse ist ein strikter Fokus auf Qualitätsziele mit Buche zu hinterfragen. Vielmehr kann eine höhere Anpassungsfähigkeit und genetische Vielfalt dazu beitragen, dass die Vitalität von Buchenbeständen nicht zu sehr gefährdet wird. Inwieweit sich eine dahingehend völlige Überarbeitung der bisherigen Herkunftsempfehlungen notwendig macht, sollte in die Überlegungen zukünftiger Buchenbewirtschaftung zumindest mit einfließen bzw. abgeprüft werden.

6 Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen

6.1 Einführung

Der folgende Abschnitt enthält eine Zusammenfassung über die **Modellergebnisse**, die in dieser Arbeit ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden die Haupteinflussfaktoren „Überschirmung“ und „Standraum“ wegen der linearen bzw. binär logistischen Modellierung vereinfacht in zwei Stufen eingeteilt, denen die einzelnen Wachstums- und Qualitätsmerkmale zugeordnet werden (vgl. Abb. 6-1 linke Grafik). Das Zuordnungs-Kriterium lautet, dass das jeweilige Merkmal bei der gewählten Schirm-Standraum-Kombination die forstlich am meisten erwünschte Ausprägung hat. Wichtig ist hierbei, dass es sich nur um eine vereinfachte Übersicht handelt, die letztlich nur für den Rahmen der hier untersuchten Daten gültig sein kann. Die Überschirmungsdichte und der Standraum sind in den Modellen durch verschiedene Indices und variierende Wertebereiche gekennzeichnet, sodass es sich bei dieser Zuordnung nur um eine Näherung mit dem Hinführen auf praktische Schlussfolgerungen handeln kann. Es zeigt sich sehr deutlich, dass enge Standräume eine Vorrangstellung bei minimaler Ästigkeit, Zwieseligkeit und maximaler Astreinigung einnehmen. Nur bei der Stammform, ausgenommen Zwiesel, sind weite Pflanzverbände vorteilhaft. Andererseits geht die hohe Dichte im Voranbau zulasten der Vitalität und Stabilität der jungen Buchen.

Für **praktische Empfehlungen** sind diese so aufgeteilten Modellergebnisse nicht zielführend, weil allein aus der Natur der linearen bzw. binär logistischen Modelle heraus keine Optimalpunkte im Rahmen der Wertespektren ableitbar sind; eine gewisse Ausnahme bilden die logarithmisch transformierten Werte der Schirmdichte in einigen Modellen. Es stellt sich in der forstlichen Praxis die Frage gegenseitiger Ersetzbarkeit von Schirm- und Voranbaudichte (LEONHARDT & WAGNER 2006), um die Produktionsziele „Qualitätsholz“ schnell und kostengünstig erreichen zu können (vgl. Kapitel 1). Deshalb wird für die praktischen Empfehlungen jeweils eine mittlere Schirm- und Voranbaudichtestufe eingeführt, um solche Optimalpunkte greifbarer machen zu können (vgl. Abb. 6-1 rechte Grafik). Anhand des Schemas lassen sich zwei Aspekte beleuchten. Das beschert die Möglichkeit, Wechselwirkungen, die aus Gründen inakzeptabler Multikollinearität nicht in den Modellen enthalten sind (vgl. Abschnitt 5.1.2.2), näherungsweise greifbar zu machen.

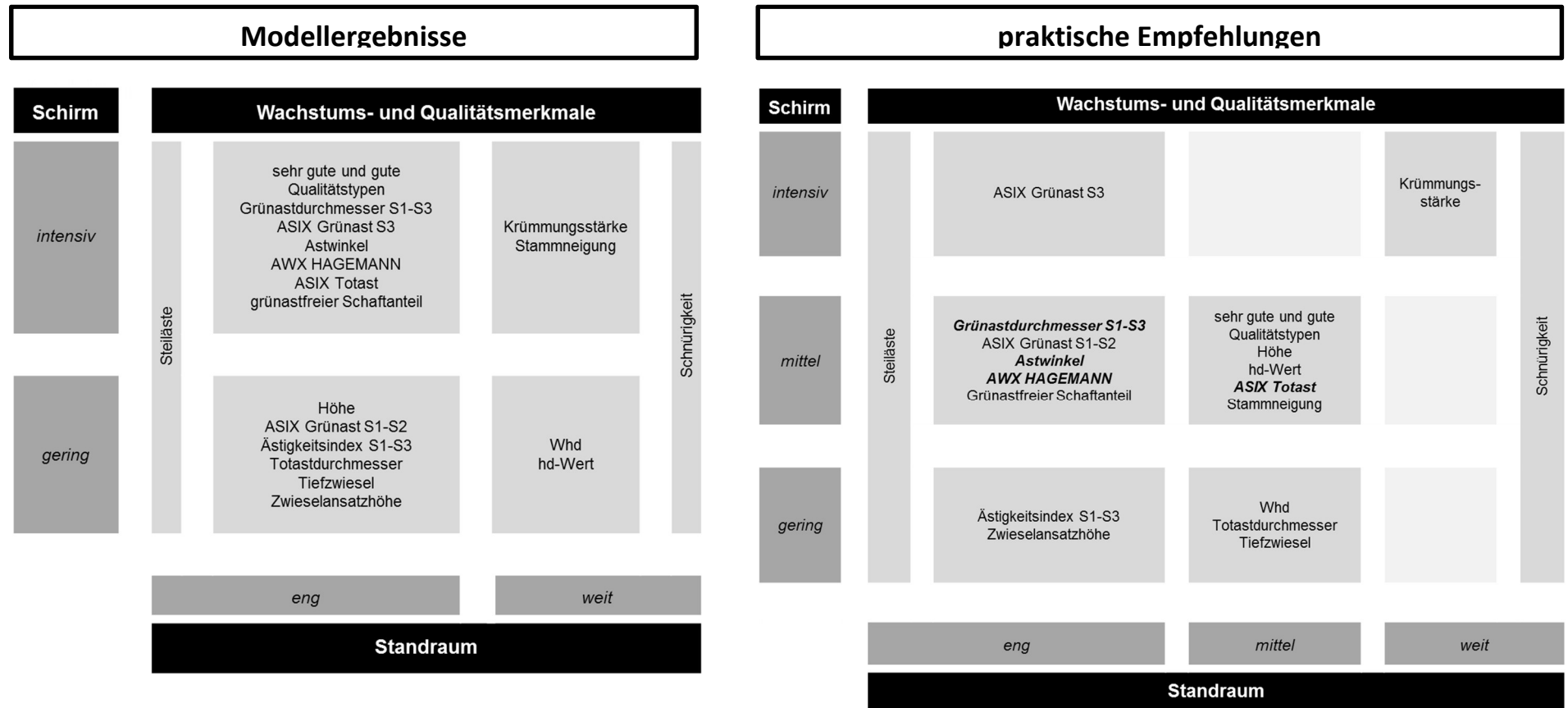


Abbildung 6-1: Modellergebnisse und praktische Empfehlungen für hohe Qualität vorangebauter Buchen nach Einzelmerkmalen.

Die Modellergebnisse heben die enorme Bedeutung engen Standraums für hohe Qualitäten hervor, dichte Überschirmung wirkt sich positiv auf die Ästigkeitsparameter aus, geht aber mit einem Vitalitäts- und Stabilitätsverlust einher. Die praktischen Empfehlungen zeigen, inwieweit auf einen intensiven Altbestandsschirm verzichtet werden kann, ohne Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen. Das geht mit einem Vitalitäts- und Stabilitätsgewinn der Voranbau-Buchen einher. Wird ein möglichst weiträumiger Pflanzverband angestrebt, ist eine gleichbleibende Qualität bei den **fettkursiv** hervorgehobenen Merkmalen möglich, wenn sich die Schirmdichte um eine Stufe nach oben zu „intensiv“ verschiebt.

Die Grafiken dienen im Folgenden dazu, für den Fichtenaltbestand als auch für die Pflanzendichte bzw. den Standraum der jungen Buchen im Voranbau dezidierte Schlussfolgerungen abzuleiten. Dahingehend sind die Wachstums- und Qualitätsmerkmale anhand der Modellkurven aber auch der Datenstreuungen (vgl. Kapitel 4) den Schirm-Standraum-Kombinationen zugeteilt.

6.2 Empfehlungen für den Fichtenaltbestand

Erstens wird gefragt, welche Überschildungsdichte ausreicht, um keine Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen (Kapitel 1, Frage 1b). Es zeigt sich, dass ein **lange Zeit dicht gehaltenes Fichtenaltholz** nicht notwendig ist, um eine akzeptable Ästigkeit, Astreinigung und weniger Zwiesel hervorzubringen. Lediglich die relativen Grünastdurchmesser im dritten Schaftabschnitt bedürfen für eine geringe Dimension hohe Altbestandsdichten. Im Höhenrahmen der hier untersuchten Voranbauten bis 11,70m ist für den Schaftabschnitt von 3,0 bis 4,5m Höhe jedoch zu erwarten, dass sich der Zeitpunkt, zu dem sich engere Standräume maximal in ihrer Wirkung auf die Starkästigkeit in dieser Höhe auswirken, in der unmittelbaren Zukunft liegt. Daher sind dichte Altholzschirme auch für dieses Merkmal keine unausweichliche Forderung.

Die Absenkung der **Altbestandsdichte auf ein mittleres Niveau** geht vielmehr mit einem Gewinn an Stabilität und Vitalität der jungen Buchen einher, was die Produktionszeiträume nicht zu sehr in die Länge zieht. Voraussetzung dafür ist allerdings eine ausreichend hohe Dichte im Buchen-Voranbau. Aus dem Wertebereich der Daten und anhand der Genauigkeitsüberprüfung in Abschnitt 5.1.1.3 umfassen mittlere Überschildungsdichten in dieser Arbeit den Bereich zwischen circa 25 und 40m²/ha Grundfläche. Insofern handelt es sich um Halbschattbedingungen, denen eine besonders günstige Wirkung auf die Qualität junger Buchen zugesprochen wird (PETERSEN & WAGNER 1999). Diese Größenordnung stimmt auch mit den Schlussfolgerungen von LINNERT (2009 S. 114) überein, der bei einer Strahlungsmenge von ca. 30 bis 40% des Freilandes die am besten geformten jungen Buchen vorfindet. Das bedeutet, dass – übersetzt in verbale Beschreibungen praktischer Natur – lockere Fichtenbestände mit kleinen und mittleren Lückenstrukturen (SPELLMANN & WAGNER 1993) die nachgefragte Funktion der Buchenwertholzerziehung am besten erfüllen. Auch DUPRÉ et al. (1986) sprechen vom besten Kompromiss zwischen Vitalität und Qualität junger Buchen im Halbschatten, ebenso

empfehlen KURTH 1946 S. 655, BROWN 1955, BUFFET et al. (1981) sowie MOREL & PLANCHAIS (2000) dringend eine Überschirmung, schlechtestenfalls seitliche Beschattung. Daher sehen die traditionell wertholzorientierten französischen Bewirtschaftungsrichtlinien für Buche Halbschattbedingungen als Optimum vor, um gute Qualitäten bei jungen Bäumen zu erzielen (ONF 2005 S. 31).

Über **lange Zeit dicht gehaltene Fichtenschirme** sind im Forstbetrieb nicht ohne weiteres zu gewährleisten, weil die Baumart mit höherem Alter je nach der standörtlichen Prädisposition gegenüber Sturmschäden und Insektenkalamitäten mit Stabilitäts- und damit Produktionsrisiken behaftet ist (THOMASIU 1990, SPELLMANN 1996). Auch vor dem Hintergrund des Klimawandels, der mit steigender Erwärmung und saisonal reduzierten Niederschlägen bzw. mit häufig auftretenden Wetterextremen einhergeht (KLINCK et al. 2016), ist eine sehr dichte Überschirmung mit intensiver Wurzelkonkurrenz der Altbäume auf die Verjüngung nicht empfehlenswert (AMMER 2017). Der Aspekt der Wurzelkonkurrenz zwischen Altholz und Vorausverjüngung ist bereits intensiv im Abschnitt 5.3.1 diskutiert. In diesem Zusammenhang spricht WAGNER (2008a) davon, bei der Absicht, die Bestockungsgrade mit dem Ziel der Konkurrenzregelung anzupassen, sorgfältig die zulässigen Nebenbedingungen (Standorte, potenzielles Gefährdungsrisiko) eines solchen Vorgehens abzuprüfen. Ihm zufolge verbieten sich abrupte Eingriffe in ältere Bestände, sodass die langfristige Vorbereitung im Zuge einer hochdurchforstungsartigen Waldpflege als sinnvoll erachtet wird. Um der Argumentation von TIEBEL et al. (2016) zu folgen, schwächt ein sehr dichter Oberstand darüber hinaus den qualitätsfördernden Dichtstand des Voranbaus ab, weil sich durch die Stämme Fehlstellen im Pflanzverband ergeben. Bei sehr dichten Fichtenbeständen laufen die Buchen Gefahr, plagiotrope Wuchsformen auszubilden (WAGNER & MÜLLER-USING 1997, MOREL & PLANCHAIS 2000, STANCIOIU & O'HARA 2006), die der Qualität nicht förderlich sind. Daher kommt der Wirtschaftler schnell in die Situation, wachstumsverbessernde Nachlichtungen im Oberstand vorzunehmen. Das ist umso mehr der Fall, je älter die Buchen werden, weil sich der Anteil der Blattbiomasse zugunsten von Stützstrukturen wie Ästen und dem Stamm verschiebt (BALANDIER et al. 2008). Weil häufiges Nachlichten je nach Erntetechnologie mehr oder weniger mit Schlagschäden im Voranbau einhergeht, ist auch aus diesem Grund von allzu dichten Fichtenschirmen bei der Begründung des Voranbaus abzuraten. Nicht überall sind bestandesschonende

Stehendentnahmen der Fichten durch Kettenharvester mit Baumhalter durchführbar, sodass auch die motormanuelle Fällung über Verjüngung nicht wegzudenken ist. Häufiges Nachlichten ist dann am besten vermeidbar, wenn die Bestände über hochdurchforstungsartige Eingriffe lange vorher auf den Voranbau vorbereitet werden. Dann dürften Hiebsopfer kaum in Erscheinung treten (PETERSEN & WAGNER 1999, Frage 1a Kapitel 1). PETERSEN & WAGNER (1999) empfehlen anhand ihrer Untersuchung von Buchenvoranbauten unter Kiefer einen Bestockungsgrad von 0,8, den sie als passable Lösung für das Problem der Hiebsopfer gekoppelt mit ausreichendem Wachstum der Verjüngung herausarbeiten. Für Fichtenaltbestände liegt dem Wissen der Verfasserin bislang keine vergleichbare Analyse vor.

Ob es ratsam ist, die Grundfläche des Altbestandes vor der Begründung bzw. beim Erreichen des Bestandesschlusses auf unter 25m²/ha abzusenken und damit in den Bereich **geringer Überschirmungsdichten** zu gelangen, hängt von den standörtlichen Gegebenheiten ab und bedarf einer einzelfallweisen Entscheidung. Wie die Abbildung 6-1 zeigt, wirkt sich das negativ auf die Grünästigkeit aus (LINNERT 2009 S. 68). Wichtig sind in diesem Zusammenhang auch die räumliche Verteilung der Altfichten auf der Fläche und eine langjährige Vorbereitung der Fichtenstämme durch möglichst lange Kronen hin zu einer großen Einzelbaumstabilität. An dieser Stelle ist – methodisch gesehen – die räumliche Optimierung des Fichtenschirms in Bezug auf seine Funktionalität im Sinne einer Qualitätsbeeinflussung der jungen Buchen ein vielversprechender Ansatz, um detaillierte Informationen herzuleiten (WAGNER 2008b). Ein weiteres Produktionsrisiko, das mindestens bei geringen Überschirmungsdichten vermehrt auftritt, ist die interspezifische Konkurrenz von Fichtennaturverjüngung (SPELLMANN & WAGNER 1993, LÜPKE & SPELLMANN 1997, AMMER 2004). AMMER (2004) berichtet davon, dass ab einer Strahlungsmenge von 45-50% des Freilandes und mehr die Buche in Bezug auf das Höhenwachstum, das Kronenvolumen und die oberirdische Biomasse hinter der Fichte zurückbleibt. LÜPKE & SPELLMANN (1997) setzen diese Grenze bereits bei 15-30% relativer Strahlung. Aber eine Bestockungsgradabsenkung kann auch mit einer starken Konkurrenz durch vermehrt angesamte Weichlaubhölzer den Buchen zu schaffen machen: PETERSEN & WAGNER (1999) stellen ein Ansteigen der hd-Werte fest. Je nachdem, welches Verjüngungsziel auf der Fläche besteht, kann dies durch eine zu starke Auflichtung gefährdet sein, wenn nicht zusätzliche Maßnahmen der

Mischungsregulierung angedacht werden (AMMER & DINGEL 1997, PETERSEN & WAGNER 1999). Was wachstumshemmende, dichte Brombeerdecken angeht, plädieren SCHREINER et al. (2003) dafür, die Überschirmung zunächst dicht zu halten, bis die Buchenkunstverjüngung eine Höhe von 1,5m erreicht hat und der Gefährdungszone entwachsen ist. Erst dann soll ihnen zufolge der Altbestand auf locker bis licht gestellt werden. Das bedarf einer genauen Kenntnis der örtlichen Verhältnisse. Dass Voranbauten im Rahmen des Funktionsumbaus zur Qualitätsholzerzeugung zweifelsohne eines Schirms bedürfen, darauf hat WEIDIG (2016 S. 170f) gestützt auf fundierte Ergebnisse hingewiesen.

Buchen **ohne diesen schützenden Schirm** entwickeln ihm zufolge eine zunehmend schlechte Qualität, die unter diesen Bedingungen auch nicht durch einen engen Pflanzverband ausgeglichen werden kann (WEIDIG 2016 S. 173). Dass Freiflächenbedingungen, die nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind, dem Ziel Qualitätsholz abträglich sind, ergibt sich aus den Diskussionspunkten in Abschnitt 5.3.1 unter Einbezug der einschlägigen Literatur.

In Bezug auf die **Dauer einer Überschirmung** (Frage 1c Kapitel Einleitung) lässt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit folgern, dass erst nach 20 Jahren mit größtenteils konstanten Überschirmungsbedingungen (vgl. Abschnitt 2.2) die Unterschiede in der Schirmhaltung deutlich zutage treten. Allerdings ist der Anteil an Flächen bzw. Probebuchen im mittleren Alter von zehn bis fünfzehn Jahren in den Daten sehr gering. Die Frage, wie lange ein Schirm gehalten werden soll, ist im Kern mit dem Produktions- und Wirtschaftsziel Qualitätsholz und der standörtlich angestrebten astfreien Schaftlänge verbunden (SPIECKER 1991 S. 125, HEIN 2004 S. 203, LANGSHAUSEN 2009 S. 177). Die folgende Grafik bildet modellhaft ab, wie sich Höhe und astfreie Schaftlänge der hier gemessenen Buchen in Bezug auf ausgewählte Werte der Grundfläche und des Alters verhalten. Außerdem ist das Merkmal der Zwieselansatzhöhe modellhaft mit abgebildet, um einen Weiser für die Qualität der Bäume zu haben.

6 Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen

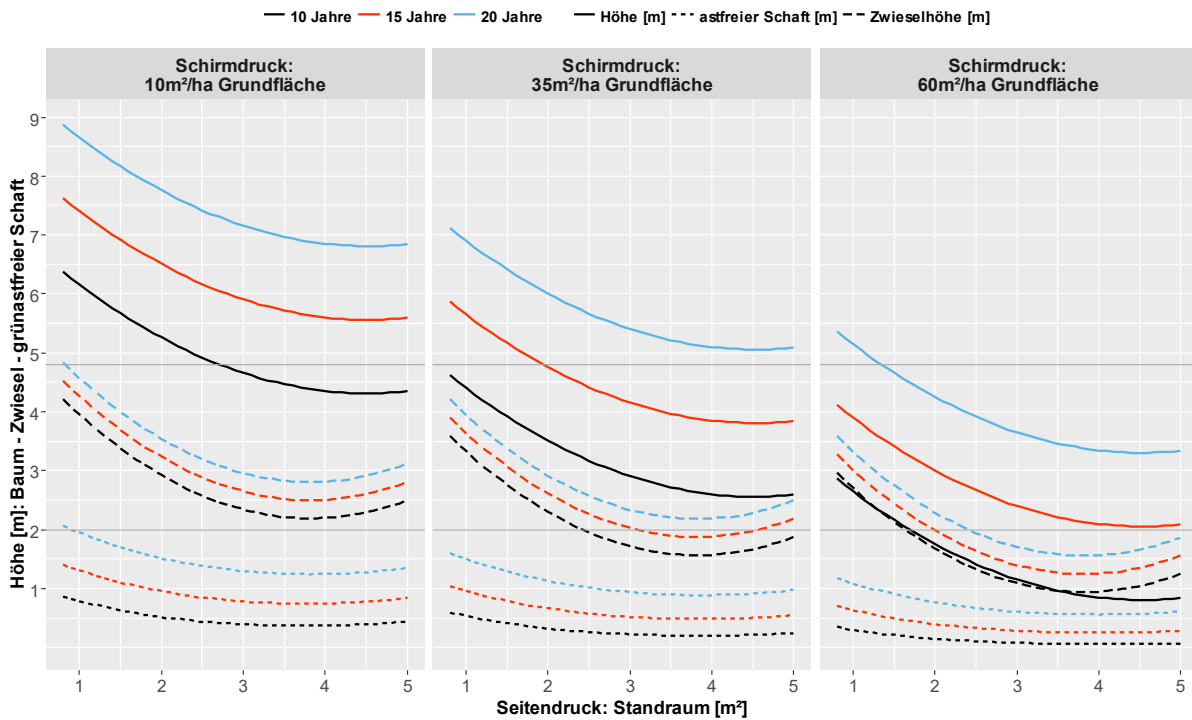


Abbildung 6-2: Höhe, Astreinigung und Ansatzhöhe des untersten Zwiesels über dem Standraum nach Grundflächenstufen des Altbestandes.

Die grauen durchgezogenen Linien markieren in Höhe von 2m und 5m dienen der einfacheren Interpretation. Die zugrundeliegenden Modelle sind unten aufgeführt²².

