

**ASTENTWICKLUNG UND ASTREINIGUNG IN ABHÄNGIGKEIT
VOM DICKENWACHSTUM BEI BUCHE (*Fagus sylvatica* L.)
UND EICHE (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.)**

Inaugural – Dissertation zur
Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Forst - und
Umweltwissenschaften der
Albert – Ludwigs - Universität
Freiburg i. Brsg.

vorgelegt von

JOHANNA KATHARINA STORCH

Freiburg im Breisgau

Juli 2011

Dekan:	Prof. Dr. Jürgen Bausus
Referent:	Prof. Dr. Heinrich Spiecker
Korreferent:	Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker
Datum der mündlichen Prüfung:	09. Dezember 2011

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg in den Jahren 2008 bis 2011 unter der Betreuung von Herrn Prof. Dr. Heinrich Spiecker. Ihm gilt mein aufrichtiger Dank für seine wissenschaftlich fundierte Unterstützung, sein großes Interesse an diesem von mir selbst gewählten Thema, seine stete Diskussionsbereitschaft sowie seine kreativen Lösungsvorschläge.

Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an meinen Zweitbetreuer, Herrn Prof. Dr. Sebastian Heinrich, der mich besonders während der Auswertungsphase ungeheuer kenntnisreich und geduldig unterstützte, dem Thema meiner Arbeit sowie meinen persönlichen Fortschritten großes Interesse entgegenbrachte und sich immer Zeit für mich und meine Fragen nahm.

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker danke ich sehr herzlich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Meinem ehemaligen Arbeitskollegen, Mentor und Freund, Dr. Joachim Langshausen, verdanke ich, dass ich diese Dissertation nicht nur begonnen, sondern auch zum Abschluss gebracht habe.

Ebenfalls bedanken will ich mich bei meinen lieben Kollegen am Institut. Zunächst möchte ich Felix Baab und Clemens Koch, die mich sehr während der Feldaufnahmen und Präparations- und Messarbeiten im Labor unterstützten, Olaf Grobbel, der mir bei vielen EDV- Problemen half, sowie Isabella Katz und Dajana Grenzer, welche mich in administrativen Angelegenheiten entlasteten, erwähnen. Des Weiteren will ich mich besonders bei meinen (zum Teil ehemaligen) Kollegen Dr. Hans-Peter Kahle, Christopher Morhart, Simeon Springmann, Dr. Karl Tojic, Dr. Philipp Duncker, Arno Mattes, Andreas Dörr, Simon Boden, Bela Bender, Philipp Weiner, Frank Wandhofer, Marieke van der Maaten- Theunissen, Ernst van der Maaten und Dominik Stangler für die vielen konstruktiven Gespräche und Ratschläge sowie die großartige, entspannte und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre am Institut bedanken.

Für die freundliche Unterstützung der Forstbehörden Breisgau- Hochschwarzwald, Emmendingen, Enzkreis, Karlsruhe, Konstanz, Lörrach, Ortenaukreis und Tübingen, die mir bereitwillig das von mir benötigte Probematerial zur Verfügung stellten und den Fragestellungen meiner Arbeit sehr interessiert gegenüberstanden, will ich mich desgleichen recht herzlich bedanken.

Mein Dank gilt außerdem den wissenschaftlichen Hilfskräften Dominik Bickschäfer, Marc Bochinski, Daniela Diaconu, Michael Hewart, Vincent Kopiec, Joachim Lecoutre, Francisca Mena- Espinosa, Peter Rodenfels, Gregor Seitz und Dorothee Wesselkamp ohne deren tatkräftige Mithilfe die Realisierung der vorliegenden Arbeit nicht denkbar gewesen wäre.

Finanzielle Unterstützung gewährten dankenswerterweise die Landesforstverwaltung Rheinland - Pfalz sowie die Gesellschaft zur Förderung der Forst - und Holzwirtschaft.

Während der gesamten Zeit habe ich immer wieder großen Rückhalt bei meinen Freunden und meiner Familie gefunden. Ein besonderer Dank gilt hier insbesondere meiner Schwester Friederike Storch. Mein bester Freund Uli Schuler stand mir über die ganzen Jahre hinweg liebevoll und stärkend zur Seite. Auch ihm gilt mein herzlicher Dank.

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG.....</u>	<u>1</u>
1.1	WERTHOLZPRODUKTION	1
1.1.1	DIE BAUMKRONE IST MEHR ALS DIE SUMME IHRER ÄSTE	2
1.1.2	BAUMARTENVERGLEICH	4
1.2	STAND DES WISSENS UND BISHERIGE FORSCHUNGSANSÄTZE.....	4
1.2.1	BEWIRTSCHAFTUNGSREGIME UND HOLZQUALITÄTSRELEVANTE ASTMERKMALE.....	5
1.2.2	ASTDURCHMESSER UND ASTRADIALZUWACHS	6
1.2.2.1	Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Schaftdurchmesser.....	6
1.2.2.2	Dauer und Alterstrend des Astdurchmesserzuwachses	7
1.2.2.3	Weitere Einflüsse auf den Astdurchmesser	8
1.2.3	ASTANZAHL	8
1.2.4	ASTANSATZWINKEL	10
1.2.5	ASTREINIGUNG.....	12
1.2.5.1	Astmortalitätsprozess	12
1.2.6	ASTÜBERWALLUNGSDAUER UND INNERE ÄSTIGKEIT BEI NATÜRLICHER ASTREINIGUNG.....	14
1.2.6.1	Astübewallungsdauer	14
1.2.6.2	Radius des asthaltigen Kerns	15
1.2.7	SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTEN VON BUCHE UND EICHE.....	16
1.2.7.1	Schattentoleranz	16
1.2.7.2	Architekturmodell	16
1.2.7.3	Morphogenetischer Zyklus	17
1.2.7.4	Höhenwachstumsdynamik und Reaktionsfähigkeit	17
1.2.7.5	Reiterationen und Kurztriebe	18
1.2.7.6	Veränderungen der Baum- und Kronengestalt.....	19
1.2.7.7	Charakter morphologischer Anpassungen an unterschiedliche Lichtverhältnisse	20
1.2.7.8	Ontogenetische und allometrische Modifikationen.....	21
1.2.7.9	Holzanatomie und Wasserleitung.....	22
1.2.7.10	Zersetzung toter Äste.....	23
1.2.7.11	Einflüsse baumartenspezifischer Eigenschaften auf Wachstum und holzqualitätsrelevante Merkmale	24
1.2.7.11.1	Höhenwachstumsdynamik	25
1.2.7.11.2	Kronenkenngrößen und daraus abgeleitete Behandlungsempfehlungen	25
1.2.7.11.3	Kronen- und Astarchitektur.....	26