Wie ersichtlich ist, variiert die Ansatzhöhe des ersten Grünastes (astfreier Schaft) signifikant mit dem Alter. Die schnellste Reinigung von Grünästen haben den Schätzungen zufolge solche Bäume, die nur sehr geringfügig überschirmt, aber sehr dicht gepflanzt sind. Sie erreichen Werte bis zu 2m astfreier Schaftlänge in 20 Jahren (untere graue durchgezogene Linie). Gleichzeitig setzen die forstlich

²² Zugrunde liegen baugleiche Modelle für die Höhe und das grünastfreie Schaftprozent. Die Modellwerte des astfreien Schaftes leiten sich aus den Schätzungen für die Höhe und das grünastfreie Schaftprozent ab, weil das baugleiche Modell für die Ansatzhöhe des ersten Grünastes nicht gültig ist.

$$\text{geschätzte Baumhöhe [m]} = 5,55(1,56)^{**} \text{ Interzept}_{ij} - 0,07(0,01) * \text{Grundfläche [m}^2/\text{ha]}_{ij}^{***} - 1,34(0,63) * \text{Standraum}_{ij} * + 0,15(0,10) * (\text{Standraum}_{ij}^2)^{ns} + 0,23(0,06) * \text{Alter}_{ij}^{**} + u_i * \text{Bundesland} + u_{ij} * \text{Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{geschätztes grünastfreies Schaftprozent [\%]} = 7,99(7,85)^{ns} \text{ Interzept}_{ij} - 0,03(0,07) * \text{Grundfläche [m}^2/\text{ha]}_{ij}^{ns} - 5,25(3,27) * \text{Standraum}_{ij}^{ns} + 0,76(0,50) * (\text{Standraum}_{ij}^2)^{ns} + 0,96(0,33) * \text{Alter}_{ij}^{**} + u_i * \text{Bundesland} + u_{ij} * \text{Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{geschätzte Zwieselansatzhöhe [m]} = 5,01(1,10)^{***} \text{ Interzept}_{ij} - 0,03(0,01) * \text{Grundfläche [m}^2/\text{ha]}_{ij} * - 1,70(0,58) * \text{Standraum}_{ij}^{**} + 0,22(0,09) * (\text{Standraum}_{ij}^2) * + 0,06(0,063) * \text{Alter}_{ij}^{ns} + u_i * \text{Bundesland} + u_{ij} * \text{Kernfläche.Versuchsfläche in Bundesland} + \varepsilon_{ijk}$$

Angabe der Standardfehler in Klammern, Signifikanzen mit Sternsymbolik bzw. ns, VIF-Werte alle unter drei.

unerwünschten Zwiesel am höchsten an. Bei sehr dichter Überschildung wird durch das kümmernde Wachstum und damit späten Dichtschluss in derselben Zeit rund ein Meter astfreie Schaftlänge verloren – die astfreie Schaftlänge beträgt nur noch 1m. Im Vergleich zur linken Grafik ist der unterste Zwiesel nicht bei 5m Höhe (linke Grafik und obere graue durchgezogene Linie), sondern ca. 1,5m niedriger hinzunehmen (rechte Grafik blaue gestrichelte Linie). Würde man bei gleichem Alter einen sehr dichten Schirm abrupt räumen (rechte Grafik), wären die Zwieselansatzhöhen selbst bei engem Pflanzverband deutlich niedriger als bei niedrigeren Schirmdichten (mittlere und linke Grafik). Das heißt folglich, dass Flächen mit einem hohen Bestockungsgrad des Altbestandes länger eines schützenden Schirms bedürfen und keinesfalls abrupt geräumt werden sollten (WAGNER 2008b). Wie lange tatsächlich ein Schirm notwendig ist, kann mit den vorliegenden Daten aber nicht detailliert beantwortet werden, weil dazu z. B. in einer unechten Wuchsreihe unterschiedlich alte Flächen mit verschiedenen Räumungszeitpunkten miteinander verglichen werden müssten. Es ist außerdem hier anzumerken, dass die Abbildung 6-2 nur einen Anhalt über die Zusammenhänge bieten kann, weil die Streuungen in den Daten vor allem bei gering überschilderten Buchen sehr groß sind: Die maximale grünastfreie Schaftlänge beträgt in den Daten 4,90m bei einer 20jährigen Buche, die bei 21m²/ha Grundfläche und einem Standraum von 1,25m² (8.000 Stck./ha) aufwächst. Insgesamt gesehen lässt sich aber folgern, dass bei mittleren Überschildungsdichten rund 20 Jahre lang ein schützender Oberstand für die jungen Buchen notwendig ist und diese Zeit sich bei geringfügiger Überschildung um ca. fünf Jahre verkürzen lässt. Ob sich über diese Zeitspanne hinaus eine Überschildung für eine gute Qualität notwendig macht, darüber kann die vorliegende Arbeit mangels älterer Buchen keine direkte Auskunft mehr geben. Lediglich die obige Modellrechnung liefert Hinweise darauf, dass für eine angestrebte zwieselfreie Schaftlänge von mindestens 6m längere Überschildungszeiten als 20 Jahre notwendig sind weil die maximale zwieselfreie Schaftlänge in den Daten bei 5m liegt (blaue gestrichelte Linie in der linken Grafik). Voraussetzung für eine zufriedenstellende Qualität, die in kurzer Zeit erreicht werden soll, ist allerdings in jedem Fall ein enger Pflanzverband. Praktische Beispiele, die nach 15 bis 20 Jahren den Schirm räumen, liefern SCHÜMANN (1968) und KLEIN (1983). Weil junge Buchen nach einer Räumung innerhalb von sechs Jahren schon messbar mit einer Qualitätsverschlechterung

reagieren (WEIDIG 2016 S. 70), bleibt wenig zeitlicher Handlungsspielraum um die Überschirmungszeit noch weiter zu verkürzen. Wenn die Räumung dann ansteht ist zu fragen, ob sie dann ohne große Verluste im Buchenvoranbau technisch durchführbar ist. Das hängt von der Flächengröße des Voranbaus und der Feinerschließung des Bestandes ebenso ab wie von der verfügbaren Technik (Starkholzharvester). Im Zweifelsfall ist es eine Überlegung wert, Teile des Oberstandes von den Buchen als Überhälter einwachsen zu lassen.

6.3 Empfehlungen für die Pflanzanzahlen im Buchenvoranbau

Zweitens ist es möglich zu fragen, ob immer ein **überaus enger Pflanzverband** für qualitativ hochwertiges Holz benötigt wird (Kapitel 1 Frage 2). Schon SPIECKER (1991 S. 125) warnt vor einem zu hohen Konkurrenzdruck bei jungen Eichen. Die Abbildung 6-1 zeigt zwar, dass die Grünästigkeit und die Astreinigung optimal gestaltet sind, aber die Vitalität leidet: Höhe, Whd und hd-Wert sind davon betroffen. Selbst der Anteil sehr guter und guter Qualitätstypen ist bei engen Standräumen nicht am höchsten, selbst Tiefzwiesel nicht. Soll die Überschirmung nicht verändert werden, sind in einem solchen Fall Stammzahlreduktionen in der Verjüngung effektiv. Allerdings kann dann von einer Effizienz im Hinblick auf Qualitätsholzerziehung nicht die Rede sein. Wird die Schirmdichte abgesenkt um keine Standraumregulierungsmaßnahmen im Unterstand durchführen zu müssen, verbessert sich das Höhenwachstum, sodass der Ästigkeitsindex und die Ansatzhöhe des untersten Zwiesels sinken. Der mögliche Nachteil eines solchen Vorgehens sind Hiebsopfer im Altbestand (PETERSEN & WAGNER 1999).

Geht man von **mittleren Standraumverhältnissen** aus (Abb. 6-1 rechte Grafik), sind diese ausreichend um akzeptable Verzweigungsformen, ein genügend schnelles Absterben dicker Äste und ein geringes Tiefzwieselrisiko zu gewährleisten. Auch die Vitalität und Stabilität ist gegenüber engen Verbänden verbessert, was allerdings mit stärkeren grünen Ästen, die steiler ansetzen erkauft werden muss. Die abgeleiteten Zusammenhänge (Abb. 6-1) gelten für mittlere bis geringe Überschirmungsdichten. Soll die Grünästigkeit bei mittlerem Pflanzverband genauso ausgeprägt sein wie bei engen Verbänden, muss sich dazu ein intensiver Schirm gesellen. Diese Vorgehensweise ist aber bereits als umstritten im vorigen Abschnitt diskutiert. Die Frage, ob ein mittlerer oder geringer Überschirmungsdruck besser geeignet ist um qualitativ gute junge Buchen zu erziehen, kann nur in Form einer Abwägung beantwortet werden.

Weil bei mittleren Überschildungsdichten der hd-Wert bereits optimal ist und dazu noch der Vorteil kommt, dass dann sehr gute und gute Qualitätstypen überwiegen, kann eine suboptimale Ausprägung von Whd, von Tiefzieseln und niedrigeren Totastdurchmessern als Zeichen der Astreinigungsintensität hingenommen werden.

Fokussiert man sich auf **weite Pflanzverbände**, ist besonders drastisch mit einer Verschlechterung der Grünästigkeit, der Astreinigung und der Zwieseligkeit zu rechnen. So berichtet auch MITSCHERLICH (1970 S. 19), dass mit dem schnelleren Zuwachs des Baumes umgekehrt negative Eigenschaften wie Ästigkeit und Abholzigkeit auf das Holz übergehen. Besonders im Hinblick auf die innere Ästigkeit haben Buchen aus Weitverbänden deutliche Nachteile hinzunehmen (LEDER & HANKE 2005). Das einzige positiv beeinflusste Merkmal ist die Krümmungsstärke der Schäfte im unteren Bereich, die geringer ausfällt als bei allen anderen Standraumkategorien. Dies gilt aber nur im Zusammenhang mit einer intensiven Überschildungsdichte, die wiederum nicht zielführend sein kann (vgl. Abschnitt 6.2). Soll dennoch auf weite Verbände nicht verzichtet werden, müssen Ästungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden, um eine befriedigende Qualität sicherstellen zu können (DRÉNOU 2000). Bei Bergahorn und Esche zumindest ist bei HEIN (2004 S. 98f) nachzulesen, dass geästete Bäume in der Mehrzahl, verglichen mit natürlich astgereinigten, einen totasthaltigen Kern wesentlich geringeren Ausmaßes aufweisen. Das setzt allerdings voraus, dass die Ästung fachgerecht und zum richtigen Zeitpunkt ausgeführt wird. Bei BEINHOFER (2010) findet sich eine betriebswirtschaftliche Analyse zu Weitverbänden bei der Buche. Seinen Berechnungen zufolge sind weite Verbände hinsichtlich niedrigerer auflaufender Kosten, kürzerer Umtriebszeit und geringerer Rotkernwahrscheinlichkeit engen Verbänden überlegen. Eine Ästung ist seiner Aussage nach lohnenswert, weil geästete Buchen nicht geästeten in Bezug auf die jährliche Rente überlegen sind. Das hängt ihm zufolge auch damit zusammen, dass die erwarteten Erlöse durch diese Maßnahme bei der wertdifferenzierten Holzart Buche stark zunehmen. Bei weiten Pflanzverbänden wirken sich aber BEINHOFER (2010) zufolge Ausfälle umso gravierender für die kalkulierten Renten aus, sodass dies u. U. zu einem größeren Zinsfuß in der Rentenberechnung und damit einer Ertragsschmälerung führt. Generell verweist er auch darauf, möglichst genetisches Material zu verwenden, das an sich wenige Formfehler ausbildet und das Erlösrisiko nicht

noch weiter erhöht.

Im Rahmen dieser Arbeit ist noch abzuklären, **wie die drei Standraumkategorien genau hinterlegt** sind. Deshalb werden in der folgenden Abbildung der HEGYI-Konkurrenzindex (Suchkegel) und der Ast-Index als alternative Seitendruckmaße jeweils dem Standraum gegenübergestellt. Der erste Index kommt in den Ergebnismodellen am häufigsten vor und konzentriert sich auf nahe und/oder relativ zum Zentralbaum hohe Nachbarn. Es handelt sich also um die weitgehend wirksamen Konkurrenten. Der Ast-Index drückt aus, inwieweit ein relevantes Ineinandergreifen der Kronen stattgefunden hat.

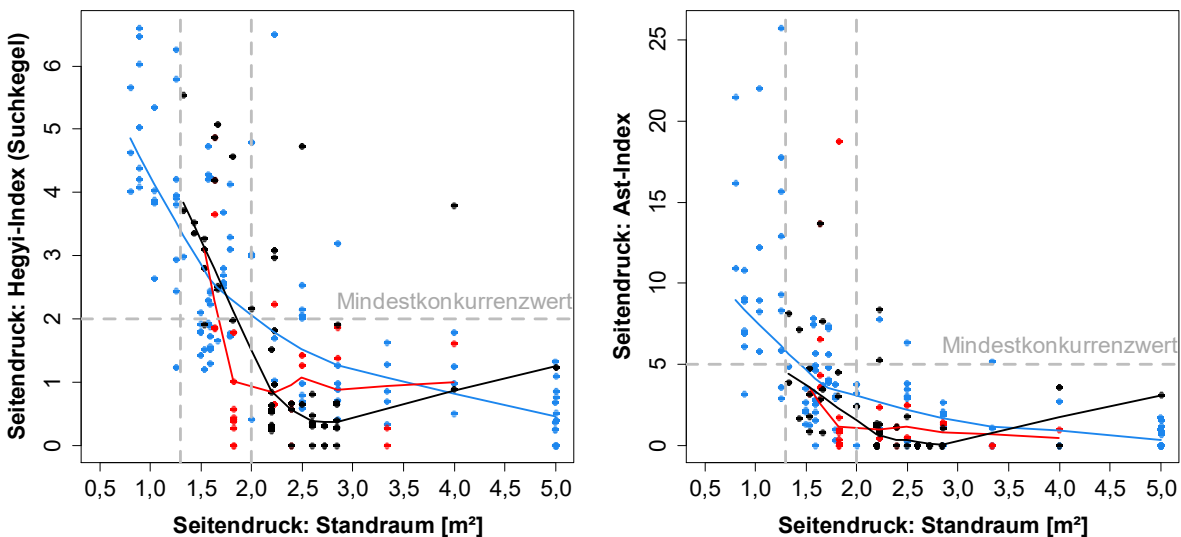


Abbildung 6-3: Intensität des Seitendrucks anhand zwei verschiedener Indices über dem Standraum nach Altersgruppen.

schwarze Punkte: Buchen im Alter von 5-10 Jahren, rote Punkte: Buchen im Alter von 11-15 Jahren, blaue Punkte: Buchen im Alter von 16-20 Jahren. Die senkrechten gestrichelten Linien begrenzen das Standraumfenster, in welchem der seitliche Konkurrenzdruck stark degressiv verläuft. Die horizontale gestrichelte Linie markiert einen aus den Ergebnisgrafiken (Kapitel 4) gutachterlich abgeleiteten Mindestkonkurrenzwert der eingehalten werden muss, damit noch eine akzeptable Qualität erreicht wird.

Die Abbildung zeigt degressiv fallende Zusammenhänge zwischen den Indices, die Einzelbaumparameter beinhalten, und dem Standraum an. Das bedeutet, dass mit größer werdendem Standraum die qualitätsfördernde seitliche Konkurrenz der Buchen untereinander bzw. ein intensiver Dichtschluss in dem hier gesteckten Alters- und Höhenrahmen (8-20 Jahre, 1,68m bis 11,70m) weder messbar noch wirksam vorhanden sind. Aus den einzelnen Grafiken im Ergebnisteil (Kapitel 4) kann ein Mindestkonkurrenzwert abgeleitet werden, bei dem noch eine akzeptable Qualität erreicht werden soll. Dieser kann in Summe

gehalten werden, wenn ein Standraum von $1,3\text{m}^2$ nicht überschritten wird. Das sind folglich **mindestens ca. 7.700 Stck./ha**. Ab diesem Betrag bis zu einem Wert von 2m^2 und 5.000 Stck./ha handelt es sich um eine Übergangszone. Sie ist mit nur $0,7\text{m}^2$ recht schmal. Betragen die Standräume mehr als 2m^2 , ist der qualitätseffektive Mindestkonkurrenzwert nicht mehr gewährleistet. Folglich sind enge Standräume bis höchstens $1,3\text{m}^2$, mittlere bis einschließlich 2m^2 und weite über 2m^2 im Rahmen dieser Arbeit anzusetzen. Beispiele aus der Literatur, in der die Pflanzverbände mit ähnlichen Bezeichnungen klassifiziert sind, enthält die nachstehende Übersicht.

Tabelle 6-1: Pflanzverbandsweiten für Fichte und Buche im Vergleich.

Angabe des Standraums (schwarz) und der Stückzahl je Hektar (grau)

Klassifizierung Pflanzverband	Fichte	Buche	Buche
	VANSELOW (1956) zit. n. FISCHER (1968)	KRAHL-URBAN (1963)	vorliegende Arbeit
eng	bis $1,30\text{m}^2$	$0,50-0,64\text{m}^2$	bis $1,30\text{m}^2$
	bis 7.700 Stck./ha	$20.000-15.600\text{Stck./ha}$	bis 7.700 Stck./ha
mittel	$1,30-1,70\text{m}^2$	-	$1,30-2,00\text{m}^2$
	$7.700-5.800\text{ Stck./ha}$	-	$7.700-5.000\text{ Stck./ha}$
mittelweit	$1,70-2,00\text{m}^2$	um $1,00\text{m}^2$	-
	$5.800-5.000\text{ Stck./ha}$	ca. 10.000 Stck./ha	-
weit	$2,00-4,00\text{m}^2$	$1,44-1,62\text{m}^2$	über $2,00\text{m}^2$
	$5.000-2.500\text{ Stck./ha}$	$6.900-6.200\text{Stck./ha}$	unter 5.000 Stck./ha
sehr weit	über $4,00\text{m}^2$	$3,00-5,00\text{m}^2$	-
	unter 2.500 Stck./ha	$3.300-2.000\text{Stck./ha}$	-

Im Prinzip gleicht die Einteilung aus der vorliegenden Arbeit eher der aus früheren Zeiten für die Fichte verglichen mit den historischen Pflanzzahlen für Buchenkulturen. Das ist ein Spiegelbild dafür, dass stetig Rationalisierungen im Bereich der Kunstverjüngung bei der Buche stattgefunden haben (RÖHRIG et al. 2006 S. 174). Bei den Einteilungen in eng, mittel und weit ist für die vorliegende Untersuchung zu berücksichtigen, dass es sich hier nicht um reine Nettopflanzflächen handelt – stattdessen sind die aufstockenden Fichten mit enthalten. Allerdings sind es auch keine reinen Bruttopflanzflächen, weil die Rückegassen bzw. sogar eine zu große Nähe dazu bei der Aufnahme ausgeschlossen worden sind (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Für die forstliche Praxis sollten sich die hier ermittelten Pflanzzahlen der Einfachheit halber auf einen Hektar ohne Rückegassen beziehen. Weiterhin ist zu bedenken, dass in den

homogen gepflanzten Voranbauten die Ausgangspflanzenzahl über rekonstruierte Pflanzverbände hergeleitet worden ist. Das trifft allerdings nicht auf die inhomogen strukturierten Flächen zu. Diese enthalten also keine Information über die Aussfallrate (vgl. Abschnitt 3.1.1.3). Trotzdem kann die oft formulierte Forderung ausreichend hoher Pflanzenzahlen für qualitativ gute Buchenvoranbauten nicht nur unterstrichen, sondern auch auf mindestens 7.700 Stck/ha bei mittleren Überschirmungsdichten konkretisiert werden (vgl. Kapitel 1). Wie im Kapitel 1 bereits dargelegt worden ist, hat im Bereich der als notwendig erachteten Pflanzenzahlen eine Rationalisierung stattgefunden: Wenn in Naturverjüngungen 350.000 Stck/ha bei zwölfjährigen Buchen vorgefunden werden (AMMER et al. 2010) oder von 95.000 Stck/ha die Rede ist (KURTH 1946 S. 605) erscheinen Stückzahlen in Höhe von 23.000 je Hektar (SCHLÜTER 1960) geradezu wenig. In den meisten Fällen wird von 8.000 bis 10.000 Stck/ha gesprochen, die für das Ziel Qualitätsholz bei Buchenkunstverjüngung ausreichend sind (THOMASIVS & HELBIG 1976, OTTO 1985, RICHTER 1990, KOCH 1992, WEIDIG et al. 2015). Wie geschildert, kann diese Spanne nun für mittlere Überschirmungsdichten des Fichtenaltbestandes auf 7.700 Stck./ha präzisiert werden.

Soll sich aus betrieblichen Gründen die Stückzahl nur **zwischen 5.000 und 7.700 Stck/ha** bewegen, ist dieser Rahmen für eine akzeptable Qualität bis auf die Ästigkeit ausreichend. Nur mit Hilfe eines intensiven Schirms kann die qualitativ bedeutsamste Eigenschaft im erwünschten Rahmen gehalten werden (Abb. 6-1 rechte Grafik). Die Nachteile eines solchen Vorgehens sind bereits im vorherigen Abschnitt zur Altbestandsdichte besprochen worden. Es wird also deutlich, dass nicht ohne Risiko Pflanzenzahlen abgesenkt werden können. Insofern reichen die von WEIDIG et al. (2015) formulierten Mindestpflanzenzahlen für überschirmte Buchen in Höhe von 5.000 bis 6.000 Stck/ha bei Grundflächen bis 40m²/ha nicht aus, um eine risikoarme, befriedigende Qualität der jungen Buchen zu erzielen. Der sichere Weg liegt bei Mindeststückzahlen von 7.700 je Hektar unter den genannten Bedingungen. NINGRE et al. (2016) können über ein breites Spektrum an Ausgangspflanzenzahlen (625 bis 40.000 Stck./ha) für Buche zeigen, dass mit sinkender Dichte Mortalität eher eintritt, wenn jeweils die maximal mögliche Dichte je Pflanzenzahl als Referenz genommen wird. Die Autoren führen das auf längere Kronen bei größerem Standraum und auf einen höheren respiratorischen Verbrauch je Flächeneinheit zurück. Diese Aspekte

sind bedeutsam, wenn z. B. eine Konkurrenzentschärfung im Zuge des Klimawandels (AMMER 2017) mit der Qualitätsholzerziehung gekoppelt werden soll. Dabei darf jedoch der Standort mit seiner Leistungsfähigkeit und vor allem Wasserspeicherfähigkeit (EICHHORN et al. 2016) nicht außer Acht gelassen werden. Besser nährstoff- und wasserversorgte Standorte sind in der Lage, eine höhere Anzahl an Pflanzen am Leben zu halten (THOMASIVS 1975). Wenn BEQUET et al. (2012) in einer europaweiten Studie als Haupteinflussfaktoren für die Produktionskraft der Buche die Höhe der Juli-August-Niederschläge und Bestandescharakteristika wie Dichte und Oberhöhe ausmachen unterstreicht das, wo die künftigen Steuergrößen der Buchenwirtschaft anzusiedeln sein werden.

Was die Aspekte **Mischungsart, Mischungsanteil und Mischungsgrad** in der Verjüngung betrifft, so kann in Bezug auf die Qualitätsholzerzeugung auf Angaben in der Literatur zurückgegriffen werden. Der Mischungsgrad sollte den Ausführungen von TIEBEL et al. (2016) mindestens gruppen- aber besser noch horstweise gestaltet werden, um die Randeffekte auf die Qualität zu minimieren. Vergleichbar damit sind die Untersuchungen von MATTHES (1998 S. 129f), der wie TIEBEL et al. (2016) einen Randeffekt von drei Metern in die Fläche hinein ausmachen kann. Größere Einheiten der Verjüngungsbaumarten haben darüber hinaus den Vorteil, die Notwendigkeit pflegender Eingriffe zum Erhalt des Verjüngungszieles, drastisch herabzusetzen wenn nicht sogar aufzuheben (FISCHER 1968).