1.2.7.11.4 Astreinigungsprozess	27
1.3 ZIELSETZUNG	29
<u>2 METHODEN</u>	<u>32</u>
2.1 FORSCHUNGSANSÄTZE	32
2.1.1 EINZELBAUMBENE.....	33
2.1.1.1 Forschungsansatz zu Baumgestalt.....	33
2.1.1.1.1 Baumhöhenentwicklung	33
2.1.1.1.2 Kronendurchmesser.....	34
2.1.1.1.3 Astanzahl	35
2.1.1.2 Forschungsansätze zu Astmortalität und Astüberwallung (Astreinigung).....	36
2.1.1.2.1 Kronenansatzhöhe und astfreie Schaftlänge	36
2.1.2 EINZELASTEBENE	36
2.1.2.1 Forschungsansatz zur Astarchitektur.....	38
2.1.2.1.1 Astlänge	38
2.1.2.1.2 Astdurchmesser	38
2.1.2.1.3 Astradialzuwachs	39
2.1.2.1.4 Astansatzwinkel	39
2.1.2.2 Forschungsansatz zur Astmortalität	40
2.1.2.2.1 Aststatus.....	40
2.1.2.3 Forschungsansatz zur Astüberwallung und inneren Ästigkeit	40
2.1.2.3.1 Astüberwallungsdauer	40
2.1.2.3.2 Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung.....	41
2.1.2.3.3 Radius des asthaltigen Kerns	41
2.2 AUSWAHLKRITERIEN.....	42
2.2.1 VORAUSWAHL DER BESTÄNDE	42
2.2.2 BESTANDESAUSWAHL	45
2.2.3 AUSWAHL DER PROBEBÄUME.....	46
2.3 DATENERHEBUNG	46
2.4 DATENERHEBUNGEN AM STEHENDEN BAUM.....	46
2.5 DATENERHEBUNGEN AM LIEGENDEN BAUM	47
2.5.1 TRIEBLÄNGENMESSUNGEN UND VORBEREITENDE ARBEITEN FÜR DIE STAMMANALYSE	48
2.5.2 ASTMESSUNGEN	48
2.5.3 PROBENENTNAHME	50

2.6	PROBENPRÄPARATION.....	50
2.7	TOTASTMESSUNGEN	50
2.7.1	AUFNAHME DIMENSIONSBEZOGENER PARAMETER	51
2.7.2	AUFNAHME ZEITBEZOGENER PARAMETER:	52
2.8	RADIALZUWACHSMESSUNGEN	53
2.9	RINDENSTÄRKENMESSUNG AN STAMM UND ÄSTEN	54
2.10	DATENAUFBEREITUNG.....	55
2.11	HERLEITUNG DES STICHPROBENUMFANGS	56
2.12	DATENAUSWERTUNGEN.....	58
2.12.1	FEHLENDE WERTE UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNGEN	58
2.12.2	STATISTISCHE DATENAUSWERTUNG.....	59
2.12.2.1	Lineare Regression	60
2.12.2.2	Nicht- lineare Regression.....	65
2.12.2.3	Binäre logistische Regression	65
2.12.2.4	Vergleich zweier oder mehrerer Mittelwerte	67
2.13	HILFSFUNKTIONEN ZUR ERMITTLUNG DES RINDENANTEILS.....	68
2.13.1	RINDENFUNKTION SCHAFT	69
2.13.2	RINDENFUNKTION ÄSTE	70
3	<u>MATERIAL.....</u>	<u>72</u>
3.1	ÜBERBLICK ÜBER DAS AUFGENOMMENE MATERIAL	72
3.1.1	EINZELBAUMBEZOGENE KENNGRÖßEN	72
3.1.2	EINZELASTBEZOGENE KENNGRÖßEN	73
3.1.2.1	Aufnahmen am liegenden Baum	73
3.1.2.2	Entnommene Astproben	74
4	<u>ERGEBNISSE.....</u>	<u>77</u>
4.1	BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR.....	77
4.1.1	EINZELBAUMBEBENE.....	77
4.1.1.1	Höhenwachstum.....	77
4.1.1.2	Kronendurchmesser.....	83
4.1.1.2.1	Einfluss der Baumart	87
4.1.1.2.2	Einfluss des Dickenwachstums	89

4.1.1.3	Anzahl lebender Äste	90
4.1.1.3.1	Einfluss der Baumart	96
4.1.1.3.2	Einfluss des Dickenwachstums	98
4.1.2	EINZELASTEBENE	97
4.1.2.1	Astlänge	98
4.1.2.1.1	Einfluss der Baumart	102
4.1.2.2	Astdurchmesser	103
4.1.2.2.1	Einfluss der Baumart	109
4.1.2.2.2	Einfluss des Dickenwachstums	111
4.1.2.3	Astradialzuwachs	112
4.1.2.3.1	Einfluss der Baumart	122
4.1.2.3.2	Einfluss des Dickenwachstums	124
4.1.2.4	Astansatzwinkel	125
4.1.2.4.1	Einfluss der Baumart	132
4.1.2.4.2	Einfluss des Dickenwachstums	132
4.2	ASTMORTALITÄTSPROZESS	132
4.2.1	EINZELBAUMBENE	133
4.2.1.1	Kronenansatzhöhe	133
4.2.1.1.1	Einfluss der Baumart	138
4.2.1.1.2	Einfluss des Dickenwachstums	139
4.2.2	EINZELASTEBENE	140
4.2.2.1	Aststatus	140
4.2.2.1.1	Einfluss der Baumart	145
4.2.2.1.2	Einfluss des Dickenwachstums	146
4.3	ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT	147
4.3.1	EINZELBAUMBENE	147
4.3.1.1	Astfreie Schaftlänge	147
4.3.1.1.1	Einfluss der Baumart	152
4.3.1.1.2	Einfluss des Dickenwachstums	153
4.3.2	EINZELASTEBENE	154
4.3.2.1	Astüberwallungsdauer	154
4.3.2.1.1	Einfluss der Baumart	159
4.3.2.1.2	Einfluss des Dickenwachstums	161
4.3.2.2	Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung	161
4.3.2.2.1	Einfluss der Baumart	166

4.3.2.3	Radius des asthaltigen Kerns	168
4.3.2.3.1	Einfluss der Baumart	174
4.3.2.3.2	Einfluss des Dickenwachstums	174
5	<u>DISKUSSION.....</u>	176
5.1	DISKUSSION DER METHODIK.....	176
5.2	DISKUSSION DES MATERIALS	178
5.3	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	180
5.3.1	BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR.....	180
5.3.1.1	Einzelbaumebene	180
5.3.1.1.1	Höhenwachstum	180
5.3.1.1.2	Kronendurchmesser	183
5.3.1.1.3	Anzahl lebender Äste.....	187
5.3.1.2	Einzelastebene.....	189
5.3.1.2.1	Astlänge	189
5.3.1.2.2	Astdurchmesser	190
5.3.1.2.3	Astradialzuwachs	196
5.3.1.2.4	Astansatzwinkel	199
5.3.2	ASTMORTALITÄTSPROZESS.....	202
5.3.2.1	Einzelbaumebene	202
5.3.2.1.1	Kronenansatzhöhe	202
5.3.2.2	Einzelastebene.....	208
5.3.2.2.1	Aststatus.....	208
5.3.3	ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT	212
5.3.3.1	Einzelbaumebene	212
5.3.3.1.1	Astfreie Schaftlänge	212
5.3.3.2	Einzelastebene.....	215
5.3.3.2.1	Astüberwallungsdauer	215
5.3.3.2.2	Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung.....	217
5.3.3.2.3	Radius des asthaltigen Kerns	219
6	<u>FOLGERUNGEN.....</u>	222
6.1	BILANZ DER ERGEBNISSE	222

6.1.1	BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR	222
6.1.2	ASTMORTALITÄTSPROZESS.....	223
6.1.3	ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT	224
6.2	EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS AUF ASTENTWICKLUNG UND ASTREINIGUNG.....	224
6.2.1	SIMULATION DES ASTREINIGUNGSPROZESSES.....	225
6.2.2	EINFLUSS WEITERER FAKTOREN	234
6.3	EINFLUSS DER BAUMART AUF ASTENTWICKLUNG UND ASTREINIGUNG	236
6.3.1	BUCHE	236
6.3.2	EICHE.....	237
<u>7</u>	<u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>239</u>
<u>8</u>	<u>SUMMARY.....</u>	<u>242</u>
<u>9</u>	<u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	<u>244</u>
<u>10</u>	<u>TABELLENVERZEICHNIS.....</u>	<u>260</u>
<u>11</u>	<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u>	<u>264</u>
<u>12</u>	<u>ANHANG</u>	<u>271</u>

1 EINLEITUNG

1.1 WERTHOLZPRODUKTION

Unter den Laubbaumarten besitzen Buche (*Fagus sylvatica L.*) und Eiche (*Quercus petraea (Matt.) Liebl.*; *Quercus robur L.*) in Deutschland die größte wirtschaftliche Bedeutung. So sind sie sowohl vom Einschlagsvolumen als auch von der Waldfläche her die beiden wichtigsten Laubbaumarten (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2004)). Unter allen wirtschaftlich relevanten Laubbaumarten Deutschlands erzielte Eichenholz bester Qualität neben Holz der Baumart Ahorn in den letzten Jahren die höchsten Festmeterpreise (LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN WÜRTTEMBERG (2007), LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (2008), LANDESBETRIEB FORSTBW (2009)). Trotz der seit einiger Zeit herrschenden Preisdepression für Buchenholz wird auch zukünftig die Produktion von Wertholz übergeordnetes Produktionsziel der Waldbewirtschaftung sein (SCHMIDT et al. (2005)).

Die primäre Intention der Wertholzproduktion ist die Erziehung von Schäften, aus denen Sägeholz wie Balken oder Bretter, aber vor allem Furnierholz hergestellt werden kann. Nach den Sortierregeln der Europäischen Norm EN1316 zur Laubrundholzsortierung (vgl. EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (1997)) spielen neben Merkmalen wie Stammform, Verkernung oder Jahrring- bzw. Splintbreite vor allem die Stammdimension der Ausbeute wegen sowie das Vorhandensein von Ästen die größte Rolle bei der Klassifikation von Buchen- und Eichenrundholz. Es kann dabei Spitzenpreise auf dem Markt erzielen, wenn die Anforderungen an die höchste Güteklasse erfüllt werden. Indes sind in Deutschland nur 2 bis 5% des jährlichen Rundholzaufkommens aufgrund ihrer Qualität und Dimension für Furnierzwecke geeignet (BECKER (2010)).

Dabei steht die Produktion von Wertholz im Spannungsfeld zweier gegenläufiger Wachstumsprozesse, der natürlichen Astreinigung und des Dickenwachstums, deren Intensität und Dauer vom Bewirtschafter im Rahmen des zweiphasigen Pflegekonzepts (vgl. z.B. SPIECKER et al. (2009)) auf die jeweiligen baumartenspezifischen Wachstumscharakteristiken zugeschnitten und sorgfältig ausbalanciert werden muss. Der Bewirtschafter bedarf hierfür operationaler Handlungsempfehlungen, welche in ziel- und zustandsorientierten Wachstumsmodellen gründen.

Neuere Untersuchungen zur Astreinigung und zum Dickenwachstum von Buchen und Eichen in Abhängigkeit des waldbaulichen Regimes sowie die daraus erfolgende Ableitung von Behandlungsempfehlungen für die Praxis liegen zum Beispiel von SPIECKER (1991), NUTTO (2000) und LANGSHAUSEN (2009) vor. Im Fokus dieser Arbeiten steht die Entwicklung des Einzelbaumes über eine Zeitpanne von mehreren Jahrzehnten, welche die beiden Pflegephasen „Astreinigung“ und „Dickenwachstum“ abdeckt. Kleinste Betrachtungseinheit ist hier mit wenigen Ausnahmen der Baum, welcher Wachstumsgesetzmäßigkeiten bezüglich Astreinigung und Dickenwachstum in Abhängigkeit von Standorts- und Standraumbedingungen in aggregierter Form widerspiegelt. Zusammenhänge zwischen Standraum und Dickenwachstum konnten in diesen Arbeiten mit Hilfe von Kronenbreitenmodellen dargestellt werden, der Kronenansatz des Einzelbaumes liefert wertvolle Informationen über Dauer und Intensität der Astreinigung und die astfreie Schaftlänge erlaubt Aussagen über den Astüberwallungsvorgang.

1.1.1 DIE BAUMKRONE IST MEHR ALS DIE SUMME IHRER ÄSTE

Die vorliegende Arbeit konzentriert den Fokus vor allem auf den Einzelast als kleinste Betrachtungseinheit, welcher in der dynamischsten Bestandesentwicklungsphase, der Phase der natürlichen Astreinigung, vielfältigen Einflüssen unterworfen ist, die auf mehreren Ebenen (Einflüsse des Einzelbaumes aber auch Einzelastmerkmale) angesiedelt sind. Die Segmentierung der Baumkrone in ihre Einzelteile erlaubt durch die Modulation des Begriffs der Krone als bloße Summe ihrer Äste zwar einen differenzierteren Einblick in Astwachstums- und Astmortalitätsprozesse. Durch diese Aufschlüsselung kann jedoch auch ein Teil der Praxisnähe verloren gehen, denn ein einzelner griffiger und aussagekräftiger Kennwert zur Entscheidungshilfe oder Evaluation von Behandlungsmaßnahmen kann nun nur noch schwer angegeben werden. Dennoch enthalten auf empirischen Daten von Ästen basierende Wachstumsmodelle wertvolle Informationen für die Wertholzproduktion, die zum Beispiel mit Hilfe von Wachstumssimulatoren für Einzelbäume verknüpft werden können. Auf diese Weise ist eine solide Grundlage geschaffen, von der ausgehend Prognosen getätigt und Entscheidungen getroffen werden können.