In Bezug auf die **Pflanzverbände** wird in der Literatur berichtet, dass Rechteckverbände ökonomisch günstiger als Quadratverbände sind (THOMASIVS 1975, NYLAND 1996 S. 126ff). Werden bei gleicher Pflanzenzahl die Reihenabstände immer weiter, erschwert das jedoch die effektive Ausnutzung des vorhandenen Wuchsrums durch den Einzelbaum (THOMASIVS 1975). NUTTO (1999 S. 94f) spricht sich gegen ein zu weites Verhältnis zwischen Reihenabstand und Pflanzenabstand in der Reihe aus, weil bei seinen untersuchten Eichen im 4,0 x 0,5m-Verband signifikant höhere Totaststärken auftreten, als im 3,0 x 0,7m-Verband. Auf die Gefahr einseitiger Kronenausbildung bei einem sehr weiten Verhältnis weist auch schon THOMASIVS (1975) hin. Intensiv hat sich BUES (1990) mit diesem Thema auseinandergesetzt. In seiner Studie an Fichten stellt er heraus, dass in Reihenverbänden Grünaststärken bei Gassenästen dicker als

Reihenäste sind (BUES 1990 S. 32ff) und dass sich deren Absterbezeitpunkt nach hinten verschiebt (BUES 1990 S. 26). Im Vergleich mit Quadratverbänden kommt er zum Schluss, dass sich die innere Ästigkeit bei Bäumen aus Reihenverbänden wesentlich verschlechtert: die Gesundastbereiche im Holz sind bei den Gassenästen weitaus höher (BUES 1990 S. 50ff). Deswegen ist ein mehr quadratischer Pflanzverband aus Sicht der Qualitätsholzerziehung als vorteilhafter einzuschätzen (THOMASIIUS 1975), wenngleich STEPIEN et al. (1998 S. 21) keinen qualitativen Unterschied am Schnittholz von Buchen mit symmetrischen oder asymmetrischen Kronen feststellen. NAGEL & RUMPF (2010) sprechen von häufiger auftretenden Totaststärken über 4cm Durchmesser an Eichen, sobald sich der Standraum über 3m² je Pflanze vergrößert und die Reihenabstände drei Meter und mehr betragen. Die Autoren empfehlen daher Reihenabstände von 1,5m bis 2m, um die Astreinigung nicht zu gefährden. Aus allgemein waldbaulicher Sicht in Bezug auf die Standraumausnutzung hält FISCHER (1968) Dreieckverbände für am günstigsten. NYLAND (1996 S. 126ff) spricht von den besten Voraussetzung einer solchen Standraumgeometrie um symmetrische Kronen zu erzielen. Damit ist seine Überlegung zur optimierten Trupp-Pflanzung bei Eiche ähnlich, die GOCKEL (1994) entwickelt hat. Die optimalen Dichten sind bei GOCKEL (1994 S. 109) unter der Maßgabe einer bestimmten Z-Baum-Zahl anhand von Standflächenüberschneidung, die es zu vermeiden gilt, hergeleitet. So muss im Reihenverband 1 x 5m die Steigerung der Z-Baumzahlen auf 100 Stck./ha mit einer Zunahme an prozentualer Standflächenüberschneidung der Z-Bäume von 30% erkauft werden, währenddessen bei der Truppplanzung mit 100 Trupps à 19 Eichen sich nur 11% der Standflächen überschneiden.

Insgesamt gesehen stellen die hier gegebenen Empfehlungen für Stückzahlen nur einen kleinen Ausschnitt aus der Frage dar, wie hoch die Pflanzenzahlen auf der Fläche zu sein haben und wie sie am besten angeordnet werden. Dieser Ausschnitt beschränkt sich auf den standörtlichen Rahmen und auf die untersuchten Oberstandsdichten sowie das Ziel qualitativ hochwertige Buchen zu erziehen. Schon dafür sind nach WAGNER & LUNDQVIST (2005) die betriebliche Ziele, die Risiken und das erforderliche Lichtregime für die Verjüngungsbaumart wichtig, wenn (Qualitäts-)Holz produziert werden soll. Allgemein sind für die Pflanzverbandswahl neben standrötlichen Gesichtspunkten auch konkrete Bestockungs-, Verjüngungsziele sowie der geplante Verjüngungszeitraum, die

Baumart und die konkrete Bestandessituation ausschlaggebend. THOMASIVS (1975) bezieht darüber hinaus in sein theoretisches Konzept für die Herleitung von Pflanzverbänden auch den gewünschten Anteil an Vornutzungserträgen, die Stabilität und die Produktionsökonomie mit ein.

Die vorliegende Arbeit widmet sich allerdings nicht dem Problem, wie weiter mit Voranbauten zu verfahren ist. Die untersuchten Flächen waren allesamt ohne pflegende Eingriffe. Aus den Untersuchungen von KURTH (1946 S. 603ff) und FALCONE et al. (1986) geht hervor, dass sich bei der Buche nach Dickungsschluss deutliche soziologische Schichten bilden. Diese Schichtzugehörigkeit ist dynamisch, was von ASSMANN (1961 S. 85) als „Umsetzen“ bezeichnet wird. Daher ist nach THOMASIVS & HELBIG (1976) eine straffe phänotypische Auslese in der Oberschicht von Jungwüchsen und Jungbeständen zweckmäßig, weil durch ein positives Umsetzen – einen soziologischen Aufstieg – vorher zurückgesetzte Buchen mit erwünschter Form zu vitalen Exemplaren heranwachsen können.

7 Ausblick

In **wissenschaftlicher Hinsicht** ist der Qualitätsaspekt in Buchenvoranbauten zwar nun ein besser untersuchtes Thema geworden. Allerdings würde eine übergreifende Datenanalyse (Meta-Analyse) über verschiedene Regionen und Standorte hinweg ein vollständigeres Bild liefern. Es wäre wünschenswert, wenn die Extreme künftig mit einbezogen werden könnten, auch wenn es sich um Varianten handelte, die in der Praxis als nicht zielführend erscheinen. Gemeint sind damit Voranbauten in engen Verbänden, die unter einem dicht gehaltenen Schirm über lange Zeit hinweg wachsen. Auch der direkte Vergleich mit Freiflächenbedingungen ist erstrebenswert (WEIDIG 2016). Um die Frage einer optimierten Schirmdichte und Pflanzenzahl noch detaillierter beantworten zu können, wäre der Ansatz räumlicher Optimierung vielversprechend (WAGNER 2008b). Je weiter die Grundfläche, wie sie in der vorliegenden Arbeit u. a. verwendet wird absinkt, desto mehr äußern sich Unterschiede zwischen zufälligen und geklumpten Verteilungsmustern der verbleibenden Fichten. Es böte sich in diesem Zuge an, noch weitere Kriterien wie die Wurzelkonkurrenz einzubeziehen. Damit wäre es möglich, qualitäts- und klimaoptimierte Dichten (WAGNER 2008a, NINGRE et al. 2016, AMMER 2017) sowohl des Oberstandes als auch des Buchenvoranbaus abzufragen. Die Wurzelkonkurrenz wird im Allgemeinen als klimarelevante waldbauliche Steuergröße angesehen. Das kommt daher, weil der Klimawandel durch höhere Temperaturen, regional sinkende Sommerniederschläge und langanhaltende Extremwetterlagen charakterisiert ist (KLINCK et al. 2016), was sich in Abhängigkeit von der Bodenwasserspeicherkapazität (EICHHORN et al. 2016) entscheidend auf die Wasserverfügbarkeit und damit auf Vitalität und Zuwachs auswirkt (WAGNER 2008b).

In **praktischer Hinsicht** kann gefragt werden, welchen Stellenwert der Voranbau als Verfahren zur Qualitätsholzproduktion und welchen die Buche in der zukünftigen Waldgeneration haben soll. Es wird davon gesprochen, dass der Klimawandel (KLINCK et al. 2016) messbare Auswirkungen auf die Standorte hat indem er zu einer standörtlichen Drift führt (EICHHORN 2016, GUERICKE et al. 2016). Den Prognosen zufolge ist die Fichte am stärksten von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen (GUERICKE et al. 2016), weshalb sie auch umgebaut werden soll (IRRGANG 2002). Ob jedoch in jedem Fall ein Buchen-

Funktionsumbau mit hohen Stückzahlen zur Qualitätsholzproduktion (WAGNER 2007a) notwendig ist, muss auf betrieblicher Ebene abgeprüft werden. Weil die Veränderungen schneller ablaufen als es die Anpassungsfähigkeit der Bäume zulässt (WAGNER 2004, WOLF 2009), wird ein aktiver und intensiver Waldumbau als einzige Möglichkeit gesehen, dem massiven Stabilitätsrisiko der Wälder beizukommen (IRRGANG 2002). Andere Empfehlungen fassen auch einen optionenerhaltenden Nachhaltumbau ins Auge, der eine breite Baumartenpalette mit einbezieht (WAGNER 2004) und daher einer Hiebsformenvielfalt bedarf (LÜPKE 2004). Um dann Qualitätsholz zu erziehen, könnte theoretisch auch auf die Pflanzung in weiten Verbänden ohne Überschirmung und mit Ästung zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 6.3). Im Hinblick auf die vorliegenden Ergebnisse, die Dominanz des Nadelholzes in den höheren Altersklassen (BMEL 2016) und der großen Wertdifferenzierung von Buchenholz (MÖHRING 2004) erscheint aber der Buchenvoranbau weiterhin als ein sinnvoller waldbaulicher Weg der Qualitätsholzproduktion. Gründlich hergeleitete Konzepte zur Wertholzerziehung gehen von einem zweiphasigen Ansatz aus (SPIECKER 1991 S. 125ff, HEIN 2004), in dem durch hohen Dichtstand bis ins Stangenholzalter hinein die Astreinigung bis zur gewünschten astfreien Schaftlänge forciert werden soll um dann Z-Bäume gezielt und wirksam von ihren Bedrängern hochdurchforstungsartig freizustellen. Dadurch wird das Dickenwachstum erhöht und gesteuert, was sich in einem größeren astfreien Stammmantel äußert. Diese Zusammenhänge variieren je nachdem, um welchen Standort es sich handelt (HEIN 2004 S. 76). Ein praktisches stringentes Konzept zur Wertholzerziehung findet sich bei WILHELM & RIEGER (2013 S. 47ff und S. 75ff), das die Begriffe Qualifizierung und Dimensionierung verwendet und sich die von den vorab genannten Autoren entwickelte Zweiphasigkeit zu Eigen macht. Es ist an der französischen Mittelwaldwirtschaft orientiert und arbeitet mit wenigen zu entwickelnden Wertbäumen je Hektar, deren Produktionsmotor große Kronen sind (WILHELM & RIEGER 2013 S. 91f). Großkronigen Bäumen wird eine gute Holzqualität zugeschrieben, wie STEPIEN et al. (1998 S. 21) am Schnittholz solcher Buchen rekonstruieren können.

Hinsichtlich des Umbaus mit Buche gibt es zahlreiche kritische Stimmen. Forstökonominnen und Ertragskundler weisen immer wieder auf die Bedeutung des Nadelholzes für die Sägeindustrie und die Ertragssituation der Forstbetriebe hin (MÖHRING 2004, SPELLMANN 2005, SPELLMANN 2009, MANTAU 2015, MÖHRING &

WILHELM 2015, SPELLMANN et al. 2015). Es wird teilweise in Simulationen belegt, dass ein Waldumbau aus ökonomischer Sicht nicht lohnend sei bzw. nur langsam durchgeführt werden solle (BRÄUNIG & DIETER 1999 S. 113, MÖHRING 2004, SPELLMANN et al. 2015). In diesen Kontext fällt auch das betriebswirtschaftliche Plädoyer für Laub-Nadel-Mischbestände (SPELLMANN et al. 2015). Auch aus verwendungsseitiger Sicht werden für die Buche Nachteile gegenüber dem Nadelholz aufgezählt. Die Buche laufe Gefahr, zunehmend in Industrien geringer Wertschöpfung verarbeitet zu werden und von der stofflichen Kaskadennutzung ausgeschlossen zu sein (MANTAU 2015). Andere Ökonomen nehmen aber auch die holzverarbeitende Industrie in die Pflicht, indem sie zu einer Risikostreuung und Diversifizierung in der Produktpalette und den Rohstoffen raten (DIETER & JANZEN 2015). Außerdem wird angemahnt, dass die Verwendungs- und Verwertungspotenziale des Buchenholzes noch deutlich ausbaufähig sind (MÖHRING et al. 2008, MANTAU 2015). Auch im Hinblick auf die langfristige und wirksame Kohlenstoffbindung durch die stoffliche Nutzung von langlebigen Holzprodukten/Holznebenprodukten wird in diesem Zusammenhang verwiesen (MANTAU 2015). Neue Ansätze wie die Gewinde-Stangen-Anker-Verbindungstechnologie (GSA) zeigen, dass auch mit Buche im Bereich der Holzkonstruktion eine vielversprechende Verwendung im Hochbau möglich ist, die hohe Lasten bei großem Wirkungsgrad der Kraftübertragung gekoppelt mit Materialeinsparung tragen kann (ANONYMUS 2017).

Abgesehen von den genannten Kritiken, muss die Buche auf einem beträchtlichen Teil der Waldfläche ihren Platz einnehmen, wenn der Wald für kommende Generationen ein Maximum an Funktionen erfüllen soll (WAGNER 2004, WAGNER 2008a). Wie aktuell nachgefragte Funktionen auf Waldflächen verteilt und miteinander verschnitten werden sollen, ist eine andere Frage. Neben Segregations- bzw. Integrationsmethoden (WAGNER 2004, AMMER & PUETTMANN 2009), bietet die Auflösung in funktionsbelegte, einzelne Strukturelemente des Waldes eine interessante Möglichkeit und einen gangbaren Weg, Ziele räumlich-hierarchisch zu konkretisieren und die Bewirtschaftung sowohl effektiver als auch effizienter zu machen (WAGNER et al. 2013).

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie der Buchen-Voranbau als Regelverfahren des Waldumbaus von Fichtenreinbeständen angelegt und bewirtschaftet werden soll, damit keine Qualitätseinbußen entstehen und das Wachstum unter Schirm nicht zu stark geschmälert wird.

Dahinter stehen im Kern drei Fragen. Die erste zielt darauf ab herauszufinden, welche Auflichtung in Fichtenaltbeständen notwendig und zweckmäßig ist. Dabei lässt sich der Bogen über zu dichte Oberstände und die Gefahr des Kümmerens sowie dauerhaft plagiotropen Wachses sowie eine zu niedrige Schirmdichte spannen, die wiederum das Risiko von Frostschäden verstärken kann und negative Auswirkungen für die Qualität bedeutet.

Zweitens ist von Interesse, ab welchem Alter der Voranbau-Buchen (Standzeit seit der Pflanzung) sich mögliche Qualitätsunterschiede überhaupt bemerkbar machen.

Drittens wird gefragt, ob sich die teure Anlage von Voranbauten mit hohen Stückzahlen lohnt, wenn qualitativ gute Dickungen und angehende Stangenhölzer erzielt werden sollen. Die zu untersuchende Alternative lautet dabei, ob die Pflanzenzahlen abgesenkt werden können und der Verlust an qualitätsförderndem Seitendruck durch einen dichteren Altbestandesschirm aufgefangen werden kann.

Die abgeleiteten Arbeitshypothesen unterstellen der Fichtenüberschirmung und der Pflanzenzahl im Voranbau einen gerichteten Effekt auf Wachstum, Stabilität, Astreinheit, Astreinigung, Stammform und Achsenmorphologie der Buchen-Vorausverjüngung. Es wird außerdem angenommen, dass sich Unterschiede in Überschirmungsdichte und Pflanzenzahl erst ab einem bestimmten Alter bemerkbar machen.

Die zwölf Untersuchungsflächen liegen im nordrhein-westfälischen Sauerland und im sächsischen Elbsandsteingebirge in einer Höhenlage zwischen 250 und 550m ü NN auf terrestrischen Standorten mittlerer bis ziemlich armer Trophie. Die Altbestände sind zwischen 66 und 102 Jahre alt und weisen fünf Jahre vor der Datenaufnahme konstante Schirmdichten auf. Die Buchenvoranbauten sind mindestens horstweise angelegt und seit ihrer Pflanzung ohne Pflege- oder

Ästungsmaßnahmen. Das Alter variiert zwischen acht und 20 Jahren, die 1,68 bis 11,70m hoch sind. Eine Verbissbelastung kann ausgeschlossen werden. Die Stückzahl je Hektar variiert zwischen 4.444 und 10.417 Stck./ha.

Die Flächen lassen sich einer zweistufigen Versuchsanlage zuordnen. In der ersten Stufe variieren Alter, Überschildungsdichte und Dichte im Voranbau. Je nach den Verhältnissen auf der Fläche werden in homogenen Voranbauten rechteckige Kernflächen etabliert und in Subflächen unterteilt. Bei weiten Pflanzverbänden oder ungleichmäßiger Bestockung dient ein Probekreisraster dazu, die Probepflanzen auszuwählen. Die Anzahl an Probepflanzen wird im Nachhinein um solche bereinigt, die Schäden haben, nicht vital sind, unteren soziologischen Klassen angehören oder von anderen Baumarten in der Verjüngung berührt werden (n=2.991).

Für alle diese Buchen werden im ersten Teil der Arbeit das Alter, der mittlere Standraum und die direkt über dem Wipfeltrieb befindliche Überschildungsdichte mit der Qualitätseinstufung (sehr gut, gut, zwieselig, unzureichend) in Verbindung gebracht. Dieses Merkmal betrachtet die Gesamtmorphologie als Kombination aus vier Kronen- und drei Stammformklassen.

Als statistische Methode wird ein kumulatives, gemischtes Schwellenwertmodell verwendet. Es ermöglicht, eventuelle unerwünschte räumliche Korrelationen aus dem Regressionsmodell zu eliminieren. Dazu werden die Daten auf Ebene der Plots bzw. Subflächen aggregiert. Der Stichprobenumfang reduziert sich dadurch auf n=619.

Das Ergebnis zeigt, dass ein weiterer Standraum zu einer höheren Wahrscheinlichkeit schlechterer Qualitätstypen führt und andererseits eine intensivere Überschildung diesen Trend umkehrt. So sind bei gleicher Wahrscheinlichkeit für sehr gute und gute Buchen entweder 7.140 Stck./ha bei moderatem Schirm oder 2.860 Stck./ha bei intensivem Schirm nötig. In der Validierung des Modells zeigen sich jedoch gravierende Unterschiede anhand der Daten aus den beiden Bundesländern.

Im zweiten Teil der Untersuchung wird von den vorausgewählten Probepflanzen eine Unterstichprobe von n=186 gezogen um daran Höhe, Wurzelhalsdurchmesser, hd-Wert, den maximalen Grünastdurchmesser je

Schaftabschnitt (Schaftabschnitt 1: 0,0-1,5m, Schaftabschnitt 2: 1,5-3,0m, Schaftabschnitt 3: 3,0-4,5m), den relativen maximalen Grünastdurchmesser (ASIX von STRUCK & DOHRENBUSCH 2000), den kleinsten Grünastansatzwinkel, den Astwinkelindex von HAGEMANN (2005), das Vorhandensein von steilen Ästen, den Schaftanteil ohne Grünäste, den neu eingeführten Ästigkeitsindex, den Durchmesser des stärksten Totastes, den relativen Durchmesser des stärksten Totastes (ASIX), das Auftreten von Tiefzieseln, die Ansatzhöhe des untersten Ziesels, die Stammneigung und die Krümmerschaftigkeit zu messen, einzuschätzen bzw. aus Hilfsmessgrößen zu berechnen.

Die Konkurrenzsituation dieser Einzelbuchen wird in Bezug auf den Oberstand und den Voranbau erfasst. Beim Oberstand sind es die Grundfläche je Hektar und der HEGYI-Index, die auf eingemessenen Stammverteilungsplänen der Kernflächen bzw. Plotrasterflächen beruhen, die um einen Rahmenbereich von 15m Breite ergänzt werden. Innerhalb der Verjüngung sind es der mittlere Standraum, der HEGYI-Index mit zwei verschiedenen Suchmodi (Suchradius $1/3$ der Höhe und Suchkegel mit 60° Öffnungsweite am Baumfußpunkt) und der neu eingeführte Ast-Index nach CLUZEAU et al. (1994), der nahe am Baum stehende Buchen mit ihrem am weitesten auf den Zentralbaum zuragenden Ast und dessen Parametern einbezieht.

Die berechneten Regressionsmodelle sind alle gemischt und fangen die über einen gestuften Zufallseffekt mögliche unerwünschte räumliche Korrelationen auf. Die verwendeten Modelltypen sind die lineare und die binäre logistische Regression. Bei der Auswertung werden die unabhängigen Variablen in acht festen Varianten miteinander kombiniert. Neben der Homoskedastizität der Residuen beim linearen Modell sind die Modelle u.a. auf eine mögliche erhöhte Multikollinearität hin überprüft. Aus den maximal acht Regressionsmodellen pro Qualitätsmerkmal ist dasjenige das Endmodell, welches den niedrigsten Strafterm (AIC-Kriterium) verbunden mit einer akzeptablen Multikollinearität aufweist.

Im Ergebnis ist der HEGYI-Index sowohl für den Oberstand als auch für die Verjüngung überdurchschnittlich häufig in den Endmodellen vertreten. In der Diskussion steht die Frage nach der Genauigkeit der Oberstands-Indices, die durch den zu kleinen Rahmenbereich von 15m und daher möglicherweise fehlenden, aber wirksamen Konkurrenten beeinträchtigt wird.

Die Ergebnisse für die Einzelmerkmale zeigen, dass ein enger Standraum unverzichtbar ist, wenn qualitativ hochwertige Buchen herangezogen werden sollen. Kein Merkmal verhält sich in Bezug darauf indifferent.

Zusätzlich bedarf es eines dichten Schirms, wenn die absoluten Grünastdurchmesser in allen drei Schaftabschnitten gering, der relative Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 3,0 bis 4,5m niedrig, der Grünastansatzwinkel in Bezug auf die Vertikale weit, der astfreie Schaftanteil hoch und die relative Dimension des stärksten Totastes groß sein sollen.

Demgegenüber stellt eine niedrige Überschirmungsintensität bei engem Standraum in der Verjüngung sicher, dass sich die Höhe nicht zu stark reduziert, der relative Grünastdurchmesser minimal wird, der Durchmesser bereits abgestorbener Äste steigt, Tiefzwiesel weniger wahrscheinlich sind und der unterste Zwiesel hoch ansetzt. Steile Äste sind nur dann weniger wahrscheinlich, wenn der Standraum eng ist. Der Überschirmung gegenüber verhält sich dieses Merkmal dagegen indifferent.

Ein weiter Standraum bewirkt in Kombination mit einem intensiven Schirm, dass die Schäfte junger Buchen weniger stark gekrümmt sind oder schief stehen. Die jungen Stämme sind bei weitem Standraum häufiger zweischnüurig, was unabhängig von der Überschirmungsdichte ist. Bezüglich der Wurzelhalsdurchmesser und der hd-Werte wirkt sich ein weiter Standraum positiv aus, wenn gleichzeitig ein Schirm geringer Dichte über dem Voranbau stockt.

Insofern werden die Arbeitshypothesen nicht vollumfänglich bestätigt, weil auch indifferente Reaktionsmuster der jungen Buchen vorkommen. Der Alterseffekt bzw. die Auswirkungen der unterschiedlichen Buchenhöhen sind in Bezug auf die Höhe, den Wurzelhalsdurchmesser, den stärksten Grünastdurchmesser im mittleren Schaftabschnitt, den grünastfreien Stammanteil, die Astreinigung in den unteren beiden Abschnitten, den absoluten und relativen Durchmesser des stärksten Totastes, der Stammneigung und die Krümmungsstärke besonders ausgeprägt.

In der Diskussion wird die Reaktion der jungen Buchen auf unterschiedliche Auswirkungen der Konkurrenz in Raum und Zeit aufgegriffen. Die Bäumchen reagieren sowohl auf physiologischer, histologischer, anatomischer und

morphologischer Ebene, was sich im Laufe der Entwicklung in der Bedeutung für den gesamten Organismus verschiebt. Diese vielfältigen Reaktionen können dafür verantwortlich gemacht werden, dass Unterschiede bei den ausgewerteten Qualitätsmerkmalen hervortreten. Zusätzlich wird die Frage diskutiert, welchen Einfluss genetische Komponenten oder der Standort auf die Qualität haben können.

Für die Praxis wird empfohlen, die Pflanzenzahlen nicht unter 7.700 Stck./ha abzusenken. Für die Überschildung ist eine Grundfläche von 25-40m²/ha empfehlenswert, wobei der Altbestand erst nach 20 Jahren vollständig geräumt werden soll. Zu dichte Fichtenoberstände sind u. a. aus Gründen der Wuchshemmung für den Voranbau, der damit einhergehenden Produktionszeitverlängerung und dem gesteigerten Risiko von Bruch und Wurf des Oberstandes nicht anzuraten. Für eine Absenkung der Pflanzenzahlen ist aus Sicht der Qualität im Voranbau lediglich ein Rahmen von 5.000 bis 7.700 Stck./ha denkbar. Diese Absenkung geht zu Lasten der Astreinigung und Feinästigkeit und sie erfordert außerdem, den Oberstand bei Grundflächen über 40m²/ha zu halten und in einem Zeitraum von mehr als 20 Jahren langsam abzuräumen. Das Bestreben bei den Pflanzen- und Pflanzungskosten einzusparen, wird insgesamt als risikobehaftet eingestuft.