Viele der bisher im Kontext der Wertholzproduktion konzipierten einzelastbasierten Wachstumsmodelle wurden mit dem Ziel erstellt, diese später als integralen Teil von Wachstumssimulatoren zu verwenden (z.B. HEIN et al. (2007b), KINT et al. (2010), MAGUIRE et al. (1999), MAGUIRE et al. (1994), MÄKINEN & COLIN (1998), MÄKINEN (1999a), MÄKINEN

& COLIN (1999), MÄKINEN et al. (2003b), MÄKINEN et al. (2003a), MÄKINEN (2002), WEISKITTEL & MAGUIRE (2006)). Im Fokus stand hier meist die Prognose mechanistischer sowie holzqualitätsrelevanter Aspekte von Ästen. Der überwiegende Anteil dieser Modelle wurde bislang für Koniferen erstellt (so zum Beispiel MAGUIRE et al. (1994) für *Pseudotsuga menziesii*, MÄKINEN & COLIN (1999) und MÄKINEN & SONG (2002) für *Pinus sylvestris*, HEIN et al. (2007b) für *Picea abies*) wohingegen empirische einzelastbasierte Modelle für Laubbäume erst in den letzten Jahren parametrisiert wurden (MÄKINEN (2002) für *Betula pendula*, HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) für *Fagus sylvatica* sowie *Fraxinus excelsior* und *Acer pseudoplatanus* und schließlich KINT et al. (2010) für *Quercus robur* und *Fagus sylvatica*). Die Gründe hierfür mögen vor allem darin liegen, dass die natürliche Astreinigung bei Laubbäumen, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, generell weniger problematisch verläuft als bei Koniferen beziehungsweise dass die Kronenstruktur von Laubbäumen im Allgemeinen durch ihre größere Komplexität weniger gut prognostizierbar ist (vgl. SCHMIDT (2001), KINT et al. (2010)).

Im Rahmen dieser Arbeit soll deswegen die „Ästigkeit“ von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.) im Kontext der Einzelbaumvitalität (i.S.v. Dickenwachstum des Schaftes) untersucht werden. Dabei werden verschiedene Aspekte dieses Zustands näher beleuchtet:

- die Astarchitektur lebender Äste
- der Astmortalitätsprozess
- die Astmerkmale toter Äste, wobei dieser Punkt sowohl den Astüberwallungsprozess als zeitliche als auch die innere Ästigkeit des Schaftes als räumliche Komponente umschließt.

Der Astmortalitätsprozess zusammen mit dem sich anschließenden Astüberwallungsprozess wird zusammenfassend als Astreinigungsprozess definiert (vgl. BURSCHEL & HUSS (1997 a)).

Das in dieser Arbeit betrachtete Bestandesentwicklungsstadium bezieht sich ausschließlich auf die Astreinigungsphase.

1.1.2 BAUMARTENVERGLEICH

Der dezidierte Vergleich autökologischer Eigenschaften von Baumarten wie zum Beispiel der Schattentoleranz ist seit langem Gegenstand der Forschungen vor allem in botanisch- morphologischen sowie auch in ökophysiologischen Bereichen (neuere Arbeiten unter anderem von MOURELLE et al. (2001), CLAVEAU et al. (2002), HAGEMEIER (2002), GERSONDE & O'HARA (2005), BONOSI (2006)). Basierend auf waldwachstumskundlichen ziel- und zustandsorientierten empirischen Prognosemodellen im Kontext der Wertholzproduktion wurden jedoch bisher nur selten Baumarten mit unterschiedlichem Beschattungsertragnis kontrastiert. TAKAHASHI (1996) verglich zwei Koniferenarten bezüglich ihres Astreinigungsprozesses auf Grundlage univariater linearer Regressionsmodelle. HEIN (2004), der multivariate lineare- und nichtlineare Modelle zur Steuerung der Astreinigung und des Dickenzuwachses für *Fraxinus excelsior* und *Acer pseudoplatanus* parametrisierte, verglich die von ihm untersuchten Baumarten direkt vor dem Hintergrund der jeweils erstellten empirischen Wachstumsmodelle.

Diese Ansätze wurden als vielversprechend erachtet und somit auch in dieser Arbeit gewählt, um Buche und Eiche unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen kontrastieren zu können und den sich ergebenden Unterschied vor dem Hintergrund der unterschiedlichen autökologischen Eigenschaften zu interpretieren.

1.2 STAND DES WISSENS UND BISHERIGE FORSCHUNGSANSÄTZE

Im folgenden Kapitel sollen zunächst Zusammenhänge zwischen holzqualitätsrelevanter Astarchitektur der Primäräste bzw. deren Astreinigung und möglichen Einflussfaktoren auf Einzelbaum- und Einzelastebene anhand bislang parametrisierter empirischer Modelle dargestellt werden. Dabei soll vor allem der Einfluss des Schaftdurchmessers als Indikator („Proxy“) für die Einzelbaumvitalität auf verschiedene Astcharakteristiken dargestellt werden. Daneben wird der Zusammenhang zwischen Astmerkmalen und weiteren wichtigen einzelbaum- oder einzelastbasierten Einflussvariablen wie beispielsweise der Baumhöhe (bzw. dem jährlichen Höhenzuwachs), der jeweiligen Astansatzhöhe oder des genetischen Einflusses diskutiert. Ein weiteres Kapitel widmet sich den Einflüssen auf die zeitliche und qualitative Komponente des Astreinigungsprozesses.

Überdies sollen spezifische Eigenschaften von Buche und Eiche, welche für die Entwicklung biologisch interpretierbarer Wachstumsmodelle von Belang sind, auf Grundlage der Literatur zusammengestellt

werden. Hier werden insbesondere die Unterschiede in der Schattentoleranz, des Architekturmodells, der morphologischen Plastizität sowie der Holzanatomie anhand von Literaturangaben diskutiert.

Zum Schluss wird der Einfluss der herausgearbeiteten baumartenspezifischen Eigenschaften auf holzqualitätsrelevante Merkmale diskutiert. Dezidierte Kontrastierungen der beiden Baumarten Buche und Eiche bezüglich der Astarchitektur und der Astreinigung vor dem Hintergrund waldwachstumskundlicher Zusammenhänge finden sich in der begutachteten Literatur mit Ausnahme von KINT et al. (2010) nicht.

1.2.1 BEWIRTSCHAFTUNGSREGIME UND HOLZQUALITÄTSRELEVANTE ASTMERKMALE

Die Gestalt des Stammes und der Krone ist das Ergebnis des Zusammenspiels eines genetisch fixierten Architekturschemas sowie von Umweltbedingungen, welche eine Abweichung von diesem Schema bewirken (WEINREICH (2000)). Die Forstwirtschaft macht sich dabei die Modifikationen, welche durch Umwelteinflüsse hervorgerufen werden zunutze, um verschiedene Ziele hinsichtlich der Holzproduktion zu erreichen. So ist es etwa bei der Erzeugung von Wertholz erwünscht, Stämme großer Dimension mit einem geringen asthaltigen Kern zu produzieren.

In vielen Arbeiten wurde deswegen untersucht, inwiefern sich die unterschiedlichsten Stamm- und Kroneneigenschaften durch die Bestandesdichte regulieren lassen (z.B. GRAH (1961), KELLOMÄKI et al. (1989), MÄKINEN (1999a), BALDWIN et al. (2000), MEDHURST & BEADLE (2001), MÄKINEN (2002), ILOMÄKI et al. (2003), GARBER & MAGUIRE (2005), MÄKINEN & HEIN (2006), HEIN et al. (2007b), ALCORN et al. (2007), ULVCRONA et al. (2007)). Triebfeder der Stamm- und Kronenmodifikationen bei steigender Bestandesdichte ist der durch verschärfte Konkurrenz ansteigende Mangel an Licht. Auch HASHIMOTO (1990) und HASHIMOTO (1991) weist darauf hin, dass das Lichtregime die primäre Determinante der Astcharakteristik und Kronenstruktur sei. Wie noch zu sehen sein wird, existieren auf Einzelbaum- bzw. Einzelastebene weitere Einflussfaktoren, welche die Charakteristik von Ästen und Krone bestimmen können.

1.2.2 ASTDURCHMESSER UND ASTRADIALZUWACHS

1.2.2.1 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ASTDURCHMESSER UND SCHAFTDURCHMESSER

Das Durchmesserwachstum des Schaftes sinkt mit zunehmender Bestandesdichte (z.B. ALCORN et al. (2007)). Jedoch können Dichtstände auch durchaus positive Wirkungen auf die Holzqualität haben, denn sie führen zur Verringerung sowohl des mittleren (PINKARD & NEILSEN (2003)) als auch des maximalen Astdurchmessers (z.B. DORUSKA & BURKHART (1994), PERSSON (1994), NEILSEN & GERRAND (1999), FAHLVIK et al. (2005), GARBER & MAGUIRE (2005), ALCORN et al. (2007), ULVCRONA et al. (2007)). Modellierungen ergaben einen signifikanten positiven Einfluss des Schaftdurchmessers auf den Astdurchmesser (z.B. MAGUIRE et al. (1991), DORUSKA & BURKHART (1994), NIEMISTÖ (1995), MÄKINEN (1996), MÄKINEN & COLIN (1998), MAGUIRE et al. (1999), MÄKINEN et al. (2003b), MÄKINEN et al. (2003a), HEIN et al. (2007b), HEIN et al. (2007a), SCHMIDT (2001)).

Verschiedene Autoren, darunter z.B. NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) fanden einen straffen Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Astlänge an Eiche, Bergahorn, Esche und Buche. Da der Schaftdurchmesser eine Funktion der Kronenbreite ist und sich die Kronenbreite aus der Länge der kronenbildenden Äste und deren Astansatzwinkeln ergibt, kann gefolgert werden, dass zumindest diese Äste bei dickeren Bäumen einen größeren Durchmesser im Vergleich zu kronenbildenden Ästen von Bäumen geringerer Schaftdurchmesser haben müssen. So werden von KINT et al. (2010) unter anderem die Astlänge und der Astansatzwinkel verwendet, um den Astdurchmesser von Buche und Eiche zu prognostizieren. PUKKALA et al. (1992), MÄKINEN (1999b) und HEIN et al. (2007b) weisen darauf hin, dass Faktoren, welche den Radialzuwachs eines Baumes fördern, auch den Radialzuwachs der Äste positiv beeinflussen. MÄKINEN (2002) fand einen signifikanten positiven Einfluss des jährlichen Radialzuwachs des Schaftes auf 1,3m Höhe bei der Prognose der Astradialzuwächse von Ästen der Baumart *Betula pendula*. So beschreiben auch GILMORE & SEYMOUR (1997) und COLIN & HOULLIER (1991) innerhalb gleichaltriger Monokulturen signifikant größere Astdurchmesser bei vitalen Bäumen im Vergleich zu weniger vitalen Bestandesmitgliedern.

Von MÄKINEN (1996) konnte festgestellt werden, dass die Ergänzung von Astdurchmessermodellen durch Konkurrenzindices bei gleichzeitiger Einbeziehung des Quirlalters und des Schaftdurchmessers auf 1,3m Höhe nur noch in geringem Maße zur zusätzlichen Erklärung des Regressanden beitragen.

1.2.2.2 DAUER UND ALTERSTREND DES ASTDURCHMESSERZUWACHSES

GARBER & MAGUIRE (2005) heben in ihren Untersuchungen hervor, dass der Astdurchmesser das Produkt des Zusammenspiels von Astdurchmesserzuwachs und der Dauer des Astwachstums ist. So spielt auch die Ansatzhöhe des Astes am Baum in vielen Astdurchmessermodellen für gleichaltrige Bestände eine große Rolle, da diese das jeweilige Astalter zum Ausdruck bringt.

Dabei ist die Dauer des Astwachstums nicht zu verwechseln mit dem Astalter: in verschiedenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass das Astdurchmesserwachstum bei einigen Baumarten mehrere Jahre vor dem Absterben des Astes eingestellt wird (vgl. GELINSKY (1933) (*Fagus sylvatica*), SCHÖPF (1954) (*Pinus sylvestris*), KERSHAW et al. (1990) (*Pseudotsuga menziesii*), MÄKINEN (1999b) (*Pinus sylvestris*), MÄKINEN (2002) (*Betula pendula*), HEIN et al. (2007b) (*Picea abies*)). MAGUIRE et al. (1994) weisen darauf hin, dass der von ihnen in ihren Untersuchungen beobachtete abnehmende maximale Astdurchmesser mit zunehmender Bestandesdichte vor allem durch die Reduktion der Astlebensdauer hervorgerufen wurde. MÄKINEN (1999b) stellt heraus, dass weite Pflanzabstände zusätzlich zur Nettosteigerung des Astradialzuwachses auch die altersabhängige Reduktion des Astdurchmesserzuwachses verzögern. Auch FAHLVIK et al. (2005) erklären, dass Konkurrenz einen zweifachen Einfluss auf den Astdurchmesser ausübt, zunächst durch die Verringerung der Wachstumsrate und eventuell auch durch ein früheres Absterben der Äste.

Der Astdurchmesserzuwachs zeigte in Untersuchungen von KERSHAW et al. (1990), MÄKINEN (1999a) und MÄKINEN (2002) einen deutlichen Alterstrend mit einer starken Zuwachphase in den ersten Jahren und einem darauf folgenden starken Absinken der Zuwachswerte. Der Hauptgrund hierfür ist in der zunehmenden (Selbst-) Beschattung zu suchen. Im gleichen Jahr kann also ein longitudinales Absinken des Astradialzuwachses von der Kronenspitze bis zur Kronenbasis beobachtet werden, wobei ältere Äste ein im Vergleich zu jüngeren Ästen gebremstes Dickenwachstum besitzen (GARBER & MAGUIRE (2005)).