Den Schluss der Arbeit bildet ein Ausblick auf die Diskussion um die Intensität des Waldumbaus an sich, indem die Erfordernisse der Holzverarbeitenden Industrie dem ökologisch begründeten Waldumbau gegenübergestellt werden.

9 Summary

The following study deals with the problem how to install and to manage advance-planting as a standard method for forest conversion in order to obtain a good quality combined with an adequate growth of young beech trees.

There are three main questions that have to be answered. First, it is necessary to point out the intensity of a spruce shelter which is needed for the mentioned aims. On the one hand it is not favourable for the vitality nor for the morphology of the underplanted beeches if spruce shelters are too dense. On the other hand a too sparse shelter increases the risk of frost damage and other negative effects on beech quality.

Second, it has to be revealed at which time since planting differences in quality due to various competition conditions become visible.

Third, one needs to know if the use of a high amount of plants is worthwhile in order to obtain the desired quality traits of thickets and young poles. Maybe it could be a meaningful alternative to plant less beeches under a more dense spruce shelter.

It is hypothesized that there exists a directional effect of spruce shelter intensity as well as underplanting density on growth, stability, branchiness, stem form and morphology of advance-planted beeches. Furthermore it is supposed that young beeches show a visible reaction not immediately after planting.

Within the scope of the study, twelve sample areas were established in North-Rhine-Westphalia in the Sauerland region as well as in Saxony in the Sandstone Mountain region. The stands stock at terrestrial sites which are elevated between 250 and 550 m above sea level. The spruce shelters vary in age from 66 to 102 years and have had a constant density five years before data collection started. The underplantings have at minimum clump size and vary in age since planting from eight to 20 years with heights from 1,68 to 11,70m. They are not damaged through browsing and no thinning or pruning have taken place. The density within the underplantings lies between 4.444 and 10.417 pieces per hectare.

At the study site, a two-staged sampling design is used. The first stage varies age of the young trees, shelter density and density within the underplanted area. If

the beeches are homogeneously planted, rectangular plots were established, subdivided into smaller units. If the planting resulted in wide-spread or a scattered, inhomogeneous spatial distribution of young beech trees, circular sample plots were established fixed in a regular grid pattern. The relevant sample trees are vital beeches of a high sociological order without damage and without a visible competition caused by young naturally established individuals of other tree species (n=2.991).

The first part of the study analyzes the effect of age, mean standing area per beech and shelter density on morphological quality (very good, good, forked, not sufficient). This trait focuses on the habitus of a young beech where crown form (four classes) and stem form (three classes) are combined. As statistical method for the analysis a mixed proportional-odds regression model is used. By this means undesirable spatial autocorrelation residual structures can be eliminated which can potentially be found. In order to reach this, sample data had to be aggregated on subplot respectively on circular sample plot level (n=619).

The result shows on the one hand the negative effect of wide spaced beeches. This leads to a higher probability of worse quality classes. On the other hand, a more dense shelter can reverse the mentioned effect of a sparse density in underplanted areas. Either 7.140 beeches per hectare at a moderate shelter density or 2.860 pieces per hectare at a dense shelter will lead to the same probability level of very good and good beeches. The validation of the regression model shows great differences between the data from NRW and SAX.

In the second part of the study at a subsample of 186 beeches following quality treats are measured respectively calculated afterwards: height, girth at a height of 20cm above ground, hd-ratio, diameter of the thickest living branch per stem sector (stem sector 1: 0,0-1,5m, stem sector 2: 1,5-3,0m, stem sector 3: 3,0-4,5m height above ground), relative branch diameter of the thickest living branch (ASIX after STRUCK & DOHRENBUSCH 2000), minimal branching angle out of all measured living branches, branch-diameter-angle-index of HAGEMANN (2005) for the thickest alive branch, steep branches, relative length of the branch-free bole, a new branchiness-index, absolute and relative diameter of the thickest dead branch, occurrence of low forks, height of the first fork, stem leaning and crookedness. The competition situation is assessed related to shelter as well as to regeneration. Several competition indices are used. For the spruce shelter,

basal area per hectare and the index after HEGYI are calculated, based on stand maps which are established at the sample plots and additionally at a surrounding area as a margin with width of 15m. Within the regeneration, the mean standing area, two variants of the index after HEGYI based on two selection modi (radius 1/3rd of the height and searching cone with an angle of 60°) and a newly introduced branch competition index after CLUZEAU et al. (1994) are the tools to quantify the intensity of competition. The new branch competition index uses competitors nearby and in particular their branch which is directly oriented to the sample tree and has simultaneously the greatest horizontal elongation.

The regression models are mixed ones and use a spatially hierarchical random effect in order to eliminate undesirable spatial correlation structures of residuals. As model types, linear and binary logistic regression types are used. The analysis combines independent variables to eight fixed variants. All linear models are investigated if their residuals are homogeneously distributed, furthermore all models are checked for an acceptable extent of collinearity amongst others. The further analysed and interpreted model is the result of a selection process focused on an acceptable extent of collinearity and a low AIC-value.

The competition index after HEGYI is the one which has the best performance among all used indices, for shelter density as well as in relation to regeneration density. Methodically, accuracy of the shelter-competition-indices is discussed. The unaccuracy evolved from the fixed margin width of 15m and the fact that relevant competitors outside of this zone are missing.

The results clearly show the importance of a narrow spacing in the underplanting in order to reach the goal. There is no quality trait which does not show a reaction to a varying spacing. Additionally, a dense shelter is needed if diameters of the thickest alive branches in all stem sections and the relative branch diameter at a stem height from 3,0 to 4,5m shall be small, if the branching angle shall be wide in respect to the stem axis, if the branch-free bole shall be long and if the relative branch diameter of the thickest dead branch shall be of great dimension.

In contrast, a low shelter density combined with narrowly planted beeches supports other quality traits: height is not reduced so much, relative branch

diameter of the thickest living branch decreases, dead branch diameter reaches a high level, low forks do not occur frequently and forking appears in the uppermost parts of the stem. Steep branches do less prevail only, if there is a narrow spacing independent of shelter density.

If spacing is wide, highly crooked stems or vertical intensively leaned ones are rare. Independently of shelter density, stem form is less crooked. Wide spacings and simultaneously a low shelter density lead to tight stem diameters of underplanted beeches and therefore to a good stability.

That is why the postulated hypotheses can not completely be accepted – there are indifferent growth reactions related to quality traits, too. Age effect and impact of varying beech heights, respectively, can mainly be detected in relation to height, stem diameter, diameter of the thickest living branch in the second stem section, branch-free bole length, pruning dynamics in the lowermost stem sections, absolute and relative branch diameter of the thickest dead branch, stem leaning intensity and to intensity of crookedness.

The general discussion argues the reaction of the young beech trees to different effects of competition dependent of space and time. The young beeches show a clear physiological, histological, anatomical and morphological response which is attended by a shift of importance during life time. The sum of response is the reason for differences in quality traits detected in the study. Additionally the discussion focuses on genetic aspects and site conditions which also may have an impact.

Practical recommendations lead to an amount of 7.700 pieces per hectare as a minimum to let management match the quality goals. Spruce shelter density should vary between 25 to 40m² per hectare, optimally lasting ca. 20 years before complete removing. If the spruce shelter becomes too dense, this is not any more appropriate for an acceptable regeneration growth intensity which leads to a prolonged production time for the beech understorey. Also the risk of dying old overstorey stocking is increased. If regeneration density has to be decreased for operative reasons, 5.000 to 7.700 pieces per hectare are recommended. Nevertheless pruning dynamics will deteriorate and branchiness will also increase. Furthermore an approach like this requires a dense spruce shelter beyond 40m² per hectare with a longer lasting period, longer than 20 years,

until complete removing. If someone wants to economize on planting costs one should keep in mind the mentioned risks and efforts on the whole.

At the end the study takes into account how forest conversion is generally discussed with respect to the needs of wood-working industry which are in contrast to the widely used silvicultural method.

10 Literatur

- AAKALA, T.; SHIMATANI, K.; ABE, T.; KUBOTA, Y.; KUULUVAINEN, T. (2016): Crown asymmetry in high latitude forests: disentangling the directional effects of tree competition and solar radiation. *Oikos*, Vol. 125, pp. 1035-1043, DOI: 10.1111/oik.02858.
- ACKERLY, D. (1997): Allocation, Leaf Display, and Growth in Fluctuating Light Environments. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (eds.): *Plant resource allocation*. San Diego : Academic Press, pp. 231-264.
- AGRESTI, A. (2013): Categorical data analysis. *Wiley series in probability and statistics*, Hoboken, NJ : Wiley Interscience, 3rd edition, 714 pp.
- ALCORN, P. J.; PYTTEL, P.; BAUHUS, J.; SMITH, R. G. B.; THOMAS, D.; RYDE, J.; NICOTRA, A. (2007): Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. *Forest Ecology and Management*, Vol. 252, pp. 41-51.
- ALTENKIRCH, W.; BOGENSCHÜTZ, H. (2002): Waldschutz auf ökologischer Grundlage. Stuttgart : Ulmer, 434p.
- AMMER, C. (1996): Konkurrenz um Licht – zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald. *Forstliche Forschungsberichte München, Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* Nr. 158, 198 S.
- AMMER, C. (2000): Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. *Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft*. Habilitationsschrift an der TU München, Aachen : Shaker-Verlag, 185 S.
- AMMER, C. (2003): Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seed lings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. *Annals of Forest Science*, Vol. 60, pp. 163-171. DOI: 10.1051/forest:2003009.
- AMMER, C. (2004): Untersuchungen zur Raumbesetzung junger Buchen und Fichten. In: BAUHUS, J.; CSAPEK, G. (Hrsg.): Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA. 06.-08. September 2004 in Freiburg/Staufen. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 60, pp. 1-19.
- AMMER, C. (2008): Konkurrenzsteuerung – Anmerkungen zu einer Kernaufgabe des Waldbaus beim Aufbau vielfältiger Wälder. In: MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (MLUV) des Landes Brandenburg Landesforstanstalt Eberswalde (Hrsg.): Biologische Vielfalt – Lebensversicherung des Waldes. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe*, Band 36, pp. 21-26.
- AMMER, C. (2017): Unraveling the importance of inter- and intraspecific competition for the adaptation of forests to climate change. In: Canovas, F. M.; Lüttge, U.; Matyssek, R. (eds.): *Progress in Botany*, Vol. 78, Berlin, Heidelberg : Springer, pp. 345-367.

- AMMER, C.; DINGEL, C. (1997): Untersuchungen über den Einfluß starker Weichlaubholzkonzurrenz auf das Wachstum und die Qualität junger Stieleichen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 116, pp. 346-358.0
- AMMER, C.; ZIEGLER, C.; KNOKE, T. (2005): Zur Beurteilung von intra- und interspezifischer Konkurrenz von Laubbaumbeständen im Dickungsstadium. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 176, No. 5, pp. 85-94.
- AMMER, C.; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008): Ontogenetic variation in the relative influence of light and belowground resources on European beech seedling growth. *Tree Physiology*, Vol. 28, pp. 721-728.
- AMMER, C.; PUETTMANN, C. (2009): Waldbau, quo vadis? – Waldbewirtschaftung zwischen Funktionenorientierung und Multifunktionalität. *Forstarchiv*, Vol. 80, No. 3, pp. 90-96. DOI 10.237603004112-80-90
- AMMER, C.; FÖRSTER, B.; HÖLLERL, S. (2010): Zur Bedeutung von intraspezifischer Konkurrenz bei Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in frühen Verjüngungsstadien. *Forstarchiv*, Vol. 81, No. 4, pp. 175-180.
- ANDERSEN, L. (2001): Survival and Growth of *Fagus sylvatica* Seedlings Root-pruned Prior to Transplanting under Competitive Conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 16, pp. 318-323.
- ANONYMUS (2016): Ordinal Logistic Regression | R Data Analysis Examples. UCLA: Statistical Consulting Group. <https://stats.idre.ucla.edu/r/dae/ordinal-logistic-regression/>, Zugriff am 21.07.2016
- ANONYMUS (2017): "GSA"-Technologie bringt Bauen mit Buche voran. *Holz-Zentralblatt*, Vol. 143, No. 42, pp. 967-968.
- APHALO, P. J.; BALLARÉ, C. L.; SCOPEL, A. L. (1999): Plant-plant signaling, the shade-avoidance response and competition. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 50, No. 340, pp. 1629-1634.
- ARANDA, I.; BERGASA, L. F.; GIL, L.; PARDOS, J. A. (2001): Effects of relative irradiance on the leaf structure of *Fagus sylvatica* L. seedlings planted in the understory of a *Pinus sylvestris* L. stand after thinning. *Annals of Forest Science*, Vol. 58, pp. 673-680.
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde – organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München : BLV-Verlagsgesellschaft, 490p.
- AUFSESS, H. v. (1975): Über die Bildung einer Schutzsperre an der Astbasis von Laub- und Nadelbäumen und ihre Wirksamkeit gegen das Eindringen von Pilzen in das Kernholz lebender Bäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 94, pp. 140-152.
- BACHMANN, M. (1998): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen – Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. *Forstliche Forschungsberichte München, Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* Nr. 171, 235 S.

- BALANDIER, P.; SINOQUET, H.; MARQUIER, A.; VANDAME, M. (2008): Evolution of light requirement with individual's size and links with growth performance of eight-year-old beech saplings in central France. In: TERAZAWA, K.; MADSEN, P.; SAGHEB-TALEBI, S. (Eds.): *Proceedings of the 8th IUFRO International working party 1.01.07 „Ecology and Silviculture of Beech“*, 8-13 September 2008 in Nanae, Hokkaido, Japan, pp. 100-102.
- BARBEITO, I.; COLLET, C.; NINGRE, F. (2014): Crown responses to neighbor density and species identity in a young mixed deciduous stand. *Trees*, Vol. 28, pp. 1751-1765. DOI 10.1007/s00468-014-1082-2.
- BARNA, M.; SCHIEBER, B.; CÍČÁK, A. (2009): Effects of post-cutting changes in site conditions on the morphology and phenology of naturally regenerated beech seedlings (*Fagus sylvatica* L.). *Polish Journal of Ecology*, Vol. 57, No. 3, pp. 461-472.
- BARTHÉLÉMY, D.; CARAGLIO, Y. (2007): Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany*, Vol. 99, pp. 375-407. DOI: 10.1093/aob/mcl260.
- BARTSCH, N.; RÖHRIG, E. (2016): Waldökologie – Einführung für Mitteleuropa. Heidelberg : Springer, 417 p.
- BATES, D. M. (2010): lme4: Mixed effects modeling with R. <http://lme4.r-forge.r-project.org/IMMwR/lrgprt.pdf> , Zugriff am 12.01.2016
- BÄTZ, G.; DÖRFEL, H.; ENDERLEIN, G.; GRIMM, H.; HERRENDÖRFER, G.; KÖRSCHENS, M.; RASCH, D.; SPECHT, G.; THOMAS, E.; TROMMER, R.; WIEGAND, H. (1972): Biometrische Versuchsplanung. Berlin : Deutscher Landwirtschaftsverlag, 355 S.
- BÄUCKER, E.; BUES, C.-T., SCHRÖDER, J. (2007): Holzqualität von Traubeneichen aus Eichen-Kiefern-Mischbeständen. *Forst und Holz*, Vol. 62, No. 9, pp. 17-21.
- BÄUCKER, E.; BUES, C.-T. (2009): Holzqualität von Traubeneichen aus Eichen-Kiefern-Mischbeständen. *Forst und Holz*, Vol. 64, No. 3, pp. 25-30.
- BAZZAZ, F. A. (1997): Allocation of Resources in Plants: State of the Science and Critical Questions. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (eds.): *Plant resource allocation*. San Diego : Academic Press, pp. 1-37.
- BEAUDET, M.; MESSIER, C. (1998): Growth and morphological responses of yellow birch, sugar maple, and beech seedlings growing under a natural light gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 28, pp. 1007-1015.
- BEGON, M.; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. (1991): Ökologie: Individuen, Populationen und Lebensgemeinschaften. – Basel : Birkhäuser, 1024p.
- BEINHOFER, B. (2010): Comparing the financial performance of traditionally managed beech and oak stands with roomy established and pruned stands. *European Journal of Forest Research*, Vol. 129, pp. 175-187. DOI 10.1007/s10342-009-0311-5
- BELSLEY, D. A.; KUH, E.; WELSCH, R. E. (1980): Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity. New York : Wiley, 292pp.

- BEQUET, R.; KINT, V.; CAMPIOLI, M.; VANSTEENKISTE, D.; MUYS, B.; CEULEMANS, R. (2012): Influence of stand, site and meteorological variables on the maximum leaf area index of beech, oak and Scots pine. *European Journal of Forest Research*, Vol. 131, pp. 283-295. DOI 10.1007/s10342-011-0500-x
- BERNHARDT, A.; MANNSFELD, K. (1995): Sächsische Schweiz. In: MANNSFELD, K.; BERNHARDT, A. (Hrsg.): Naturräume in Sachsen. *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Band 238, pp. 193-202.
- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V. (2008): Sachsen im Klimawandel : Eine Analyse. FREISTAAT SACHSEN, STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT. – Dresden : Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung, 211p.
- BERNTSON, G. M.; WAYNE, P. M. (2000): Characterizing the size dependence of resource acquisition within crowded plant populations. *Ecology*, Vol. 81, No. 4, pp. 1072-1085.
- BIGING, G.S.; DOBBERTIN, M. (1992): A Comparison of Distance-Dependent Competition Measures for Height and Basal Area Growth of Individual Conifer Trees. *Forest Science* Vol. 38, No. 3, pp. 695-720.
- BITTERLICH, W. (1952): Die Winkelzählprobe. Ein optisches Meßverfahren zur raschen Aufnahme besonders gearteter Probeflächen für die Bestimmung der Kreisflächen pro Hektar an stehenden Waldbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Jg. 71, Nr. 7/8, S. 215-225.
- BJØRNSTAD, O. N., FALCK, W. (2001): Nonparametric spatial covariance functions: Estimation and testing. *Environmental and Ecological Statistics* 8, pp. 53-70.
- BÖHLMANN, D. (1961): Anatomisch-histologische Untersuchungen im Bereich der Astabzweigung bei Nadel- und Laubbäumen. Dissertation an der Universität Freiburg, 76 S.
- BOLKER, B.M., BROOKS, M.E., CLARK, C.J., GEANGE, S.W., POULSEN, J.R., STEVENS, M.H.H., WHITE, J.-S.S. (2009): Generalized mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 24, Nr. 3, pp. 127-135.
- BOLVANSKÝ, M. (1980/81): Niektoré príčiny vidlicovitosti kmeňa mladých bukových jedincov v rastovej fáze hústin – Some causes of stem dichotomy of young beech individuals in the growth phase of thickets. Zusammenfassung in Deutsch. *Acta dendrobiologica*, Vol. 3/4, pp. 197-245.
- BONN, S. (1998): Dendroökologische Untersuchungen der Konkurrenzdynamik in Buchen-Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt*, Band 3, Tharandt : Fachrichtung Forstwissenschaften der TU Dresden, 226p.
- BONOSI, L. (2006): The influence of light and size on photosynthetic performance, light interception, biomass partitioning and tree architecture in open grown *Acer pseudoplatanus*, *Fraxinus excelsior* and *Fagus sylvatica* seedlings. *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung*, Band 34, Freiburg, 118 p.

- BÖRNER, M.; GUERICKE, M.; LEDER, B.; NUTTO, L.; STÄHR, F.; WEINREICH, A. (2003): Erhebung qualitätsrelevanter Parameter am Einzelbaum – Aufnahmestandards für junge bis mittelalte Laubhölzer als Grundlage für wissenschaftliche Untersuchungen. *Forstarchiv*, Vol. 74, pp. 275-282.
- BRÄUNIG, R.; DIETER, M. (1998): Waldumbau, Kalamitätsrisiken und finanzielle Erfolgskennzahlen. Eine Anwendung von Simulationsmodellen auf Daten eines Forstbetriebes. BERGEN, V.; BRABÄNDER, H. D. (Hrsg.): *Schriften zur Forstökonomie*, Band 18. Frankfurt/M. : Sauerländer's Verlag, 149p.
- BRINKMANN, K.; LANGER-KETTNER, G.; POLLE, A. (2003): Auswirkungen des Pflanzschocks auf Überlebensrate und Gewebequalität in jungen Buchen (*Fagus sylvatica* L.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 174, No. 1, pp. 15-20.
- BROWN, J. M. B. (1951): Influence of shade on the height growth and habit of beech. *Report on Forest Research*, pp. 62-67.
- BROWN, J. M. B. (1952): Growth of Beech in Britain. *Report on Forest Research*, pp. 58-63.
- BROWN, J. M. B. (1955): Shelter and the early growth of beech. *Quarterly Journal of Forestry*, Vol. 49, pp. 175-180.
- BUES, C.-T. (1990): Untersuchung der Holzqualität von Fichten aus unterschiedlich weit begründeten Beständen Süddeutschlands. 159p.
- BUFFET, M.; LE TACON, F.; TEISSIER DU CROS, E. (1981): Sylviculture – Régénération artificielle, plantation - Comportement des plantations. In: TEISSIER DU CROS, E. (Éd.): *Le Hêtre*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique, Département des Recherches Forestières, pp. 264-266.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL) (Hrsg.) (2016): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. 2. Auflage, Berlin.
www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/BMEL_Wald_Broschuere.pdf Zugriff am 01.08.2017
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (1964): Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. *Forstarchiv*, Vol. 35, No. 11, pp. 225-233.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (2003): Grundriss des Waldbaus: ein Leitfaden für Studium und Praxis. Stuttgart : Ulmer, 487p.
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. (1965a): Untersuchungen über die Bedeutung von Unkraut- und Altholzkonkurrenz für junge Buchen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 84, pp. 230-243.
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. (1965b): Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 136, No. 9, pp. 193-210.
- BURTON, P. J. (1993): Some limitations inherent to static indices of plant competition. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, pp. 2141-2152.

BUTIN, H.; KOWALSKI, T. (1983): Die natürliche Astreinigung und ihre biologischen Voraussetzungen. I. Die Pilzflora der Buche (*Fagus sylvatica* L.). *European Journal of Forest Pathology*, Vol. 13, pp. 322-324.

BUVAT, R.; THIÉBAUT, B. (1981): Morphologie végétale. – Observations sur le polymorphisme des axes du Hêtre commun (*Fagus Sylvatica* L.), orthotropie et plagiotropie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, Série III, No. 293, pp. 483-488.

CANHAM, C. D. (1988): Growth and Canopy Architecture of Shade-Tolerant Trees: Response to Canopy Gaps. *Ecology*, Vol. 69, No. 3, pp. 786-795.

CANHAM, C. D.; BERKOWITZ, A. R.; KELLY, V. R.; LOVETT, G. M.; OLLINGER, S. V.; SCHNURR, J. (1996): Biomass allocation and multiple resource limitation in tree seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 26, pp. 1521-1530.

CANNEL, M. G. R.; GRACE, J. (1993): Competition for light: detection, measurement, and quantification. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 23, pp. 1969-1979.

ČATER, M.; SCHMID, I.; KAZDA, M. (2013): Instantaneous and potential radiation effect on underplanted European beech below Norway spruce canopy. *European Journal of Forest Research*, Vol. 132, pp. 23-32. DOI: 10./1007/s10342-012-0651-4

CAO, K.-F. (2001): Morphology and growth of deciduous and evergreen broad-leaved saplings under different light conditions in a Chinese beech forest with dense bamboo undergrowth. *Ecological Research*, Vol. 16, pp. 509-517.