Auf Einzelbaumebene wurde in verschiedenen Arbeiten an Nadel- aber auch an Laubbäumen ein vertikaler Trend des Astdurchmessers festgestellt, welcher von der Baumspitze nach unten hin zunimmt und an einem bestimmten Punkt etwas oberhalb des Kronenansatzes sein Maximum erreicht (SCHÖPF (1954) (*Pinus sylvestris*), COLIN & HOULLIER (1991) (*Picea abies*), GILMORE & SEYMOUR (1997) (*Abies balsamea*), MEREDIEU et al. (1998) (*Pinus nigra*), MAGUIRE et al. (1999) (*Pseudotsuga menziesii*), MÄKINEN et al. (2003b) (*Betula pendula*), LANGSHAUSEN (2009) (*Fagus*

sylvatica)). Modelltypen, die diesen Umstand berücksichtigen, sind segmentierte und nicht segmentierte Polynomgleichungen (SCHMIDT (2001)), wie sie z.B. von COLIN & HOULLIER (1991) oder MAGUIRE et al. (1994) verwendet werden. Jedoch haben diese Funktionstypen den Nachteil, dass die biologische Interpretation schwieriger wird und es außerdem zu unplausiblen Vorzeichenkombinationen kommen kann (SCHMIDT (2001)).

1.2.2.3 WEITERE EINFLÜSSE AUF DEN ASTDURCHMESSER

Der Astdurchmesser lässt sich deswegen sehr einfach über die Bestandesdichte regulieren (MEDHURST & BEADLE (2001)), weil er eher von Ressourcenverfügbarkeiten als von der jeweiligen Heritabilität abhängt (OTEGBEYE (1992)). PÖYKKÖ (1982) und PERSSON (1994) weisen jedoch auf eine nicht zu vernachlässigende Heritabilität des Astdurchmessers bei *Pinus sylvestris* hin, wohingegen HAAPANEN et al. (1997) nur einen sehr moderaten genetischen Einfluss auf den Astdurchmesser derselben Baumart fanden.

Neben den genannten Einflüssen kann der Astdurchmesser auch durch standörtliche Faktoren modifiziert werden. So konnten WATT et al. (2005) einen signifikanten positiven Einfluss der Windexposition des Baumes auf den Astdurchmesser feststellen, was auf eine verstärkte Reaktionsholzbildung zurückzuführen ist, welche den Ast vor „mechanischem Versagen“ (WATT et al. (2005)) schützen soll.

1.2.3 ASTANZAHL

Zwar wird der Anzahl der Äste erster Ordnung pro Höhentrieb für verschiedene Baumarten von einigen Autoren eine gewisse Heritabilität zugesprochen (vgl. PÖYKKÖ (1982), CEULEMANS et al. (1990), COLIN & HOULLIER (1992), ALCORN et al. (2007)), jedoch ergaben die meisten Untersuchungen, dass die Anzahl *jährlich* gebildeter Äste in erster Linie von den jeweiligen baumindividuellen Konkurrenzverhältnissen sowie vom jährlichen Höhenzuwachs abhängt (vgl. COCHRANE & FORD (1978), HARMER (1989), COLIN & HOULLIER (1992), MAGUIRE et al. (1994) und HEIN & SPIECKER (2007)).

Von GOTTSCHALK (1994), MAGUIRE et al. (1994), SIPE & BAZZAZ (1994), BONSER & AARSSSEN (1994), WEINREICH (2000) und DUCHESNEAU et al. (2001) wird der negative Einfluss abnehmender Lichtintensität auf die jährlich gebildete Anzahl der Äste herausgestellt. COLIN & HOULLIER (1992) verwenden zusätzlich zur Länge des Jahrestriebs auch dessen Alter, um die Anzahl jährlich gebildeter Äste unter Berücksichtigung der Ontogenese des Baumes zu prognostizieren.

HARMER (1989) konnte im Rahmen von Düngungsexperimenten an *Quercus petraea* einen positiven Zusammenhang zwischen der Anzahl jährlich gebildeter Äste und der jeweils zugeführten Nährstoffmenge feststellen. Auch BJÖRKLUND (1997) konnte eine zunehmende Anzahl an Quirlästen von *Pinus sylvestris* mit verbesserten Standortbedingungen feststellen. Von MAGUIRE et al. (1994) wird jedoch betont, dass es nicht klar sei, ob sich der Effekt einer Standortverbesserung direkt in positiver Weise auf die Anzahl der Äste pro Höhentrieb auswirkt, oder ob dies die Anzahl der Äste nur indirekt über einen größeren jährlichen Höhenzuwachs beeinflusst. COLIN & HOULLIER (1992) stellen allerdings heraus, dass die Anzahl der jährlich gebildeten Äste auch klimatisch bedingt sei, so dass bei der Modellierung mit einer sehr hohen Variabilität zu rechnen ist.

Bei der Modellierung der Anzahl der Primäräste je Astquirl an *Picea abies* schreiben HEIN et al. (2007b) dem H/D Wert eine besondere Rolle als Prädiktor zu, welcher eng mit der Bestockungsdichte und der jeweiligen baumindividuellen Ressourcenallokation verknüpft ist (HEIN et al. (2007b)) und somit Indikatorfunktion für die jeweilige Vitalität des Baumes besitzt (HEIN & SPIECKER (2007)). MAGUIRE et al. (1994) hingegen ziehen den Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe heran, um die jeweilige Konkurrenzsituation des Baumes zum Ausdruck zu bringen. Bei Untersuchungen an *Pinus taeda* verwendeten DORUSKA & BURKHART (1994) in einem rekursiven zweistufigen Modellierungssystem die Kronenlänge statt dem H/D - Wert als Konkurrenzindikator um die Gesamtanzahl der Äste pro Baum zu bestimmen. Dabei wurde zunächst ein Modell zur Schätzung der Anzahl der Astquirle pro Baum entwickelt. Einflussvariablen sind hier der Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe und die Kronenlänge. Aus der Anzahl der Astquirle ließ sich dann in einem zweiten Schritt die Astanzahl direkt schätzen. Die genannten Untersuchungen stimmen darin überein, dass die Gesamtastanzahl pro Baum sowie die Astanzahl pro Astquirl mit zunehmender Konkurrenz absinkt (vgl. auch MÄKINEN (1996)). KELLOMÄKI & VÄISÄNEN (1988) fanden in ihren Untersuchungen jedoch nur einen geringen Einfluss der Bestandesdichte auf die jährliche Astbildungsrate.

MÄKINEN et al. (2003b) brechen in ihr Modell zur Schätzung der vertikalen Verteilung der Astanzahl an *Betula pendula* auf Schaftsektoren herunter, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Astanzahl lebender Äste mit zunehmender Entfernung von der Baumspitze aus absinkt.