CHANG, W. (2012): R graphics cookbook. Sebastopol/CA : O'Reilly Media, 416p. <http://www.cookbook-r.com/>

CHAAR, H.; COLIN, F. (1999): Impact of late frost on height growth in young sessile oak regenerations. *Annals of Forest Science*, Vol. 56, pp. 417-429.

CHAPIN III, F. S.; BLOOM, A. J.; FIELD, C. B.; WARING, R. H. (1987): Plant Responses to Multiple Environmental Factors. Physiological ecology provides tools for studying how interacting environmental resources control plant growth. *BioScience*, Vol. 37, No. 1, pp. 49-57.

CHEN, H. Y. H. (1997): Interspecific responses of planted seedlings to light availability in interior British Columbia: survival, growth, allometric patterns, and specific leaf area. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 27, pp. 1383-1393.

CLUZEAU, C.; LE GOFF, N.; OTTORINI, J.-M. (1994): Development of primary branches and crown profile of *Fraxinus excelsior*. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 24, pp. 2315-2323.

COLIN, F.; NINGRE, F.; FORTIN, M.; HUET, S. (2012): Quantification of *Quercus petraea* Liebl. forking based on a 23-year-long longitudinal survey. *Forest Ecology and Management*, Vol. 282, pp. 133-141.

COLLET, C.; CHENOST, C. (2006): Using competition and light estimates to predict diameter and height growth of naturally regenerated beech seedlings growing under changing canopy conditions. *Forestry*, Vol. 79, No. 5, pp. 489-502.

- CRAMER, F.-U.; LEDER, B.; LEMKE, P.; RICHTER, J.; SCHMITT, H.-P.; SPELSBERG, G.; VON DER GOLTZ, H.; WAGNER, H. C.; WIESCHMANN, H. (2004): Empfehlungen für eine naturnahe Bewirtschaftung von Fichtenbeständen in Nordrhein-Westfalen – Umbau von gleichaltrigen Fichtenwäldern in naturnahe Mischwälder. Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen (LÖBF) (Hrsg.), 35p.
- CRAWLEY, M. J. (2013): The R Book. 2nd ed. – Chichester : Wiley, 1051p.
- CREMER, E.; RUMPF, H.; WOLF, H.; MAURER, W.; STEINER, W. (2005): Führen Durchforstungen zu Veränderungen der genetischen Strukturen von Buchenbeständen? *Forst und Holz*, Vol. 60, No. 5, pp. 184-188.
- CURT, T.; COLL, L.; PRÉVOSTO, B.; BALANDIER, P.; KUNSTLER, G. (2005): Plasticity in growth, biomass allocation and root morphology in beech seedlings as induced by irradiance and herbaceous competition. *Annals of Forest Science*, Vol. 62, pp. 51-60. DOI: 10.1051/forest:2004092
- CZAJKOWSKI, T.; BOLTE, A. (2006): Frosttoleranz deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) und ihre Beeinflussung durch Trockenheit. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie*, Vol. 40, No. 3, pp. 119-126.
- DALE, M. R. T. (2006): Spatial pattern analysis in plant ecology. 1. paperback ed., originally published 1998. Cambridge : Cambridge University Press, 326p.
- DANIELS, R. F. (1976): Simple Competition Indices and Their Correlation with Annual Loblolly Pine Tree Growth. *Forest Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 454-456.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. (1986): A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 16, pp. 1230-1237.
- DELONG, S. C. (1991): The light interception index: a potential tool for assisting in vegetation management decisions. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 21, pp. 1037-1042.
- DE LUIS, M.; RAVENTÓS, J.; CORTINA, J.; MORO, M. J.; BELLOT, J. (1998): Assessing components of a competition index to predict growth in an even-aged *Pinus nigra* stand. *New Forests*, Vol. 15, No. 3, pp. 223-242.
- DEMIDENKO, E. (2013): Mixed models: theory and applications with R. Wiley series in probability and statistics 893, Hoboken : Wiley, 2nd edition, 725 pp.
- DEUTSCHER FORSTWIRTSCHAFTSRAT (DFWR); DEUTSCHER HOLZWIRTSCHAFTSRAT (DHWR) (Hrsg.) (2015): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). 2. Auflage - Berlin, 56 S.
www.saegeindustrie.de/rvr/docs/dynamicsich/6205/rvr_gesamtdokument_2.auflage_stand_oktober_2015.pdf Zugriff am 31.07.2017
- DIACI, J.; KOZJEK, L. (2005): Beech sapling architecture following small and medium gap disturbances in silver fir-beech old-growth forests in Slovenia. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 12, pp. 481-486.
- DIETER, M.; JANZEN, N. (2015): Deutsches Cluster Forst und Holz im internationalen Wettbewerb. *AFZ-DerWald*, No. 17, pp. 13-15.

- DÖBBELER, H.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M.; NAGEL, J. (2003): BWINPro – Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur Version 6.2, *Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Göttingen*, 121p.
- DÖBBELER, H.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M.; NAGEL, J.; SCHRÖDER, J. (2007): BWINPro - Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur gemeinsamen Version von BWINPro und BWINPro-S, *Niedersächsische/Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen und TU Dresden Lehrstuhl für Waldwachstum und Holzmesskunde Tharandt*, 127p.
- DONG, P. H.; EDER, W.; MUTH, M. (2007): Traubeneichen-Läuterungsversuche im Pfälzerwald. In: DONG, P. H. (Hrsg.): Eiche im Pfälzerwald. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 63, Trippstadt, pp. 57-77.
- DORMANN, C. F.; ELITH, J.; BACHER, S.; BUCHMANN, C.; CARL, G.; CARRÉ, G.; GARCÍA MARQUÉZ, J. R.; GRUBER, B.; LAFOURCADE, B.; LEITÃO, P. J.; MÜNKEMÜLLER, T.; MCCLEAN, C.; OSBORNE, P. E.; REINEKING, B.; SCHRÖDER, B.; SKIDMORE, A. K.; ZURELL, D.; LAUTENBACH, S. (2012): Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, Vol. 36, pp. 27-46, DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- DOUNAVI, A.; KOUTSIAS, N.; ZIEHE, M.; HATTEMER, H. H. (2010): Spatial patterns and genetic structures within beech populations (*Fagus sylvatica* L.) of forked and non-forked individuals. *European Journal of Forest Research*, Vol. 129, pp. 1191-1202. DOI 10.1007/s10342-010-0409-9
- DRÉNOU, C. (2000): Pruning trees: the problem of forks. *Journal of Arboriculture*, Vol. 26, No. 5, pp. 264-269.
- DUPLAT, P.; DÉMARCQ, P.; DEMOLIS, C. (1997): Le cloisonnement sylvicole induit-il des différences entre les arbres de bordure et les arbres intérieurs dans un jeune peuplement de chêne sessile? *ONF – Bulletin Technique*, Vol. 33, pp. 33-47.
- DUPRÉ, S.; THIÉBAUT, B.; TEISSIER DU CROS, E. (1986): Morphologie et architecture des jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L.) – Influence du milieu, variabilité génétique. *Annales des sciences forestières*, Vol. 43, No. 1, pp. 85-102.
- EHRING, A.; KELLER, O. (2016): Versuch zur Eichentrupp-Pflanzung in Baden-Württemberg. *AFZ-DerWald*, No. 14, pp. 29-32.
- EICHHORN, J. (2016): Einleitung. In: EICHHORN, J.; GUERICKE, M.; EISENHAUER, D.-R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? *Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)*, Band 10. München : oekom Verlag, pp. 7-13.
- EICHHORN, J.; HÖLTKEN, A.; KLINCK, C. (2016): Zur Resilienz von Wäldern. In: EICHHORN, J.; GUERICKE, M.; EISENHAUER, D.-R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? *Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)*, Band 10. München : oekom Verlag, pp. 49-80.

- EISENHAUER, D.-R.; GEMBALLA, R.; PETZOLD, R.; WOLF, H.; SCHLUTOW, A.; OTTO, L.-F.; BAIER, P. (2016): Klimarisiken und Anpassungsmöglichkeiten für Fichten- und Kiefernforste in Sachsen. In: EICHHORN, J.; GUERICKE, M.; EISENHAUER, D.-R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? *Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)*, Band 10. München : oekom Verlag, pp. 103-180.
- ENQVIST, B. J.; NIKLAS, K. J. (2002): Global Allocation Rules for Patterns of Biomass Partitioning in Seed Plants. *Science*, Vol. 295, pp. 1517-1520.
- FABRICIUS, L. (1929): Forstliche Versuche. IV. Erkennung von Auslesestämmchen in Buchenjüngwüchsen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 51, pp. 14-20.
- FAHLVIK, N.; EKÖ, P.-M.; PETTERSSON, N. (2005): Influence of precommercial thinning grade on branch diameter and crown ratio in *Pinus sylvestris* in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 20, pp. 243-251. DOI: 10.1080/02827580510008266
- FAHRMEIR, L.; KNEIB, T.; LANG, S. (2009): Regression : Modelle, Methoden und Anwendungen. – 2. Aufl. – Heidelberg : Springer-Verlag, 501p.
- FALCONE, P.; KELLER, R.; LE TACON, F.; OSWALD, H. (1986): Facteurs influençant la forme des feuillus en plantations. *Revue Forestière Française*, Vol. 38, No. 3, pp. 315-323.
- FÄLLMAN, K.; LIGNÉ, D.; KARLSSON, A.; ALBREKTSON, A. (2003): Stem Quality and Height Development in a *Betula*-Dominated Stand Seven Years After Precommercial Thinning at Different Stump Heights. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 18, pp. 145-154. DOI: 10.1080/02827580310003713
- FARAWAY, J. J. (2006): Extending the Linear Model with R. Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models. Texts in Statistical Science, Chapman & Hall/CRC, 299 pp.
- FISCHER, F. (1968): Grundsätze für die Wahl der Pflanzverbände. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 119, pp. 402-407.
- FISCHER, H. (1998): Acker-Erstaufforstungen - Bestandesbegründung, Wachstum und Ökologie an Fallbeispielen. *Hainholz Forstwissenschaften* Band 2, Göttingen : Hainholz, 324 S.
- FISCHER, H. (2000): Qualitätsverbesserung bei jungen Traubeneichen (*Quercus petraea* LIEBL.) allein durch innerartliche Konkurrenz. *Forst und Holz*, Vol. 55, No. 12, pp. 377-382.
- FISCHER, H.; HUTH, F., HAGEMANN, U.; WAGNER, S. (2016): Developing Restoration Strategies for Temperate Forests Using Natural Regeneration Processes. In: STANTURF, J. A.: *Restoration of Boreal and Temperate Forests*. Boca Raton : CRC Press, pp. 103-164.
- FLECK, S.; NIINEMETS, Ü.; CESCATTI, A.; TENHUNEN, J. D. (2003): Three-dimensional lamina architecture alters light-harvesting efficiency in *Fagus*: a leaf-scale analysis. *Tree Physiology*, Vol. 23, pp. 577-589.
- FLEDER, W. (1987): Erziehungsgrundsätze für Buchenbestände. *Der Forst- und Holzwirt*, Vol. 42, No. 5, pp. 107-111.

- FRECH, A.; LEUSCHNER, C.; HAGEMEIERS, M.; HÖLSCHER, D. (2003): Nachbarschaftsbezogene Analyse der Kronenraumbesetzung von Esche, Hainbuche und Winterlinde in einem artenreichen Laubmischwald (Nationalpark Hainich, Thüringen). *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 122, pp. 22-35.
- FORRESTER, D. I.; COLLOPY, J. J.; BEADLE, C. L.; BAKER, T. G. (2012): Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertilizer application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, Vol. 267, pp. 104-116. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.11.039
- GADOW, K. V.; ZHAO, X.H.; TEWARI, V.P.; ZHANG, C.Y.; KUMAR, A.; RIVAS, J.J.C.; KUMAR, R. (2016): Forest observational studies: an alternative to designed experiments. *European Journal of Forest Research* Vol. 135, pp. 417-431. DOI 10.1007/s10342-016-0952-0
- GATTER, W. (1972): Das Ringeln der Spechte. *Journal of Ornithology*, Vol. 113, No. 2, pp. 207-213.
- GAUER, J.; ALDINGER, E. (Hrsg.) (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke mit Karte 1:1.000.000. SCHLENKER, G. (Begr.): *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung*, Nr. 43, 324 pp.
- GEMMEL, P.; NILSSON, U.; WELANDER, T. (1996): Development of oak and beech seedlings planted under varying shelterwood densities and with different site preparation methods in southern Sweden. *New Forests*, Vol. 12, pp. 141-161.
- GOCKEL, H. A. (1994): Soziale und qualitative Entwicklungen sowie Z-Baumhäufigkeiten in Eichenjungbeständen – Die Entwicklung eines neuen Pflanzschemas „Die Truppplanzung“. Dissertation an der Universität Göttingen, Fachbereich Forstwissenschaften, 168 S.
- GOCKEL, S. (2016): Wachstumsreaktionen einzeln eingemischter Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia* L.) in Fichtenjungbeständen nach Freistellung. Dissertation Technische Universität Dresden, 348p. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-207606> letzter Zugriff am 17.10.2017
- GOLDBERG, D. E. (1990): Components of Resource Competition in Plant Communities. In: GRACE, J. B. ; TILMAN, D. (Eds.) *Perspectives on Plant Competition*. San Diego : Academic Press, Inc., pp. 27-49.
- GRIME, J. P. (1977): Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, Vol. 111, No. 982, pp. 1169-1194.
- GUERICKE, M. (1996): Versuche zur Begründung von Eichenbeständen durch Nesterpflanzung. *Forst und Holz*, Vol. 51, No. 17, pp. 577-582.
- GUERICKE, M. (2001): Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua*, Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell –Versuchsflächenanalyse, Modellparametrisierung und waldbauliche Konsequenzen für die Behandlung von Buchen-Lärchen-Mischbeständen im Südniedersächsischen Bergland. Göttingen : Cuvillier-Verlag, 220 S. + 48 S. Anhang.

- GUERICKE, M.; SCHLUTOW, A.; GEMBALLA, R.; EISENHAUER, D.-R.; KLINCK, C.; EICHHORN, J. (2016): Vorkommen und Standortsansprüche der Baumarten im Klimawandel. In: EICHHORN, J.; GUERICKE, M.; EISENHAUER, D.-R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? *Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)*, Band 10. München : oekom Verlag, pp. 81-102.
- GÜRTH, P.; VELASQUEZ, C. (1991): Qualitätsuntersuchungen an Eichenjungbeständen im Markgräferland. *Forst und Holz*, Vol. 23, pp. 671-676.
- HAGEMANN, U. (2005): Quality aspects of natural regeneration in gaps in two sugar maple-yellow birch forest stands in Québec, Canada. Masterarbeit, TU Dresden, 105p.
- HAGEMANN, U.; KELEN, G. v. D.; WAGNER, S. (2013): Comparative Assessment of Natural Regeneration Quality in Two Northern Hardwood Stands. *Northern Journal of Applied Forestry*, Vol. 30, No. 1, pp. 5-15. DOI: 10.5849/njaf.12-002
- HAMM, T.; WEIDIG, J.; HUTH, F.; KUHLSCH, W.; WAGNER, S. (2014): Wachstumsreaktionen junger Weißtannen-Voraussaaten auf Begleitvegetation und Strahlungskonkurrenz. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 185, No. ¾., pp. 45-59.
- HANSEN, J. K.; JØRGENSEN, B. B.; STOLTZE, P. (2003): Variation of Quality and Predicted Economic Returns between European beech (*Fagus sylvatica* L.) Provenances. *Silvae Genetica*, Vol. 52, no. 5-6, pp. 185-197.
- HANSEN, J.; SPIECKER, H. (2005): Conversion of Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST.) forests in Europe. In: Stanturf, J.A.; Madsen, P. (Eds.): Restoration of boreal and temperate forests. Boca Raton : CRC Press, pp. 339-347, 569 pp.
- HANSEN, J.; NAGEL, J. (2014): Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung und theoretische Grundlagen. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 11, Göttingen : Universitätsverlag, 234p.
- HAPLA, F.; MILITZ, H. (2008): Verwertung und Verwendung von Buchenholz. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (NW-FVA) (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Versuchsanstalt*, Band 3, pp. 311-326.
- HARRELL, F. E. JR. (2001): Regression Modeling Strategies: with applications to linear models, logistic regression, and survival analysis. Springer Series in Statistics, New York, Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 568 S.
- HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. (1997): Wachstum junger Eichen unter Schirm. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*, Reihe A, Band 147, 142 S.
- HEDDERICH, J.; SACHS, L. (2016): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. 15. Auflage – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 968 S.
- HEHN, M. (1997): Die geschichtliche Entwicklung des Buchen-Voranbaus in Deutschland. In: LANDESANSTALT FÜR ÖKOLOGIE, BODENORDNUNG UND FORSTEN/LANDESAMT FÜR AGRARORDNUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.), *Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen*, Band 13, S. 7-16.

- HEILMEIER, H.; ERHARD, M.; SCHULZE, E.-D. (1997): Biomass Allocation and Water Use under Arid Conditions. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (eds.): *Plant resource allocation*. San Diego : Academic Press, pp. 93-111.
- HEIN, S. (2004): Zur Steuerung von Astreinigung und Dickenwachstum bei Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.). *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung*, Band 25, Freiburg, 263 p.
- HEIN, S. (2008): Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica*. *Forest Ecology and Management*, Vol. 256, pp. 2046-2057. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.07.033
- HEIN, S.; LENK, E.; KLÄDTKE, J.; KOHNLE, U. (2007): Z-Baum orientierte Auslesedurchforstung in Buche [*Fagus sylvatica* L.]: Auswirkungen auf Qualität, Sortenstruktur und Wertleistung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 178, No. 1, pp. 8-20.
- HEIN, S.; WEISKITTEL, A. R.; KOHNLE, U. (2008): Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in south-western Germany. *European Journal of Forest Research*, Vol. 127, pp. 481-493. DOI: 10.1007/s10342-008-0231-9
- HEIN, S.; WEISKITTEL, A. R. (2010): Cutpoint analysis for models with binary outcomes: a case study on branch mortality. *European Journal of Forest Research*, Vol. 129, pp. 585-590. DOI: 10.1007/s10342-010-0358-3
- HENGST, E. (1964): Der Kronenbau der Buche im Erzgebirge. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 83, pp. 79-87.
- HENRIKSSON, J. (2001): Differential shading of branches or whole trees: survival, growth, and reproduction. *Oecologia*, Vol. 126, pp. 482-486. DOI 10.1007/s004420000547
- HESSENMÖLLER, D. (2002): Modelle zur Wachstums- und Durchforstungssimulation im Göttinger Kalkbuchenwald. Dissertation an der Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaft und Waldökologie, 163 S. https://www.researchgate.net/profile/Dominik_Hessenmoeller/publication/307965017_Modelle_zur_Wachstums-und_Durchforstungssimulation_im_Gottinger_Kalkbuchenwald/links/57d3e79808ae5f03b490cee1/Modelle-zur-Wachstums-und-Durchforstungssimulation-im-Goettinger-Kalkbuchenwald.pdf Zugriff am 25.04.2017
- HOFMANN, M.; DURKA, W.; LIESEBACH, M.; BRUELHEIDE, H. (2015): Intraspecific variability in frost hardiness of *Fagus sylvatica* L. *European Journal of Forest Research*, Vol. 134, pp. 433-441. DOI 10.1007/s10342-015-0862-6
- HOLMES, M. J.; REED, D. D. (1991): Competition Indices for Mixed Species Northern Hardwoods. *Forest Science*, Vol. 37, No. 5, pp. 1338-1349.
- HOSIUS, B.; LEINEMANN, L.; BERGMANN, F.; MAURER, W. D.; TABEL, U. (2003): Genetische Untersuchungen zu Familienstrukturen und zur Zwieselbildung in Buchenbeständen. *Forst und Holz*, Vol. 58, No. 3, pp. 51-54.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. (2000): Applied logistic regression.- 2. ed. – *Wiley series in probability and statistics*, New York : Wiley, 375p.

- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. (2013): Applied logistic regression. – 3. ed. – *Wiley series in probability and statistics*, Hoboken : Wiley, 500p.
- HOUŠKOVÁ, K.; MAUER, O. (2013): Effect of the density of transplants in reforestation on the morphological quality of the above-ground part of European beech (*Fagus sylvatica* L.) six years after planting. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. Vol. 61, No. 6, pp. 1703-1713.
- HUBER, G.; PETKOVA, K.; KONNERT, M.; THIEL, D. (2014): Transferversuche mit Buche (*Fagus sylvatica*) zur Prüfung der Anpasstheit im Klimawandel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 185, No. ¾, pp. 82-96.
- HURLBERT, S. H. (1984): Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, Vol. 54, No. 2, pp. 187-211.
- HUSSENDÖRFER, E.; SCHÜTZ, J.-P.; SCHOLZ, F. (1996): Genetische Untersuchungen zu phänotypischen Merkmalen an Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 147, No. 10, pp. 785-802.
- HUTH, F.; WAGNER, S. (2013): Ökosystemleistungen von Dauerwäldern – eine aktuelle Analyse des Waldbaus. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 164, No. 2, pp. 27-36.
- IRRGANG, S. (2002): Klimaänderung und Waldentwicklung in Sachsen – Auswirkungen auf die Forstwirtschaft. *Forstarchiv*, Vol. 73, pp. 137-148.
- JEFFERS, J. N. (1960): Experimental design and analysis in forest research. Stockholm : Almqvist & Wiksells, 172 p.
- KATÓ, F.; MÜLDER, D. (1978): Über die soziologische und qualitative Zusammensetzung gleichaltriger Buchenbestände: ein Beitrag zur Rationalisierung der Buchenwirtschaft. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 51, 110p.
- KEELING, H. C.; PHILLIPS, O. L. (2007): A calibration method for the crown illumination index for assessing forest light environments. *Forest Ecology and Management*, Vol. 242, pp. 431-437. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.01.060
- KENK, G. (1990): Fichtenbestände aus Weitverbänden – Entwicklung und Folgerungen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 109, pp. 86-100.
- KERR, G.; BOSWELL, R. C. (2001): The influence of spring frosts, ash bud moth (*Prays fraxinella*) and site factors on forking of young ash (*Fraxinus excelsior*) in southern Britain. *Forestry*, Vol. 74, No. 1, pp. 29-40.
- KESSEL, N.H. (1994): Das Wachstum von Buchenwildlingen und Baumschulpflanzen nach Sproßschnitt, Wurzelschnitt, Konkurrenzregelung, Beschattung und bei weitem Pflanzverband. Inaugural-Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät Freiburg im Breisgau, 125pp..
- KIKUZAWA, K.; UMEKI, K. (1996): Effect of Canopy Structure on Degree of Asymmetry of Competition in Two Forest Stands in Northern Japan. *Annals of Botany*, Vol. 77, pp. 565-571.