HARMER (1989) betont, dass die Anzahl der Seitenknospen bei *Quercus petraea* nicht in jedem Fall Aussagen über die Anzahl der daraus entstehenden Äste zulässt, da verschiedenste Einflüsse während

dieser Entwicklungsphase existieren, von denen es abhängt, ob sich die Knospe tatsächlich in einen Seitenast entwickelt oder abstirbt.

1.2.4 ASTANSATZWINKEL

In einigen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass gerade der Astansatzwinkel oft auch einer genetischen Beeinflussung unterliegt (PÖYKKÖ (1982), HAAPANEN et al. (1997), CEULEMANS et al. (1990)). Der Astansatzwinkel wird zunächst durch den Winkel des initialen Aststreckenwachstums (BOZZUTO & WILSON (1988)) bestimmt. Jedoch existieren auf Baum- und Astebene weitere Einflussfaktoren. So führen nach Untersuchungen von ALCORN et al. (2007) an *Eukalyptus pilularis* und *Eukalyptus cloeziana* und MÄKINEN (1996) an *Pinus sylvestris* höhere Bestockungsdichten zu einer Verringerung des Astansatzwinkels. Der steilere Astansatzwinkel in dichteren Beständen könnte durch höhere Konkurrenz um Licht verursacht werden (vgl. HENSKENS et al. (2001)). Auch Untersuchungen von HASHIMOTO (1990) und HASHIMOTO (1991) an *Cryptomeria japonica* zeigten, dass Bäume im Unterstand im Vergleich zu Bäumen aus mitherrschenden und herrschenden Bestandesschichten steilere Äste besitzen. So verwenden zum Beispiel MÄKINEN et al. (2003a) für die Modellierung des Astansatzwinkels die relative Kronenlänge als Weiser für die Bestockungsdichte.

Im Gegensatz dazu stellte KURTH (1946) bei *Fagus sylvatica* in der Schweiz jedoch fest, dass die unterdrückten Exemplare in Jungbeständen die flacheren Astansatzwinkel aufwiesen. Dies konnte von WEINREICH (2000) bei Untersuchungen an jungen Eichen bestätigt werden, wo beschattete Bäume einen signifikant flacheren mittleren Astansatzwinkel besaßen als auf der Freifläche erwachsene Exemplare. KURTH (1946) konnte darlegen, dass sich die mittleren Astansatzwinkel bei Jungwüchsen und in Dickungen größer ausfielen als solche in schwachen Stangenhölzern, WEINREICH (2000) hingegen konnte bei jungen Eichen keine Veränderung des Astansatzwinkels mit dem Baumalter feststellen.

In kleinräumiger Auflösung weisen auch die einzelnen Äste eines Baumes unterschiedliche Astansatzwinkel auf. So stellte KURTH (1946) fest, dass die mittleren Astansatzwinkel mit zunehmender Baumhöhe an *Fagus sylvatica* abnehmen. Auch MEDHURST & BEADLE (2001) konnten bei *Eukalyptus nitens* horizontaler ausgerichtete Äste in den unteren Kronenbereichen feststellen. Dies konnte von MÄKINEN et al. (2003b) bei Untersuchungen an *Betula pendula*, SONE et al. (2006) an *Acer rufinerve* und KINT et al. (2010) bei Untersuchungen an *Fagus sylvatica* und

Quercus robur bestätigt werden. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung findet sich bei SONE et al. (2006): Um die Schattenblätter möglichst gleichmäßig am Ast verteilen zu können und so die Lichtinterzeption zu maximieren, erweist sich im beschatteten Kronenbereich eine horizontale Ausrichtung der Äste als vorteilhaft.

Untersuchungen von COLIN & HOULLIER (1992) an *Picea abies*, HASHIMOTO (1990) und HASHIMOTO (1991) an *Cryptomeria japonica*, MÄKINEN (1996) an *Pinus sylvestris* sowie ACHIM et al. (2006) an *Picea sitchensis* ergaben eine Zunahme des vertikalen Astwinkels mit dem Alter des Quirls. Nach JANKIEWICZ & STECKI (1976) vergrößert sich der Ansatzwinkel eines Astes im Laufe seines Lebens durch die Bildung von neuem Holzgewebe an Stamm und Ästen. So kommt es an der Oberseite des Astes bald zu einem Aufeinandertreffen des neu gebildeten Gewebes von Stamm und Ast, welches bewirkt, dass der Ast nach unten gedrückt wird. Des Weiteren ergeben sich Biegekräfte aus der Bildung von Reaktionsholz am Schnittpunkt von Ast- und Stammachse. Auch das Eigengewicht des Astes oder Belastungen durch externe Faktoren, wie zum Beispiel Schneee Auflagen können eine Veränderung des initialen Astansatzwinkels bewirken (BOZZUTO & WILSON (1988)). SONE et al. (2006) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass Einzeläste ihren Ansatzwinkel durch stärkere Förderung von Seitentrieben zuungunsten der des Längentriebs, Entwicklung eines negativ- geotropen Wachstumsverhaltens während des Streckungswachstums des Längentriebs oder Reaktionsholzbildung (vgl. auch FISHER & STEVENSON (1981)) verändern können. JANKIEWICZ & STECKI (1976) heben jedoch hervor, dass das negativ- geotrope Wachstumsverhalten von Ästen oft gänzlich durch geopinastisches Wachstumsverhalten, welches ein ausgeprägteres Dickenwachstum der Oberseite des Astes im Vergleich zu seiner Unterseite bezeichnet, neutralisiert wird. FISHER & STEVENSON (1981) konnten eine Zunahme des Astansatzwinkels mit zunehmendem Astalter bei vielen Baumarten feststellen, wohingegen BOZZUTO & WILSON (1988) keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Astalter und dem Astansatzwinkel bei *Acer rubrum* beobachten konnten.

COLIN & HOULLIER (1992) fanden bei *Picea abies* einen signifikanten Einfluss des Höhenzuwachses auf den Astansatzwinkel. Bei gleicher Höhe besaßen die untersuchten Bäume mit größerem Höhenwachstum steilere Äste. MEDHURST & BEADLE (2001) stellten einen positiven Zusammenhang zwischen dem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe und dem mittleren Astansatzwinkel bei *Eukalyptus nitens* fest. In Untersuchungen von MÄKINEN (1996) an *Pinus sylvestris* ließ sich indes ein negativer Zusammenhang zwischen dem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe und dem mittleren Astansatzwinkel feststellen.

Dicke Äste mit einem hohen Alter sind häufig mit einem steilen Astansatzwinkel assoziiert (vgl. z.B. BOZZUTO & WILSON (1988), GOCKEL (1994)). Der Astdurchmesser steht nach BOZZUTO & WILSON (1988) in einem positiven Zusammenhang mit der Biegefestigkeit des Astes gegenüber seinem Eigengewicht, aber auch mit der Menge an gebildetem Reaktionsholz, welche den Ast nach oben zieht. So schließen zum Beispiel MÄKINEN et al. (2003a) oder HEIN & SPIECKER (2007) den Astdurchmesser in ihr Modell zur Vorhersage des Astansatzwinkels ein.