- KINT, V.; HEIN, S.; CAMPIOLI, M.; MUYS, B. (2010): Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees. *Forest Ecology and Management*, Vol. 260, pp. 2023-2034. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.09.008
- KLEIN, E. (1983): Rationelle Pflanzverbände bei der künstlichen Begründung von Buchen-Vorausverjüngungen. *AFZ*, No. 38, pp. 231-233.
- KLEINSCHMIT, H. (1977): Forstpflanzenzüchtung und Saatgutbereitstellung beim Laubholz. *Der Forst- und Holzwirt*, No. 21, pp. 427-433.
- KLINCK, C.; GEMBALLA, R.; GUERICKE, M.; ENDE, H.-P. (2016): Klimawandel global und regional. In: EICHHORN, J.; GUERICKE, M.; EISENHAEUER, D.-R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? *Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG)*, Band 10. München : oekom Verlag, pp. 31-47.
- KOCH, H. (1992): Pflanzenzahlen und Pflanzverbände am Beispiel von Kiefer, Eiche und Buche. *Allgemeine Forstzeitschrift AFZ*, No. 5, pp. 245-247.
- KONNERT, M.; SCHMIDT, S. (1996): Genetische Konsequenzen der Größensortierung in der Baumschule: Erste Ergebnisse. In: MÜLLER-STARCK, G.; AMMER, C. (Hrsg.): *Biodiversität und nachhaltige Forstwirtschaft. Forum Genetik – Wald – Forstwirtschaft*. Landsberg : ecomed Verlag, pp. 222-238.
- KONNERT, M.; HOSIUS, B.; HUSSENDÖRFER, E. (2007): Genetische Auswirkungen waldbaulicher Maßnahmen – Ergebnisse, Stand und Forschungsbedarf. *Forst und Holz*, Vol. 62, No. 1, pp. 8-14.
- KOWALKE, H. (Hrsg.) (2000): Sachsen. *Perthes Länderprofile*, Gotha : Klett-Perthes, 376pp.
- KRAHL-URBAN, J. (1951/53a): Hinweise auf individuelle Erbanlagen bei Eichen und Buchen. *Zeitschrift für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung*, No. ½ , pp. 51-59.
- KRAHL-URBAN, J. (1951/53b): Erbanlagen und Züchtungsmöglichkeiten bei Rotbuche, Stiel- und Traubeneihe. *Zeitschrift für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung*, No. ½, pp. 114-120.
- KRAHL-URBAN, J. (1953): Baumtypen bei Eichen und Buchen. *Allgemeine Forstzeitschrift*, Vol. 8, No. 20, pp. 245-248.
- KRAHL-URBAN, J. (1962): Buchen-Nachkommenschaften. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 133, No. 2, pp. 29-38.
- KRAHL-URBAN, J. (1963): Untersuchungen über Verbandsweiten bei Buchenpflanzungen. *Forstarchiv*, Vol. 34, No. 6, pp. 157-164.
- KRAMER, H. (1988): Waldwachstumslehre – ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Hamburg : Parey, 374p.
- KRAMER, H. (1990): Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. 2. Aufl. – Frankfurt/Main : Sauerländer's Verlag, 157p.

KRÄNKEL, J. (2007): Qualitätsentwicklung vorangebauter Buchen bei variierender Seitendruckkonkurrenz. Bachelorarbeit an der TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, 53 S.

KUEHNE, C.; KUBLIN, E.; PYTTEL, P.; BAUHUS, J. (2013): Growth and form of *Quercus robur* and *Fraxinus excelsior* respond distinctly different to initial growing space: results from 24-year-old Nelder experiments. *Journal of Forestry Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-14. DOI 10.1007/s11676-013-0320-6.

KUNSTLER, G.; CURT, T.; BOUCHAUD, M.; LEPART, J. (2005): Growth, mortality, and morphological response of European beech and downy oak along a light gradient in sub-Mediterranean forest. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 35, pp. 1657-1668.

KÜPPERS, M. (1989): Ecological Significance of Aboveground Architectural Patterns in Woody Plants: A Question of Cost-Benefit Relationships. *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 4, No. 12, pp. 375-379.

KÜPPERS, M.; HEILAND, I.; SCHNEIDER, H.; NEUGEBAUER, P. J. (1999): Light-flecks cause non-uniform stomatal opening – studies with special emphasis on *Fagus sylvatica* L. *Trees*, Vol. 14, pp. 130-144.

KURTH, A. (1946): Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. Dissertation an der ETH Zürich. *Sonderabdruck Mitteilungen der schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, Vol. 24, No. 2, pp. 581-658

KÜßNER, R. (1999): Ein auf Strahlungsmessungen basierendes Verfahren zur Bestimmung des Blattflächenindex und zur Charakterisierung der Überschirmung in Fichtenbeständen. Methodische Untersuchungen und Anwendung in der waldbaulichen Praxis. Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt / Contributions to Forest Sciences, Heft 5 – Stuttgart : Ulmer Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt. – Stuttgart : Ulmer, 192 S.

KÜßNER, R.; FEBEL, S. (2000): Kronenmerkmale von Buchenvoranbauten. In: TESÁŘ, V. (Hrsg.): Die Buche im ökologischen Waldbau. XIV Gemeinsames Waldbau-Kolloquium „Brno-Tharandt“ vom 12.-14.10.2000. Brno, Křtiny : Mendel-Universität für Land- und Forstwirtschaft, pp. 27-33.

KÜSTER, B. (2000): Die Auswirkungen unterschiedlicher waldbaulicher Behandlungen auf das Wachstum und die Qualitätsentwicklung junger Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Forstliche Forschungsberichte München, Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* Nr. 179, 223 S.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. (1998): *Plant Physiological Ecology*. New York : Springer, 540 p.

LANDESANSTALT FÜR ÖKOLOGIE, BODENORDNUNG UND FORSTEN (LÖBF) (2003): Kenndaten ausgewählter Waldumbau-Bestände im Forstamt Arnsberg, Stadtwald Meschede und Stadtwald Warstein, unveröffentlichtes Material.

LANDESFORSTPRÄSIDIUM SACHSEN (LFP) (2004): Abfrageergebnisse aus der Forsteinrichtungsdatenbank Sachsen (FESA), unveröffentlichtes Material.

- LANGSHAUSEN, J. (2009): Optionen der Wachstumssteuerung zur Produktion von Wertholz bei der Baumart Buche (*Fagus sylvatica* L.). Dissertation Universität Freiburg, Fakultät Forst- und Umweltwissenschaften, 291 p. www.freidok.uni-freiburg.de/data/7266. Zugriff am 30.06.2017
- LAROQUE, G. R. (2002): Examining Different Concepts for the Development of a Distance-Dependent Competition Model for Red Pine Diameter Growth Using Long-Term Stand Data Differing in Initial Stand Density. *Forest Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 24-34.
- LEDER, B. (1992): Weichlaubhölzer: Verjüngungsökologie, Jugendwachstum und Bedeutung in Jungbeständen der Hauptbaumarten Buche und Eiche. *Schriftenreihe der Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen*, Sonderband, Arnsberg : Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen, 416p.
- LEDER, B.; BODELSCHWINGH, H. v. (2008): Dynamik und Qualität von Buchen auf 9-jährigen Buchen-Saatplätzen unter Fichtenschirm. *Forst und Holz*, Vol. 63, No. 2, pp. 22-25.
- LEDER, B.; GUTSCHE, H. (1997): Passiver Voranbau mit Buchen-Wildlingen. *Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen*, Band 13, S. 31-42.
- LEDER, B.; WEIHS, U. (2000): Wachstum und qualitative Entwicklung eines 8 Jahre alten Buchen-Verbandsversuches unter Kieferschirm im Niederrheinischen Tiefland. *Forst und Holz*, Vol. 55, No. 6, pp. 172-176.
- LEDER, B.; HILLEBRAND, K. (2001): Überlegungen zur Charakterisierung der Qualitätsentwicklung in Buchen-Jungwüchsen. *Forst und Holz*, Vol. 56, No. 2, pp. 44-49.
- LEDER, B.; HANKE, U. (2005): Qualitative Beschreibung eines 118-jährigen Rotbuchen-Reinbestandes aus Weitverband. *Forstarchiv*, Vol. 76, pp. 102-110.
- LEDER, B.; WAGNER, S., WOLLMERSTÄDT, J.; AMMER, C. (2003): Bucheckern-Voraussaat unter Fichtenschirm – Ergebnisse eines Versuchs des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten/Sektion Waldbau. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 122, pp. 160-174.
- LEE, W. K.; GADOW, K. v. (1997): Iterative Bestimmung der Konkurrenzbaume in *Pinus densiflora* Beständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 168, No. 3-4, pp. 41-45.
- LEIBUNDGUT, H.; AUER, C.; BURKART, R. W. /6523(1976): Grundlagen zur Jungwaldpflege. Ergebnisse zwanzigjähriger Untersuchungen über die Vorgänge der Ausscheidung, Umsetzung und Qualitätsentwicklung in jungen Eichenbeständen. In: BOSSHARD, W. (Hrsg.): *Mitteilungen Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, Vol. 52, No. 4, pp. 313-371.
- LEONHARDT, B.; WAGNER, S. (2006): Qualitative Entwicklung von Buchen-Voranbauten unter Fichtenschirm. *Forst und Holz*, Vol. 61, No. 11, S. 454-457.
- LE TACON, F. (1985): Die Pflanzung auf der Freifläche: Einer der Gründe für die schlechte Form der Buche im Nordosten von Frankreich. *Der Forst- und Holzwirt*, Vol. 38, No. 12, pp. 339-342.

- LEWARK, S. (1987): Untersuchungen an Buchenbeständen Nordwestdeutschlands über die Variation der Rohdichte. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, No. 88, Frankfurt/Main : Sauerländer Verlag, 118 S.
- LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; DÖLL, M.; FIETZ, H.-J.; BACH, T.; KOZEL, U.; MEIER, D.; RAHMSDORF, U. (1981): Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynthesis Research*, Vol. 2, pp. 115-141.
- LIESEBACH, M.; WEISSENBACHER, L.; NEBENFÜHR, W. (2005): Ergebnisse aus dem 100-jährigen Herkunftsversuch mit Eiche von CIESLAR. *Austrian Journal of Forest Science/Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, Vol. 122, No. 1, pp. 1-18.
- LINNERT, M. (2009): Wachstum und Qualität junger Buchen in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand. *Göttinger Forstwissenschaften* Bd. 3 - Göttingen : Universitätsverlag, 143 S. https://goedoc.uni-goettingen.de/goescholar/bitstream/handle/1/5118/GoeForst3_Linnert.pdf?sequence=1
- LOETSCH, F.; HALLER, K. E. (1964): Statistics of forest inventory and information from aerial photographs. In: *Forest Inventory*, Vol. 1. – München : BLV, 436p.
- LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. (1973): Inventory data collected by terrestrial measurements and observations, data processing in forest inventory, the sample plot, plotless sampling and regeneration survey, list sampling with unequal probabilities and planning, performance and field checking of forest inventories. In: *Forest Inventory*, Vol. 2. – München : BLV, 469p.
- LÖF, M.; WELANDER, N. T. (2000): Carry-over effects on growth and transpiration in *Fagus sylvatica* seedlings after drought at various stages of development. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 30, pp. 468-475.
- LONGUETAUD, F.; PIBOULE, A.; WERNSDÖRFER, H.; COLLET, C. (2013): Crown plasticity reduces inter-tree competition in a mixed broadleaved forest. *European Journal of Forest Research*, Vol. 132, pp. 621-634. DOI 10.1007/s10342-013-0699-9
- LORIMER, C. G. (1983): Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. *Forest Ecology and Management*, Vol. 6, pp. 343-360.
- LÜPKE, B. v. (1982): Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 74. Frankfurt/Main : Sauerländer's-Verlag, 123 S.
- LÜPKE, B. v. (1987): Einflüsse von Altholzüberschirmung und Bodenvegetation auf das Wachstum junger Buchen und Traubeneichen. *Forstarchiv*, Vol. 58, pp. 18-23.
- LÜPKE, B. v. (2004): Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. *Forstarchiv*, Vol. 75, pp. 43-50.

- LÜPKE, B. V.; SPELLMANN, H. (1997): Aspekte der Stabilität und des Wachstums von Mischbeständen aus Fichte und Buche als Grundlage für waldbauliche Entscheidungen. *Forstarchiv*, Vol. 68, pp. 167-179.
- LÜPKE, B. V.; HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. (2004): Beitrag zur Modellierung der Jungwuchsentwicklung am Beispiel von Traubeneichen-Buchen-Mischverjüngungen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 175, No. 4/5, pp. 61-69.
- MADSEN, H.; THYREGOD, P. (2011): Introduction to General and Generalized Linear Models. Boca Raton : CRC-Press, 302 p.
- MÄKINEN, H. (1996): Effect of Intertree Competition on Branch Characteristics of *Pinus sylvestris* Families. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 11, pp. 129-136.
- MÄKINEN, H. (2002): Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. *Trees*, Vol. 16, 346-353. DOI 10.1007/s00468-002-0162-x
- MÄKINEN, H. (1999): Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 29, pp. 1216-1224.
- MÄKINEN, H.; COLIN, F. (1999): Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 29, pp. 1225-1236.
- MÄKINEN, H.; HEIN, S. (2006): Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, Vol. 125, pp. 239-248. DOI 10.1007/s10342-006-0115-9
- MANTAU, U. (2015): Die überragende Bedeutung des Nadelholzes – der Laubholz-Irrweg. *AFZ-DerWald*, No. 17, pp. 24-26.
- MARVIE-MOHADJER, M. R. (1975): Über Qualitätsmerkmale der Buche – Untersuchungen über die Abhängigkeit verschiedener morphologischer Merkmale der Buche (*Fagus silvatica* L.) vom Standort. *Beiheft zu den Zeitschriften des Schweizerischen Forstvereins*, No. 54, 105p.
- MATTHES, U. (1998): Waldökologische Analyse und Bewertung von Umbaumaßnahmen im bayerischen Staatswald als Beitrag für eine naturnahe Forstwirtschaft. München : Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 208p.
- MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. (1990): Generalized linear models. 2nd ed. – *Monographs on statistics and applied probability* No. 37, London : Chapman and Hall, 511pp.
- MCCULLOCH, C. E.; SEARLE, S. R.; NEUHAUS, J. M. (2008): Generalized, linear, and mixed models. Wiley series in probability and statistics 2nd edition, Hoboken, NJ : Wiley, 384 S.

- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MURL) (1991): Wald 2000. Gesamtkonzept für eine ökologische Waldbewirtschaftung des Staatswaldes in Nordrhein-Westfalen, 55p.
- MITSCHERLICH, G. (1970): Wald, Wachstum und Umwelt – Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Erster Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand. Frankfurt/M. : Sauerländer's Verlag, 142 S.
- MITSCHERLICH, G. (1975): Wald, Wachstum und Umwelt – Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Dritter Band: Boden, Luft und Produktion. Frankfurt/M. : Sauerländer's Verlag, 352 S.
- MÖHRING, B. (2004): Betriebswirtschaftliche Analyse des Waldumbaus. *Forst und Holz*, Vol. 59, No. 11, pp. 523-530.
- MÖHRING, B.; LEEFKEN, G.; GUTSCHE, C. (2008): Betriebswirtschaftliche Bewertung von Buchenwäldern. In NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (NW-FVA) (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Versuchsanstalt*, Band 3, pp. 327-343.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2015): Nadelholz – ökonomische Basis für Forstbetriebe. *AFZ-DerWald*, No. 17, pp. 20-23.
- MONSERUD, R. A.; EK, A. R. (1977): Prediction of Understory Tree Height Growth in Northern Hardwood Stands. *Forest Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 391-400.
- MOREL, P.-J.; PLANCHAIS, I. (2000): Plantation de hêtre sous abri: une technique à préconiser. Exemple d'une plantation expérimentale en forêt communale de Montbéliard (Doubs). *ONF Bulletin Technique*, Vol. 39, pp. 7-18.
- MOSANDL, R. (1996): Strategien und Hemmnisse beim Übergang zum „naturnahen“ Waldbau im sächsischen Mittelgebirge. In: SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (LAF) (Hrsg.): *Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten*, Heft 6, pp 64-75.
- MOSANDL, R. (2000): Waldbauliche Rationalisierungsmöglichkeiten im Bereich der Bestandesbegründung. In: WAGNER, S. (Hrsg.): *Perspektiven in der Waldbau-Wissenschaft. Ehrenkolloquium anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Dr. h.c. Harald Thomasius am 15.10.1999 in Tharandt. Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences*, Beiheft 1, pp. 79-95.
- MOSANDL, R.; BURSCHEL, P.; SLIWA, J. (1988): Die Qualität von Ausleseebäumen in Eichenjungbeständen. *Forst und Holz*, No. 2, pp. 37-41.
- MOSANDL, R.; EL KATEB, H.; ECKER, J. (1991): Untersuchungen zur Behandlung von jungen Eichenbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 110, pp. 358-370.
- MOSANDL, R.; KÜßNER, R. (1999): Conversion of pure pine and spruce forests into mixed forests in eastern Germany: some aspects of silvicultural strategy. In: OLSTHOORN, A. A., BARTELINK, H. H.; GARDINER, J. J.; PRETZSCH, H.; HEKHUIS, H. J.; FRANC, A. (Eds.): *Management of mixed-species forest: silviculture and economics. IBN Scientific Contributions 15*, Wageningen : DLO Institute for Forestry and Nature Research (IBN-DLO), pp. 208-218.

MUHLE, O.; KAPPICH, I. (1979): Erste Ergebnisse eines Buchen-Provenienz- und Verbandsversuchs im Forstamt Bramwald. *Forstarchiv*, Vol. 50, No. 4, pp. 65-69.

MÜLLER-STARCK, G. (1996): Beiträge der Forstgenetik zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung. In: MÜLLER-STARCK, G.; AMMER, C. (Hrsg.): *Biodiversität und nachhaltige Forstwirtschaft. Forum Genetik – Wald – Forstwirtschaft*. Landsberg : ecomed Verlag, pp. 259-283.

MÜNDER, K. (2005): Konkurrenzuntersuchungen und Wachstumsmodellierung in Waldumbaubeständen des Mittleren Erzgebirges. Dissertation an der TU Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, 160 S. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1163431350882-40369>

MUTH, C.; BAZZAZ, F. A. (2003): Tree canopy displacement and neighborhood interactions. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 33, pp. 1323-1330. DOI 10.1139/X03-045

NAGEL, R.-V.; SPELLMANN, H. (2008): Wachstum, Behandlung und Ertrag von Reinbeständen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestdeutschland. NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (NW-FVA) (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Versuchsanstalt*, Band 3, S. 221-265.

NAGEL, R.-V.; RUMPF, H. (2010): Der Eichenverbandsversuch Ahlhorn: Ergebnisse nach 35-jähriger Beobachtungsdauer. *Forst und Holz*, Vol. 65, No. 3, pp. 14-21.

NELDER, J. A. (1962): New Kinds of Systematic Designs for Spacing Experiments. *Biometrics*, Vol. 18, No. 3, pp. 283-307.

NEPVEU, G. (1981): Le bois de hêtre – Propriétés du bois de hêtre. In: TEISSIER DU CROS, E. (Éd.): *Le Hêtre*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique, Département des Recherches Forestières, pp. 377-409.

NEWTON, M.; LACHENBRUCH, B.; ROBBINS, J. M.; COLE, E. C. (2012): Branch diameter and longevity linked to plantation spacing and rectangularity in young Douglas fir. *Forest Ecology and Management*, Vol. 266, pp. 75-82. DOI 10.1016/j.foreco.2011.11.009

NEWTON, P. F.; JOLLIFFE, P. A. (1998): Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 28, pp. 259-275.

NICOLINI, É.; CARAGLIO, Y. (1994): L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. *Canadian Journal of Botany*, Vol. 72, No. 12, pp. 1723-1734.

NICOLINI, É. (1998): Architecture et gradients morphogénétiques chez de jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L. Fagaceae) en milieu forestier. *Canadian Journal of Botany*, Vol. 76, No.7, pp. 1232-1244.

NICOLINI, É. (2000): Nouvelles observations sur la morphologie des unités de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Symétrie des pousses, reflet de la vigueur des arbres. *Canadian Journal of Botany*, Vol. 78, No. 1, pp. 77-87.

- NINEMETS, Ü. (2010): Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. *Forest Ecology and Management*, Vol. 260, pp. 1623-1639. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.054.
- NINGRE, F. (1987): Forme et taille de formation au stade juvénile de trois feuillus de qualité, en relation avec leurs principaux défauts de forme. Cas du hêtre (*Fagus sylvatica* L.), du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) et du merisier (*Prunus avium* L.). Mémoire à l'Université de Nancy I et à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Centre de Recherches Forestières, Station de Sylviculture et de Production, 74p.
- NINGRE, F. (1997): Une définition raisonnée de la fourche du jeune hêtre. *Revue Forestière Française*, Vol. 49, No. 1, pp. 32-40.
- NINGRE, F.; COLIN, F. (2007): Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, Vol. 64, pp. 79-86. DOI: 10.1051/forest:2006091.
- NINGRE, F.; OTTORINI, J.-M.; LE GOFF, N. (2016): Modeling size-density trajectories for even-aged beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in France. *Annals of Forest Science*, Vol. 73, No. 765-776. DOI: 10.1007/s13595-016-0567-0
- NUTTO, L. (1999): Neue Perspektiven für die Begründung und Pflege von jungen Eichenbeständen: Ergebnisse einer Untersuchung zur Kronenentwicklung, Astreinigung und Dickenwachstum junger Stiel- und Traubeneichen in Europa (*Quercus robur* L. und *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung*, Band 5, Freiburg, 190 p.
- NYLAND, R. D. (1996): *Silviculture – concepts and applications*. Boston : McGraw-Hill, 633p.
- OFFICE NATIONAL DES FORÊTS (ONF) (2005): *Le Hêtre en Lorraine. Guide des sylvicultures*. OFFICE NATIONAL DES FORÊTS (Hrsg.), 88 pp.
- OTT, B. (2003): *Analyse der erfolgbestimmenden Faktoren buchendominierter Freiflächenkulturen nach Sturmwurf im hessischen Vogelsberg*. Dissertation an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Universität Göttingen, 180p.
- OTT, B.; GOLDMANN, I.; BARTSCH, N. (2003): Qualität von Buchenkulturen auf Windwurfflächen. *AFZ-DerWald*, No. 5, pp. 264-267.
- OTTO, H.-J. (1985): Pflanzenzahlen bei der künstlichen Bestandesbegründung. *Der Forst- und Holzwirt*, Vol. 40, No. 3, pp. 51-64.
- OTTO, D.; WAGNER, S.; BRANG, P. (2009): Konkurrenz zwischen Stieleiche und Buche auf Lothar-Sturmflächen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 160, No. 5, pp. 114-123.
- PALETTO, A.; TOSI, V. (2009): Forest canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques. *European Journal of Forest Research*, Vol. 128, pp. 265-272, DOI 10.1007/s10342-009-0262-x.
- PALMER, S. (1985): Der Buchen-Vorbau – seine Bedeutung, Planung und Technik. *Allgemeine Forstzeitschrift*, Vol. 45, pp. 1217-1220.

- PAQUETTE, A.; BOUCHARD A.; COGLIASTRO, A. (2007): Morphological plasticity in seedlings of three deciduous species under shelterwood under-planting management does not correspond to shade tolerance ranks. *Forest Ecology and Management*, Vol. 241, pp. 278-287. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.01.004
- PEDERSEN, R. Ø.; BOLLANDSÅS, GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. (2012): Deriving individual tree competition indices from airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management*, Vol. 280, pp. 150-165.
- PEIK, K. (1976): Auswirkungen von Spätfrostschäden auf das Höhenwachstum junger Buchen verschiedener Herkunft. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 147, No. 6/7, pp. 142-147.
- PETERSEN, R.; WAGNER, S. (1999): Erste Ergebnisse eines Voranbauversuches unter Kiefer im östlichen Niedersachsen. *Forst und Holz*, Vol. 54, No. 20, pp. 647-653.
- PETERSEN, R.; SCHÜLLER, S.; AMMER, C. (2009): Einfluss unterschiedlich starker Birkenkonkurrenz auf das Jugendwachstum von Traubeneichen – Ergebnisse einer 8-jährigen Beobachtungsreihe. *Forstarchiv*, Vol. 80, pp. 208-214. DOI 10.237603004112-80-208
- PETRIȚAN, A. M.; LÜPKE, B. V.; PETRIȚAN, I. C. (2007): Effects of shade on growth and mortality of maple (*Acer pseudoplatanus*), ash (*Fraxinus excelsior*) and beech (*Fagus sylvatica*) saplings. *Forestry* Vol. 80, No. 4. DOI 10.1093/forestry/cpm030
- PETRIȚAN, A. M.; LÜPKE, B. V. (2009): Struktur und Entwicklung von überschilderten Buchen-Eschen-Bergahorn-Dickungen aus Naturverjüngung. *Forstarchiv* Vol. 80, No. 4, pp. 119-128. DOI 10.237603004112-80-119
- PETRIȚAN, A. M.; LÜPKE, B. V.; PETRIȚAN, I. C. (2009): Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. *European Journal of Forest Research* Vol. 128, pp. 61-74. DOI 10.1007/s10342-008-0239-1
- PETRIȚAN, I. C.; LÜPKE, B. V.; PETRIȚAN, A. M. (2010): Einfluss unterschiedlicher Hiebsformen auf das Wachstum junger Buchen und Douglasien aus Pflanzung. *Forstarchiv* Vol. 81, pp. 40-52. DOI 10.2376/0300-4112-81-40
- PETRIȚAN, I. C.; LÜPKE, B. V.; PETRIȚAN, A. M. (2011): Effects of root trenching of overstorey Norway spruce (*Picea abies*) on growth and biomass of underplanted beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings. *European Journal of Forest Research* Vol. 130, pp. 813-828. DOI 10.1007/s10342-010-04731
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. (2000): *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. Statistics and Computing*, Springer : New York, 528 pp.
- PLANCHAIS, I.; SINOQUET, H. (1998): Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of *Fagus sylvatica* (L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 89, pp. 241-253.
- PRÉVOSTO, B.; CURT, T. (2004): Dimensional relationships of naturally established European beech trees beneath Scots pine and Silver birch canopy. *Forest Ecology and Management*, Vol. 194, pp. 335-348. DOI 10.1016./j.foreco.2004.02.020

- PRETZSCH, H. (1992): Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 163, No. 11/12, pp. 203-213.
- PRETZSCH, H. (1995): Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 166, No. 9-10, pp. 190-200.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Blackwell : Berlin, 414 S.
- PREUHSLE, T.; STÖGBAUER, K. (1990): Strukturmerkmale des Furniereichenbestandes „Eichhall“ im Bayerischen Forstamt Rohrbrunn. *Forst und Holz*, Vol. 45, No. 11, pp. 283-289.
- PUKKALA, T.; KOLSTRÖM, T. (1987): Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica*, Vol. 21, No. 1, pp. 55-67.
- RASCH, D.; VERDOOREN, L. R.; GOWERS, J. I. (2007): Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen. 2. überarb. u. erw. Aufl. – München : Oldenbourg-Verlag, 262 S.
- RAU, H.-M.; RUMPF, H.; SCHÖNFELDER, E. (2015): Neue Ergebnisse aus den Buchen-Herkunftsversuchen von Krahl-Urban. *Forstarchiv*, Vol. 86, pp. 27-41. DOI 10.4432/0300-4112-86-27
- RICHTER, C. (2010): Holzmerkmale – Beschreibung der Merkmale, Ursachen, Vermeidung, Auswirkungen auf die Verwendung des Holzes, Technologische Anpassung. 3. Aufl. – Leinefelden-Echterdingen : DRW-Verlag Weinbrenner, 223 S.
- RICHTER, H. (1995): Natur- und Landschaftskomponenten in Sachsen. In: MANNSFELD, K.; BERNHARDT, A. (Hrsg.): Naturräume in Sachsen. *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Band 238, pp. 11-38.
- RICHTER, J. (1990): Die Qualität von Buchenpflanzbeständen. In: LANDESANSTALT FÜR FORSTWIRTSCHAFT NORDRHEIN-WESTFALEN (LAFO) (Hrsg.): Laubholzkulturen. *Schriftenreihe der Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen*, Band 1, pp. 35-52.
- RICHTER, J.; LEDER, B. (1990): Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm. In: *Laubholzkulturen. Schriftenreihe der Landesanstalt für Forstwirtschaft Nordrhein-Westfalen*, Band 1, S. 5-34.
- ROBAKOWSKI, P.; ANTCZAK, P. (2008): Ability of Silver fir and European beech saplings to acclimate photochemical processes to the light environment under different canopies of trees. *Polish Journal of Ecology* Vol. 56, No. 1, pp. 3-16
- ROCK, J. (2004): Zur Entwicklung der Astdurchmesser junger Eichen in Trupppflanzungsbeständen. *Forstarchiv*, Vol. 75, pp. 143-149.
- RÖHRIG, E. (1979): Ein Beitrag zur geschichtlichen Entwicklung der „naturgemäßen Waldwirtschaft“. *Forstarchiv*, Vol. 50, pp. 121-124.
- RÖHRIG, E.; BARTSCH, N.; LÜPKE, B. v. (2006): Waldbau auf ökologischer Grundlage. 7. Aufl. – Stuttgart : Eugen Ulmer, 479 S.

- ROLOFF, A. (1986): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. In: *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben* Band 18, Göttingen : Selbstverlag, 177 S.
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen – Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Stuttgart : Ulmer, 164 S.
- ROLOFF, A.; RÖMER, H.-P. (1989): Beziehungen zwischen Krone und Wurzel bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 160, No. 9/10, pp. 200-205.
- ROSE, L.; LEUSCHNER, C.; KÖCKEMANN, B.; BUSCHMANN, H. (2009): Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? *European Journal of Forest Research*, Vol. 128, pp. 335-343. DOI 10.1007/s10342-009-0268-4
- ROZENBERGAR, D.; DIACI, J. (2014): Architecture of *Fagus sylvatica* regeneration improves over time in mixed old-growth and managed forests. *Forest Ecology and Management*, Vol. 318, pp. 334-340. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.01.037
- RUBAN, A. V. (2015): Evolution under the sun: optimizing light harvesting in photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 66, No. 1; pp. 7-23. DOI: 10.1093/jxb/eru400.
- RUDOLF, H. (1996): Wege zum Dauerwald – Waldumbau in Fichten-Reinbeständen. *Der Dauerwald*, No. 15, pp. 17-30.
- SACHSSE, H. (1965): Untersuchungen über Eigenschaften und Funktionsweise des Zugholzes der Laubbäume. *Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 35 – Sauerländer's Verlag : Frankfurt/M., 110 S.
- SAHA, S.; KUEHNE, C.; KOHNLE, U.; BRANG, P.; EHRING, A.; GEISEL, J.; LEDER, B.; MUTH, M.; PETERSEN, R.; PETER, J.; RUHM, W.; BAUHUS, J. (2012): Growth and quality of young oaks (*Quercus robur* and *Quercus petraea*) grown in cluster plantings in central Europe: A weighted meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, Vol. 283, pp. 106-118.
- SAGHEB-TALEBI (1996): Quantitative und qualitative Merkmale von Buchenjungwüchsen (*Fagus sylvatica* L.) unter dem Einfluss des Lichtes und anderer Standortsfaktoren. *Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen* 78, zugl. Diss. ETH Zürich Nr. 11257, 219 S.
- SCARTAZZA, A.; DI BACCIO, D.; BERTOLOTTI, P.; GAVRICHKOVA, O.; MATTEUCCI, G. (2016): Investigating the European beech (*Fagus sylvatica* L.) leaf characteristics along the vertical canopy profile: leaf structure photosynthetic capacity, light energy dissipation and photoprotection mechanisms. *Tree Physiology*, Vol. 36, pp. 1060-1076. DOI: 10.1093/treephys/tpw038
- SCHALL, P.; LÖDIGE, C.; BECK, M.; AMMER, C. (2012): Biomass allocation to roots and shoots is more sensitive to shade and drought in European beech than in Norway spruce seedlings. *Forest Ecology and Management*, Vol. 266, pp. 246-253.

SCHIRMER, W.; DIEHL, T.; AMMER, C. (1999): Zur Entwicklung junger Eichen unter Kieferschirm. *Forstarchiv*, Vol. 70, pp. 57-65.

SCHLÜTER (1960): Rationelle Gestaltung der natürlichen und künstlichen Bestandesgründung – besonders im Hinblick auf die Buche. *Der Forst- und Holzwirt*, No. 2, pp. 31-37.

SCHMALTZ, J.; FRÖHLICH, A.; GEBHARDT, M. (1997): Die Qualitätsentwicklung in jungen Traubeneichenbeständen im Hessischen Spessart – Ergebnisse einer Aufnahme in einem Pflanzverbandsversuch. *Forstarchiv*, Vol. 68, pp. 3-10.

SCHMIDT, M. (2002): Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen, 239 S. + Anhang. <http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0006-B0EC-5> Zugriff am 31.07.2017

SCHMIDT, P.; HEMPEL, W.; DENNER, M.; DÖRING, N.; GNÜCHTEL, A.; WALTER, B.; WENDEL, D. (2002): Potentielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1 : 200 000. SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.): *Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege*, 230pp.

SCHMITT, H. P.; MERTENS, B.; LÜPKE, B. V. (1995): Buchenvoranbau im Stadtwald Meschede. *Allgemeine Forstzeitschrift* Vol. 50, No. 20, pp. 1071-1075.

SCHREINER, M.; SPERLICH, U.; BAUER, W. (2003): Schließen dichte Brombeerhecken einen Buchenvoranbau aus? *AFZ-DerWald*, No. 5, pp. 260-263.

SCHRÖDER, J. (2004): Zur Modellierung von Wachstum und Konkurrenz in Kiefern/Buchen-Waldumbaubeständen Nordwestsachsens. *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt / Contributions to Forest Sciences*, Heft 19 – Stuttgart : Ulmer, 271 p.

SCHRÖTER, M.; HÄRDLE, W.; OHEIMB, G. V. (2012): Crown plasticity and neighborhood interactions of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in an old-growth forest. *European Journal of Forest Research*, Vol. 131, pp. 787-798. DOI 10.1007/s10342-011-0552-y

SCHULZ, H. (1961a): Über die Zusammenhänge zwischen Baumgestalt und Güte des Schnittholzes bei der Buche. *Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 29, Frankfurt/Main : Sauerländer Verlag, 94 S.

SCHULZ, H. (1961b): Die Beurteilung der Qualitätsentwicklung junger Bäume. *Forstarchiv*, Vol. 32, No. 5, pp. 89-99.

SCHÜMANN, H. (1968): Die Kunstverjüngung der Rotbuche. Vortrag auf der Tagung der Fachkommission Forstwirtschaft der DAG im Bereich der VVB Forstwirtschaft Waren/Müritz in Eberswalde am 6. Juni 1968. In: Ingenieurbüro der VVB Forstwirtschaft Waren/Müritz (Hrsg.): *Beiträge zur Rationalisierung in der Forstwirtschaft: Probleme des Buchenunterbaues und der Buchenkunstverjüngung Heft 3*, 79 p.

SCHÜTZ, J.-P. (1996): Bedeutung und Möglichkeiten der biologischen Rationalisierung im Forstbetrieb. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 5, pp. 315-349.

- SCHÜTZ, J.-P. (1998): Behandlungsgrundsätze der Buche aus heutiger Sicht. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 149, No. 12, pp. 1005-1030.
- SCHWANECHE, W.; KOPP, D. (1996): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen. SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (Hrsg.): *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten*, Heft 8, 191pp.
- SEELING, U. (1998): Kerntypen im Holz – Konsequenzen für die Verwertung am Beispiel der Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, Vol. 149, No. 12, pp. 991-1004.
- SEIDEL, D.; ALBERT, K.; AMMER, C.; FEHRMANN, L.; KLEINN, C. (2013): Using terrestrial laser scanning to support biomass estimation in densely stocked young tree plantations. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 24, pp. 8699-8709, DOI 10.1080/01431161.2013.848308
- SIBLY, R. M.; VINCENT, J. F. V. (1997): Optimality Approaches to Resource Allocation in Woody Tissues. In: BAZZAZ, F. A.; GRACE, J. (eds.): *Plant resource allocation*. San Diego : Academic Press, pp. 143-159.
- SKOVSGAARD, J. P.; NORDFJELL, T.; SØRENSEN, I. H. (2006): Precommercial thinning of beech (*Fagus sylvatica* L.): Early effects of stump height on growth and natural pruning of potential crop trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 21, pp. 380-387. DOI 10.1080/02827580600979817
- SPELLMANN, H. (1996): Waldbau im Wandel. *Forst und Holz*, Vol. 51, No. 1, pp. 3-9.
- SPELLMANN, H. (2005): Produziert der Waldbau am Markt vorbei? *AFZ-DerWald*, No. 9, pp. 454-459.
- SPELLMANN, H. (2009): Sicherung einer nachhaltigen Rohholzversorgung in Deutschland. In: Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage im Hinblick auf Klimawandel und Rohstoffverknappung. Tagungsbericht zur 28. Internationalen Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung mit Exkursion am 4.-6. November 2009 in Treis-Karden (Mosel). *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 69/11, pp. 8-24.
- SPELLMANN, H.; DÖBBELER, H.; RUDOLPH, J. (2015): Entwicklung des Nadelrohholz-Angebotes in Norddeutschland. *AFZ-DerWald*, No. 17, pp. 16-19.
- SPELLMANN, H.; WAGNER, S. (1993): Entscheidungshilfen für die Verjüngungsplanung in Fichtenbeständen zum Voranbau der Buche im Harz. *Forst und Holz*, Vol. 48, No. 17, pp. 483-490.
- SPIECKER, H. (1991): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.). *Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg*, Band 72, Stuttgart, 151 S.
- SPIECKER, H. (2007): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung wertvoller Trauben- und Stieleichen. In: DONG, P. H. (Hrsg.): Eiche im Pfälzerwald. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 63, Trippstadt, pp. 78-95.

- SPRUGEL, D. G.; HINCKLEY, T. M.; SCHAAP, W. (1991): The theory and practice of branch autonomy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 22, pp. 309-334.
- STANCIOIU, P. T.; O'HARA, K. L. (2006): Morphological plasticity of regeneration subject to different levels of canopy cover in mixed-species, multiaged forests of the Romanian Carpathians. *Trees*, Vol. 20, pp. 196-209. DOI: 10.1007/s00468-005-0026-2
- STANTURF, J.A. (2005): What is forest restoration? In: STANTURF, J.A.; MADSEN, P. (Eds.): *Restoration of boreal and temperate forests*. Boca Raton : CRC Press, pp. 3-11.
- STEPIEN, E.; GADOLA, C.; LENZ, O.; SCHÄR, E.; SCHMID-HAAS, P. (1998): Die Taxierung der Holzqualität am stehenden Baum. *Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft*, Birmensdorf Nr. 344, 68 S.
- STORCH/SCHULER, J. K. (2011): Astentwicklung und Astreinigung in Abhängigkeit vom Dickenwachstum bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.). Dissertation Universität Freiburg, Fakultät Forst- und Umweltwissenschaften, 295 p. www.freidok.uni-freiburg.de/data/8396. Zugriff am 30.06.2017
- STRASBURGER, E.; NOLL, F.; SCHENK, H.; SCHIMPER, A. F. W. (Begründer); BRESINSKY, A.; KÖRNER, C.; KADEREIT, J. W.; NEUHAUS, G.; SONNEWALD, U. (2008): Lehrbuch der Botanik. 36. Auflage – Heidelberg : Spektrum-Verlag, 1175 S.
- STRUCK, G. (1999): Effekte von Pflanzverband, Kulturdüngung und Schlagräumung am Beispiel junger Traubeneichenbestände. *Hainholz Forstwissenschaften* Band 8, Göttingen : Hainholz, 196 S.
- STRUCK, G.; DOHRENBUSCH, A. (2000): Development of a new branchiness index ASIX – A simple tool to describe branchiness in young deciduous forest stands. *Annals of Forest Science*, Vol. 57, pp. 811-818.
- SZYMAŃSKI, S. (1986): Die Begründung von Eichenbeständen in „Nest-Kulturen“ – Eine wirksame und sparsame Methode des Waldbaus auf wüchsigen Standorten. *Der Forst- und Holzwirt*, Vol. 41, No. 1, pp. 3-11.
- TEISSIER DU CROS, E. (1981): Amélioration génétique du hêtre – Principaux résultats en matière d'amélioration du hêtre, pp. 456-466. In: TEISSIER DU CROS, E. (Éd.): *Le Hêtre*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique, Département des Recherches Forestières, 613 pp.
- TEISSIER DU CROS, E.; THIÉBAUT, B. (1988): Variability in beech: budding, height growth and tree form. *Annales des Sciences Forestières*, Vol. 45, No. 4, pp. 383-398.
- THIÉBAUT, B. (1981): Physiologie de la croissance – Formation des rameaux, pp. 169-174. In: TEISSIER DU CROS, E. (Éd.): *Le Hêtre*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique, Département des Recherches Forestières, 613 pp.
- THIÉBAUT, B.; PUECH, S. (1983): Développement du hêtre commun: morphologie et architecture de l'arbre – 1^{re} partie: Le développement des plants. *Revue Forestière Française*, Vol. 35, No. 6, pp. 443-451.

THIÉBAUT, B.; PUECH, S. (1984): Développement du hêtre commun: morphologie et architecture de l'arbre – 2^e partie: Le développement des arbres. *Revue Forestière Française*, Vol. 36, No. 1, pp. 45-58.

THOMASIUS, H. (1975): Grundsätze für die Ermittlung von Pflanzenzahlen und Pflanzverbänden. *Sozialistische Forstwirtschaft*, Vol. 25, No. 11/12, pp. 346-348/370-373.

THOMASIUS, H. (1990): Vorkommen, Bedeutung und Bewirtschaftung der Fichte in der DDR. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 109, pp. 138-151.

THOMASIUS, H. (1996): Geschichte, Anliegen und Wege des Waldumbaus in Sachsen. In: SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (LAF) (Hrsg.): *Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten*, Heft 6, pp. 11-52.

THOMASIUS, H.; HELBIG, K. (1976): Die rationelle Pflege von Jungwüchsen und Jungbeständen der Baumarten Rotbuche und Eiche. *Sozialistische Forstwirtschaft*, Vol. 26, pp. 58-61.

THORPE, H. C.; ASTRUP, R.; TROWBRIDGE, A.; COATES, K. D. (2010): Competition and tree crowns: A neighborhood analysis of three boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, pp. 1586-1596. DOI 10.1016/j.foreco.2010.01.035

TIEBEL, K.; HUTH, F.; WAGNER, S. (2016): Qualität von Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) unterschiedlicher Flächengröße unter Fichtenschirm (*Picea abies* (L.) KARST.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Vol. 187, No. 5/6, pp. 103-120.

TOGNETTI, R.; MICHELOZZI, M.; BORGHETTI, M. (1994): Response to light of shade-grown beech seedlings subjected to different watering regimes. *Tree Physiology*, Vol. 14, pp. 751-758.

TROLL, W. (1937): Vergleichende Morphologie der höheren Pflanzen. Erster Band: Vegetationsorgane. Erster Teil. Berlin : Gebrüder Borntraeger, 955p.

TUROK, J. (1996): Genetische Untersuchungen bei der Buche: genetische Anpassungsprozesse und die Erhaltung von Genressourcen in Buchenwäldern (*Fagus sylvatica* L.). *Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten*, Bd. 8, Münster : Landwirtschaftsverlag, 136p.

UTSCHIG, H.; PRETZSCH, H. (2001): Der Eichen-Durchforstungsversuch Waldleinigen 88. Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsstärken nach 65 Jahren Beobachtung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Vol. 120, pp. 90-113.

VALLADARES, F.; CHICO, J. M.; ARANDA, I.; BALAGUER, L.; DIZENGREMEL, P.; MANRIQUE, E.; DREYER, E. (2002): The greater seedling high-light tolerance of *Quercus robur* over *Fagus sylvatica* is linked to a greater physiological plasticity. *Trees*, Vol. 16, pp. 395-403. DOI: 10.1007/s00468-002-0184-4.

VAN HEES, A. F. M. (1997): Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings in relation to shading and drought. *Annales des Sciences Forestières*, Vol. 54, pp. 9-18.

VOR, T.; LÜPKE, B. V. (2004): Das Wachstum von Roteiche, Traubeneiche und Rotbuche unter verschiedenen Lichtbedingungen in den ersten beiden Jahren nach der Pflanzung. *Forstarchiv*, Vol. 75, pp. 13-19.

- WAGNER, S. (1994): Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos: Methode und Anwendung. Dissertation an der Universität Göttingen, 166p.
- WAGNER, S. (1999): Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 129 – Frankfurt/M. : J. D. Sauerländer's Verlag, 262 S.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *Forst und Holz*, Vol. 59, No. 8, pp. 394-398.
- WAGNER, S. (2005): Einzelbaumeffekte – eine Methode zur ökologischen Forschung in Mischbeständen. In: BAUHUS, J.; CSAPEK, G. (Hrsg.) Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA, Berichte Freiburger Forstliche Forschung No. 60, pp. 127-139.
- WAGNER, S. (2007a): Rationaler Waldumbau - Fragen und Anregungen. *Forst und Holz*, Vol. 62, No. 8, pp.12 – 17.
- WAGNER, S. (2007b): Waldbautechnische Methoden der Bucheneinbringung in Fichtenbeständen. In: NATIONALPARK HARZ (Hrsg.): *Walddynamik und Waldumbau in den Entwicklungszonen von Nationalparks. Schriftenreihe aus dem Nationalpark Harz*, pp. 54-61.
- WAGNER, S. (2008a): Klimawandel – Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *AFZ-DerWald*, No. 20, pp. 1104-1107.
- WAGNER, S. (2008b): Zur räumlichen Optimierung der Altbestandsstellung im Rahmen schlagweiser Verfahren der Kiefernaturverjüngung. *Forst und Holz*, Vol. 63, No. 4, pp. 29-33.
- WAGNER, S. (2016): mündliche Mitteilung.
- WAGNER, S.; MÜLLER-USING, B. (1997): Ergebnisse der Buchen-Voranbauversuche im Harz unter besonderer Berücksichtigung der lichtökologischen Verhältnisse. In: LANDESANSTALT FÜR ÖKOLOGIE, BODENORDNUNG UND FORSTEN/LANDESAMT FÜR AGRARORDNUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.), *Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen*, Band 13, S. 17-30.
- WAGNER, S.; RÖKER, B. (2000): Birkenanflug in Stieleichenkulturen. *Forst und Holz*, Vol. 55, No. 1, pp. 18-22.
- WAGNER, S.; LEONHARDT, B. (2004): Wuchsverhalten von Buchenvoranbauten bei variierender Schirm- und Seitendruckkonkurrenz. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 41-53710/VE 1 der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen, Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF), 56p.
- WAGNER, S.; LUNDQVIST, L. (2005): Regeneration techniques and the seedling environment from a European perspective. In: STANTURF, J.A.; MADSEN, P. (Eds.): *Restoration of boreal and temperate forests*. Boca Raton : CRC Press, pp. 153-171.

- WAGNER, S.; COLLET, C.; MADSEN, P.; NAKASHIZUKA, T.; NYLAND, R. D.; SAGHEB-TALEBI, K. (2010): Beech regeneration research: From ecological to silvicultural aspects. *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, pp. 2172-2182 DOI: 10.1016/j.foreco.2010.02.029
- WAGNER, S.; HUTH, F.; MOHREN, F.; HERRMANN, I. (2013): Silvicultural systems and multiple service forestry. In: KRAUS, D.; KRUMM, F. (eds.): *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. European Forest Institute, pp. 64-73.
http://www.efi.int/files/attachments/publications/integrate_2013.pdf letzter Zugriff am 05.08.2017
- WEIDIG, J.; ARENHÖVEL, W.; EISENHAEUER, D.-R.; WAGNER, S. (2015): Qualität von Buchen-Voranbau nach Schirmverlust. *AFZ-DerWald*, No. 5, pp. 37-40.
- WEIDIG, J. (2016): Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) nach unplanmäßigem, sturmbedingtem Verlust des Fichtenschirms. Dissertation an der TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, 218 S
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-206721>
- WEIHS, U. (1996): Struktur- und Wachstumsanalyse einer überschirmten Douglasien-Fichten-Naturverjüngung im Forstamt Reinhausen. *Forst und Holz*, Vol. 51, No. 7, pp. 221-227.
- WEIHS, U.; KLAENE, K. (2000): Wuchsdynamik und Qualität von Buchenvoranbauten unter Fichtenaltholz auf Basaltstandorten im Hessischen Forstamt Kassel. *Forst und Holz*, Vol. 55, No. 6, S. 177-181.
- WELANDER, N. T. ; OTTOSSON, B. (1997): Influence of photosynthetic photon flux density on growth and transpiration in seedlings of *Fagus sylvatica*. *Tree Physiology*, Vol. 17, pp. 133-140.
- WELDEN, C. W.; SLAUSON, W. L. (1986): The intensity of competition versus its importance: an overlooked distinction and some implications. *The Quarterly Review of Biology*, Vol. 61, No. 1, pp. 23-44.
- WELLER, A.; SPELLMANN, H. (2014): Wachstum der Douglasie abhängig von Ausgangspflanzenzahl und Pflanzverband. *Forstarchiv*, Vol. 85, pp. 3-15. DOI 10.4432/0300-4112-85-3
- WEINER, J.; THOMAS, S. C. (1986): Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos*, Vol. 47, pp. 211-222.
- WEINREICH, A. (2000): Qualitätsentwicklung junger Eichen in Bestandeslücken. Inaugural-Dissertation an der Universität Freiburg, Fakultät Forstwissenschaften, 235 S. <https://freidok.uni-freiburg.de/data/304>
- WENK, G.; RÖMISCH, K.; GEROLD, D. (1985): DDR-Fichtenertragstafel 1984. Tharandt : TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft Tharandt, 64p.
- WENK, G.; ANTANAĪTIS, V.; ŠMELKO, Š. (1990): Waldertragslehre. Berlin : Dt. Landwirtschaftsverlag, 448 S.

- WERNSDÖRFER, H.; LE MOGUÉDEC, G.; CONSTANT, T.; MOTHE, F.; SEELING, U.; NEPVEU, G. (2005a): Approach to the estimation of red heart occurrence in *Fagus sylvatica* based on geometric relationships between branch scar development and knot dimensions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 20, pp. 448-455.
- WERNSDÖRFER, H.; CONSTANT, T.; MOTHE, F.; BADIA, M. A.; NEPVEU, G.; SEELING, U. (2005b): Detailed analysis of the geometric relationship between external traits and the shape of red heartwood in beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*, Vol. 19, pp. 482-491. DOI: 10.1007/s00468-005-0410-y
- WILHELM, G. J.; RIEGER, H. (2013): Naturnahe Waldwirtschaft mit der QD-Strategie. Ulmer : Stuttgart, 207 S.
- WOLF, H. (2009): Austrieb und Trockentoleranz von Rotbuchen-Herkünften (*Fagus sylvatica* L.) unter sich ändernden Klimabedingungen. In: Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage im Hinblick auf Klimawandel und Rohstoffverknappung. Tagungsbericht zur 28. Internationalen Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung mit Exkursion am 4.-6. November 2009 in Treis-Karden (Mosel). *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 69/11, pp. 64-78.
- WOLFF, B.; ERHARD, M.; HOLZHAUSEN, M.; KUHLOW, T. (2003): Das Klima in den Forstlichen Wuchsgebieten Deutschlands. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, Nr. 211, Hamburg : Wiedebusch, 29 S. + 99 S. Anhang.
- WU, H.; SHARPE, P. J. H.; WALKER, J.; PENRIDGE, L. K.: (1985): Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants. *Ecological Modelling*, Vol. 29, pp. 215-243.
- ZAR, J. H. (2010): Biostatistical Analysis. 5th ed. - Prentice Hall : Pearson Education International, 944 p.
- ZÖHRER, F. (1980): Forstinventur : ein Leitfaden für Studium und Praxis. *Pareys Studentexte*, Nr. 26, Hamburg : Parey-Verlag, 207 S.
- ZUUR, A.; IENO, E. N.; WALKER, N. J.; SAVELIEV, A. A.; SMITH, G. M. (2009): Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York : Springer, 547p.
- ZUUR, A.; IENO, E. N.; ELPHICK, C. S. (2010): A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 1, pp. 3-14. DOI 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x

11 Software und Softwarepakete zu R

AMBLER, G. (orig.) & BENNER, A. (modif.) (2015). mfp: Multivariable Fractional Polynomials. *R package version 1.5.2*. <https://CRAN.R-project.org/package=mfp>.

AUGUIE, B. (2016). gridExtra: Miscellaneous Functions for „Grid“ Graphics. *R package version 2.2.1*. <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>.

BATES, D. M.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. C. (2015): Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, Vol. 67, Nr. 1, pp. 1-48; doi:10.18637/jss.v067.i01.

BJØRNSTAD, O. N. (2016): ncf: Spatial Nonparametric Covariance Functions. *R package version 1.1-7*. <https://CRAN.R-project.org/package=ncf>.

CHRISTENSEN, R. H. B. (2015): ordinal-Regression Models for Ordinal Data. *R package version 2015.6-28*, <http://www.cran.r-project.org/package=ordinal/>.

FOX, J. (2014): [R-sig-ME] Variance Inflation Factors. E-Mail vom 21.02.2014. *R-sig-mixed-models mailing list*, <https://stat.ethz.ch/pipermail/r-sig-mixed-models/2014q1/021723.html>.

FOX, J.; WEISBERG, S. (2011): An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>

FRANK, A. F. (2016): vif.mer(). <https://raw.githubusercontent.com/aufrank/R-hacks/master/mer-utils.R>. Zugriff am 29.08.2016.

HARRELL JR, F. E.; DUPONT, C.; et al. (2016): Hmisc: Harrell Miscellaneous. *R package version 3.17-4*. <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>

MAZEROLLE, M. J. (2016): AICcmoavg: Model selection and multimodel inference based on (Q)AIC_c. *R package version 2.0-4*. <http://CRAN.R-project.org/package=AICcmoavg>.

NAGEL, J.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M. (2003): Programm BWINPro, Version 6.2. Göttingen : Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; R CORE TEAM (2016): Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package version 3.1-125*, <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>.

R CORE TEAM (2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

RÖHLE, H.; GEROLD, D.; SCHRÖDER, J.; MÜNDE, K. (2007): BWINPro/BWINPro-S, Version 6.3, sächsische Fassung des Programms. Tharandt : TU Dresden, Lehrstuhl für Waldwachstum und Holzmesskunde.

SING, T.; SANDER, O.; BEERENWINKEL, N.; LENGAUER, T. (2005): ROCR: visualizing classifier performance in R." *_Bioinformatics_*, *21*(20), pp. 7881. <http://rocr.bioinf.mpi-sb.mpg.de>

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. (2002): Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. Springer : New York, 495p.

WICKHAM, H. (2007). Reshaping Data with the reshape Package. *Journal of Statistical Software*, Vol. 21, No. 12, pp. 1-20. <http://www.jstatsoft.org/v21/i12/>

WICKHAM, H. (2009): ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag : New York, 212p.

WICKHAM, H. (2016): tidyr: Easily Tidy Data with ,spread(), and ,gather(), Functions. *R package version 0.4.1*. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>

WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.(2015). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. *R package version 0.4.3*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

ZEILEIS, A.; MEYER, D.; HORNIK, K. (2007): Residual-based Shadings for Visualizing (Conditional) Independence. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 16, No. 3, pp. 507-525.

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Klimatische Kenngrößen nach Wuchsbezirken. Entnommen aus WOLFF et al. (2003).....	11
Tabelle 2-2: Versuchsflächenübersicht mit Angaben zur Lage, zum Standort, zum Fichtenaltbestand und zum Buchenvoranbau.	17
Tabelle 2-3: Ertragskundliche Kennwerte und Bonitierung der Versuchsflächen	19
Tabelle 3-1: Schema der Versuchsanlage (Stufe I) mit Zuordnung der Versuchsdesigns	22
Tabelle 3-2: Aufnahmegrößen für den Altbestand	31
Tabelle 3-3: Aufnahmegrößen an den Probe-Buchen im Voranbau	32
Tabelle 3-4: Charakterisierung der kleinräumigen Überschirmungsverhältnisse: Altbaumnähe	34
Tabelle 3-5: Klassifizierung und Beschreibung des Aufnahmemerkmals „Wuchsform“	40
Tabelle 3-6: begriffliche Abgrenzung der oberen soziologischen Stellung aufgenommener Buchen nach dem Versuchsdesign	42
Tabelle 3-7: Definition und Beschreibung der Kronen- und Stammformen.....	44
Tabelle 3-8: Definition und Beschreibung der Qualitätsklassen als Kombination aus Kronen- und Stammform	45
Tabelle 3-9: Einzelbuchen nach Qualitätstyp und Höhe, ausgewählt in Stufe II des Split-Plot- Designs.	46
Tabelle 3-10: Definition von Messgrößen für Merkmale am Schaft und für Zwiesel/Steiläste.....	50
Tabelle 3-11: Definition von Messgrößen für Astmerkmale und Wachstumsparameter	51
Tabelle 3-12: Bezeichnung und Beschreibung der Variablen zur Berechnung von Wachstums- und Qualitätsmerkmalen.....	53
Tabelle 3-13: Messgrößen am Zentralbaum und an den Konkurrenten mit Beschreibung.	58
Tabelle 3-14: Beschreibung der verwendeten Modelltypen (nach MCCULLAGH & NELDER 1990 S. 30).	70
Tabelle 3-15: Auflistung der stetigen abhängigen Variablen mit gesamtem Wertebereich.	76
Tabelle 3-16: Auflistung der unabhängigen Variablen mit gesamtem Wertebereich und Angabe ihrer Kombination in acht Modellvarianten	78

Tabelle 3-17: Übersicht der festen Effekte im gemischten Proportional-Odds-Modell (CLMM).	79
Tabelle 3-18: Übersicht über die Aspekte für die Modellüberprüfung getrennt nach Modelltypen.	83
Tabelle 3-19: Übertragung der vierstufigen Qualitätsvariable in eine vollständige Binärcodierung	85
Tabelle 3-20: Übersicht über die Typen von Multikollinearität mit Defintion und Beschreibung.	92
Tabelle 4-1: geschätzte Wahrscheinlichkeit für sehr gute/gute vs. zwieselige/unzureichend geformte Buchen aus dem kumulativen Schwellenwertmodell nach Altbaumnähe für zwei Standraumwerte.	98
Tabelle 4-2: Schätzergebnisse der kumulativen Schwellenwertmodellenach Bundesländern für die Wahrscheinlichkeit von Qualitätsklassen über dem Standraum für die Stufen der Altbaumnähe.	102
Tabelle 5-1: Übersicht über die Anzahl orthotroper und plagiotroper Buchen nach ihrer Kronenform.	178
Tabelle 5-2: Übersicht der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den ASIX des stärksten Grünastes getrennt für die Schaftabschnitte 1 bis 3.	186
Tabelle 5-3: Gegenüberstellung von Wuchsform und Schaftneigung der Probebuchen.	204
Tabelle 6-1: Pflanzverbandsweiten für Fichte und Buche im Vergleich.	241

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Darstellung des geschachtelten Versuchsanlage nach Versuchsdesigns mit Angabe der gemessenen Merkmale getrennt für den Buchen-Voranbau und den Fichten-Altbestand.	25
Abbildung 3-2: Probeflächenanlage nach Versuchsdesign I.....	28
Abbildung 3-3: Anlage eines Probekreisrasters nach Versuchsdesign II.....	30
Abbildung 3-4: Charakterisierung der Variable „Altbaumnähe“ als kleinräumige Überschirmungssituation für eine Einzelbuche anhand hemisphärischer Fotos.	34
Abbildung 3-5: Klassifizierung der Kronen- und Stammformen nach GOCKEL (1994) und FISCHER (2000). (LEONHARDT & WAGNER 2006)	43
Abbildung 3-6: Darstellung der Suchmodi zur Identifizierung der Konkurrenten innerhalb der Verjüngung (Vogelperspektive und Seitenansicht).	57
Abbildung 3-7: Darstellung der verwendeten Modelltypen in der Modellklasse des Verallgemeinerten Linearen Modells	62
Abbildung 3-8: Darstellung des kumulativen Schwellenwertmodells bei logistischer Link-Funktion (proportional-odds-model) nach MCCULLAGH & NELDER (1990 S. 152).	74
Abbildung 3-9: Darstellung der Datenhierarchie in Bezug auf die räumliche Dimension der Versuchsdesigns für den Zufallseffekt mit Angabe des Stichprobenumfangs getrennt für die Bundesländer NRW und SAX.....	80
Abbildung 3-10: Beispieldarstellung für heteroskedastische (links) und homoskedastische (rechts) Residuen.....	87
Abbildung 3-11: Beispieldarstellung für räumlich unkorrelierte Residuen.....	89
Abbildung 3-12: Darstellung paralleler Logits im kumulativen Schwellenwertmodell.	90
Abbildung 4-1: absolute Häufigkeit der Qualitätsklassen nach den Stufen von Alter, Altbaumnähe und Standraum.	94
Abbildung 4-2: Schätzergebnisse des kumulativen Schwellenwertmodells für die Wahrscheinlichkeit von Qualitätsklassen über dem Standraum getrennt für die Stufen der Altbaumnähe.....	96
Abbildung 4-3: Stichprobenumfang (aggregierte Daten) der Qualitätsklassen nach Stufen der festen Haupteffekte Alter, Schirm und Standraum getrennt für die Bundesländer NRW und SAX.	99

Abbildung 4-4: Vergleich der Modellvorhersage für die Buchen aus NRW mit den beobachteten Werten für die Buchen in SAX bezüglich der Qualitätsklassen über dem Standraum nach Stufen der Altbaumnähe.	100
Abbildung 4-5: Darstellung der interpolierten Wahrscheinlichkeits-Schätzungen der Qualitätsklassen aus den kumulativen Schwellenwertmodellen für die Bundesländer NRW und SAX über dem Standraum nach Schirmkategorien.	101
Abbildung 4-6: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Höhe über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer	105
Abbildung 4-7: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Wurzelhalsdurchmesser über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer	107
Abbildung 4-8: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den hd-Wert über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer	109
Abbildung 4-9: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 1 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.	111
Abbildung 4-10: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 2 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Höhenstufen mit Angabe der Parameterschätzer	112
Abbildung 4-11: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den maximalen Grünastdurchmesser im Schaftabschnitt 3 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Höhenstufen mit Angabe der Parameterschätzer	113
Abbildung 4-12: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den ASIX des stärksten Grünastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Astansatzhöhestufen mit Angabe der Parameterschätzer.	115
Abbildung 4-13: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den kleinsten Astansatzwinkel über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.	117
Abbildung 4-14: grafische Darstellung des Astwinkelindex' nach HAGEMANN (2005) nach Ansatz-Winkelklassen über dem Grünastdurchmesser	119
Abbildung 4-15: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Astwinkelindex nach HAGEMANN (2005) über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer.	120

Abbildung 4-16: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Steilastwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 122

Abbildung 4-17: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Prozentanteil des grünastfreien Schaftes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 124

Abbildung 4-18: Darstellung des 'Ästigkeitsindex' über der Anzahl toter Äste und nach der Anzahl grüner Äste getrennt für die Schaftabschnitte. 126

Abbildung 4-19: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 1 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 127

Abbildung 4-20: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 2 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 128

Abbildung 4-21: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Ästigkeitsindex im Schaftabschnitt 3 über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 129

Abbildung 4-22: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 132

Abbildung 4-23: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den relativen Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 135

Abbildung 4-24: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Tiefzwieselwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Wurzelhalsdurchmesserstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 137

Abbildung 4-25: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für den relativen Durchmesser des stärksten Totastes über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 139

Abbildung 4-26: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Steilastwahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Altersstufen mit Angabe der Parameterschätzer. 141

Abbildung 4-27: Darstellung der Modellergebnisse und beobachteten Werte für die Krümmungs-Wahrscheinlichkeit über dem Seitendruck nach Schirmdruck- und Wurzelhalsdurchmesserstufen mit Angabe der Parameterschätzer.....	143
Abbildung 4-28: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Grundflächestufen des Oberstandes.	145
Abbildung 4-29: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Standraumstufen in der Verjüngung.	146
Abbildung 4-30: Darstellung der Häufigkeit der maximalen Krümmungsstärke des Schaftes getrennt nach Wurzelhalsdurchmesserstufen der Probebuchen.	147
Abbildung 5-1: Verteilung der Stichprobenwerte nach Faktorstufenkombinationen der festen Haupteffekte Alter, Altbaumnähe und Standraum getrennt für die Versuchsdesigns.	153
Abbildung 5-2: Zuordnung und Häufigkeit der verwendeten Konkurrenzindices zu den Bauprinzipien mit Angabe der Suchmodi.	157
Abbildung 5-3: Darstellung der Genauigkeit der Altbestands-Indices HEGYI-Index und Grundfläche.	162
Abbildung 5-4: Darstellung der Multikollinearität für die unabhängigen Variablen nach den Modellvarianten 1 bis 8.	170
Abbildung 5-5: Kronenraum von Buchen im Dickungsschluss mit bereits eingesetzter Astreinigung aus der Froschperspektive.	221
Abbildung 6-1: Modellergebnisse und praktische Empfehlungen für hohe Qualität vorangebauter Buchen nach Einzelmerkmalen.	231
Abbildung 6-2: Höhe, Astreinigung und Ansatzhöhe des untersten Zwiesels über dem Standraum nach Grundflächenstufen des Altbestandes.	236
Abbildung 6-3: Intensität des Seitendrucks anhand zwei verschiedener Indices über dem Standraum nach Altersgruppen.	240
Abbildung 16-1: Größen der Probeflächen/des Probekreisrasters und Anzahl der aufgenommenen Buchen.	301

14 Formelverzeichnis

Formel 3-1: Beziehung zwischen Pflanzenzahl, Fläche und Standraum	36
Formel 3-2: Berechnungsformeln für Wachstums- und Qualitätsmerkmale	52
Formel 3-3: Gleichungen für die Höhenkurven in BwinPro6.2 und BwinPro-S6.3	54
Formel 3-4: Auswahlvorschrift für konkurrenzrelevante Bäume des Oberstandes nach PRETZSCH (1995).....	55
Formel 3-5: Berechnungsvorschrift für den Konkurrenzindex nach HEGYI (1974)	55
Formel 3-6: Auswahlvorschrift für konkurrenzrelevante Nachbarn in der Verjüngung nach PRETZSCH (1995).....	57
Formel 3-7: Berechnungsvorschrift für den Konkurrenzindex nach HEGYI (1974) in der Verjüngung	59
Formel 3-8: Berechnungsvorschrift für den Astindex.	60
Formel 3-9: Gleichung des Verallgemeinerten Linearen Modells (nach McCULLAGH & NELDER 1990 S. 27)	62
Formel 3-10: Gleichung des erweiterten Verallgemeinerten Linearen Modells als gemischtes Modell	64
Formel 3-11: Gleichung der log-Likelihood nach McCULLAGH & NELDER (1990 S. 469).....	66
Formel 3-12: Gleichung der zu testenden statistischen Hypothesen	68
Formel 3-13: Berechnungsvorschrift für das AIC-Kriterium (nach PINHEIRO & BATES 2000 S. 10)	69
Formel 3-14: allgemeine Gleichung für das gemischte lineare Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt	71
Formel 3-15: Gleichung für die logistische Link-Funktion im gemischten binären Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt.....	72
Formel 3-16: allgemeine Gleichung des binären logistischen gemischten Regressionsmodells mit einem Zufallseffekt.....	73
Formel 3-17: Gleichung für die logistische Link-Funktion im gemischten kumulativen Schwellenwertmodell mit einem Zufallseffekt.....	74

Formel 3-18: allgemeine Gleichung des kumulativen logistischen Schwellenwertmodells als gemischtes Regressionsmodell mit einem Zufallseffekt	75
Formel 3-19: Beispiele für die zu schätzenden Modellgleichungen stetiger Variablen	81
Formel 3-20: Beispiel für die zu schätzende Modellgleichung der Gesamtmorphologie (Qualitätsklasse).....	82
Formel 3-21: allgemeine Gleichung für den linearen Prädiktor bei fraktionalen Polynomen nach HOSMER & LEMESHOW (2000 S. 101).	85
Formel 3-22: Berechnungsvorschrift für den Korrelationskoeffizienten r nach HEDDERICH & SACHS (2016)	91
Formel 3-23: Berechnungsvorschrift für den Varianzinflationsfaktor (VIF).....	92

15 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahre
a. a. O.	am angegebenen Ort
Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
ebd.	ebenda
m	Meter
mm	Millimeter
m ² /ha	Quadratmeter je Hektar
NRW	Nordrhein-Westfalen
rd.	rund
S.	Seite
SAX	Sachsen
stdr	Standraum
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche

16 Anhang

Abbildung 16-1: Größen der Probeflächen/des Probekreistrasters und Anzahl der aufgenommenen Buchen.

(5) eigene Aufnahmen, (6) eigene Berechnungen

Bezeichnung			Probeflächen/Probekreise				Anzahl an Buchen					
Versuchs- fläche	Parzelle	Probe- fläche	Seitenlängen Probefläche [m] (5)	Größe Probefläche [m ²] (6)	Anzahl Transekte (5)	Anzahl Probekreise (5) Flächensumme Probekreise [m ²] (6)	Anzahl lebende Buchen (5)	Anzahl absterbende Buchen (5)	Anzahl abgestorbene Buchen (5)	Anzahl ausgefallene Buchen (5)	Gesamtzahl Buchen (5)	Stückzahl gesamt pro Hektar incl. ausgefallener Buchen (6)
20	3	3	9,62 x 17,15	165,0			113		6	40	159	9.636
	4	1	7,85 x 21,25	166,8			135		21	52	208	12.470
	4	2	8,30 x 18,70	155,2			99		2	74	175	11.276
21	12	1	16,92 x 10,20	172,6			76			40	116	6.721
	10	2	14,85 x 11,50	170,8			80			16	96	5.621
	5	3	10,93 x 10,93	119,5			52		9	15	76	6.360
	4	4	13,70 x 13,70	187,7			70	1	3	35	109	5.807
	4	5	9,85 x 15,50	152,7			61		2	33	96	6.287
22	1				7	22	438,9	127	2	8	137	3.121
	2				14	71	1.416,5	433	1	71	505	3.565
	3				15	92	1.835,4	557	6	99	662	3.607
23	1				14	66	1.316,7	272		6	278	2.111
	2				16	126	2.513,7	447	1	31	479	1.906
24	1	1	25,00 x 14,00	350,0			186		6		192	5.486
	1	2	10,20 x 11,00	112,2			68		1		69	6.150
	2	2	7,90 x 8,55	67,5			41	2	1		44	6.519
	4	1	7,40 x 10,90	80,8			81		1		82	10.149
25	2	2	15,00 x 8,30	124,5			67				67	5.382
	4				7	47	937,7	308	6	8	322	3.434
	5				6	47	937,7	316	3	16	335	3.573
26	4	1	30,00 x 30,00	900,0			309		8		317	3.522
	4	2	30,00 x 30,00	900,0			386	1	23		410	4.556
	6	1	14,40 x 16,05	231,1			85				85	3.678
	6	2	17,80 x 12,67	225,5			87				87	3.858
27	1				4	13	259,4	97			97	3.740
	2				4	19	379,1	115		2	117	3.087
28	1	1	8,30 x 18,70	155,2			99		2	74	175	11.276
29	1	1	16,92 x 10,20	172,6			76			40	116	6.721
30	1	1			7	22	438,9	127	2	8	137	3.121
31	1	1			14	66	1.316,7	272		6	278	2.111
	1	2			16	126	2.513,7	447	1	31	479	1.906

Erklärung zur Eröffnung des Promotionsverfahrens

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.
2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- *keine* -
3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.
4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist – sofern es sich nicht um eine kumulative Dissertation handelt – auch noch nicht veröffentlicht worden.
5. Sofern es sich um eine kumulative Dissertation gemäß § 10 Abs. 2 handelt, versichere ich die Einhaltung der dort genannten Bedingungen.
6. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

Ort, Datum

Unterschrift