1.2.5 ASTREINIGUNG

1.2.5.1 ASTMORTALITÄTSPROZESS

Je schneller die Phase der Astreinigung abgeschlossen ist, desto eher kann mit der zweiten Pflegephase, der Phase der Dimensionierung begonnen werden. Aus diesem Grunde ist in der forstlichen Praxis ein rascher und reibungsloser Astmortalitätsprozess der Äste bis zu der angestrebten Astansatzhöhe grundsätzlich erwünscht.

Mit ansteigendem Höhenwachstum des Baumes werden Äste in den untersten Kronenbereichen durch die über ihnen ansetzenden Äste oder Äste von Nachbarbäumen zunehmend beschattet. HENRIKSSON (2001) konnte zum Beispiel durch Beschattungsversuche von Einzelästen und ganzen Bäumen nachweisen, dass das Absterben von Ästen eher durch die individuelle Beschattungssituation auf Einzelastebene indiziert wird und weniger dadurch, wie sehr der gesamte Baum beschattet ist. Sobald ein Ast Lichtmangel erleidet, trägt dieser nur noch wenig oder gar nicht mehr zur Nettoprimärproduktion des Baumes bei (vgl. BURSCHEL & HUSS (1997)). Anders als bisweilen behauptet (z.B. von MITSCHERLICH & GADOW (1968)), konnten SPRUGEL et al. (1991) keine Hinweise in der Literatur finden, dass solche Äste weiterhin vom Baum mit Kohlenstoff versorgt werden, und somit als „Kohlenstoffparasiten“ (KRAMER (1986)) gelten können. Im Gegenteil scheinen diese Äste vollständig vom restlichen Baum isoliert zu werden, sobald ihr respiratorischer Verbrauch größer als die eigene Leistungsfähigkeit wird. Dieses Phänomen ist als „Astautonomie“ bekannt, welche von HENRIKSSON (2001) als Schutzmechanismus des Einzelbaumes gegenüber äußeren Einflüssen gedeutet wird: Zugunsten des gesamten Individuums werden in Stresssituationen einzelne Module geopfert.

Auf Einzelbaumebene kann der Astreinigungsprozess mit Hilfe eines multiplen linearen Modells zur Prognose der Kronenansatzhöhe zum Ausdruck gebracht werden (vgl. z.B. SPIECKER (1991), NUTTO

(1999), HEIN (2004), LANGSHAUSEN (2009)). Das Kronenansatzhöhenmodell von SPIECKER (1991) prognostiziert den Kronenansatz in Relation zur Baumhöhe mit den unabhängigen Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe. Hier wirken sich beide Parameterschätzer negativ auf die relative Kronenansatzhöhe aus; der Baum mit dem höchsten jährlichen Radialzuwachs besitzt bei gleichem Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe die längere Krone. Dabei verändert sich die Höhe des Kronenansatzes bei gleichem Radialzuwachs und Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe proportional zur Baumhöhe. NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) stellten signifikante Zusammenhänge zwischen Baumalter, Baumhöhe und Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe auf den Kronenansatz fest. Während die Baumhöhe und das Baumalter positiv auf den Regressanden einwirken (d.h. den Kronenansatz erhöhen), wirkt der Schaftdurchmesser negativ auf die Kronenansatzhöhe ein. Unter gleichen Bedingungen besitzt also der Baum mit dem höheren jährlichen Radialzuwachs die längere Krone. Umgekehrt und unter gleichen Bedingungen verschiebt sich der Kronenansatz auf besseren Standorten schneller nach oben, womit auch die Standortsabhängigkeit der Astreinigungsgeschwindigkeit akzentuiert wird.

Weitere Verfahren den Prozess der Astreinigung zu quantifizieren, finden sich zum Beispiel in MÄKINEN & COLIN (1999), MÄKINEN et al. (2003b), MÄKINEN et al. (2003a) und KINT et al. (2010), wo logistische Regressionsmodelle verwendet wurden, um die Wahrscheinlichkeit zu prognostizieren, einen lebenden Ast auf einer bestimmten Ansatzhöhe zu vorzufinden. Hier wurden statistisch signifikante Zusammenhänge mit einzelastbezogenen Variablen wie dem Astdurchmesser und der Astansatzhöhe und einzelbaumbezogenen Einflussvariablen wie der Baumhöhe als Proxy für die Baumentwicklungsphase und dem Radialzuwachs des Schaftes der vergangenen fünf Jahre festgestellt, wobei Astdurchmesser, Astansatzhöhe und der Radialzuwachs des Schaftes die Wahrscheinlichkeit des Aststatus' „lebend“ erhöhten. Dabei sank mit zunehmender Baumhöhe die Wahrscheinlichkeit, einen lebenden Ast auf einer bestimmten Astansatzhöhe vorzufinden.

Um unter Anderem auch die Astreinigungsdynamik modellieren zu können, wählten KELLOMÄKI & VÄISÄNEN (1988) einen Ansatz aus der Populationsökologie, wobei Sterbetafeln für die „Astpopulation“ von Kiefernbeständen unterschiedlicher Dichte entwickelt wurden. Auf Bestandesebene gesehen konnte jedoch nur ein sehr geringer Einfluss der Bestandesdichte auf die Mortalitätsraten von Ästen einer Population festgestellt werden.

Auf Astebene konnte z.B. MÄKINEN (1999b) den Astmortalitätsprozess nachvollziehen, indem er die Anzahl der vom Ast ausgebildeten Jahrringe in verschiedenen Entwicklungsphasen (Astbildung bis Einstellung des Dickenwachstums, Einstellung des Dickenwachstums bis Todeszeitpunkt, Todeszeitpunkt bis Überwallung) für *Pinus sylvestris* modellierte. Bei jedem dieser Modelle konnte ein signifikanter Einfluss des jeweils in dieser Zeit vorherrschenden durchschnittlichen Radialzuwachses des Stammes sowie ein Einfluss des jeweiligen H/D - Werts nachgewiesen werden.

1.2.6 ASTÜBERWALLUNGSDAUER UND INNERE ÄSTIGKEIT BEI NATÜRLICHER ASTREINIGUNG

1.2.6.1 ASTÜBERWALLUNGSDAUER

Nach dem Absterben des Astes wächst dieser als Totast in den ihn umgebenden Holzmantel ein und wird schlussendlich überwallt. Dieser Prozess hängt wiederum von einzelbaum- bzw. einzelastbezogenen Faktoren ab. Für die forstliche Praxis ist es dabei wichtig zu wissen, wie sich die Überwallungsdauer verkürzen bzw. der nach der Überwallung im Inneren des Schaftes vorhandene Radius des asthaltigen Kerns auf ein Minimum beschränken lässt.

Auf Einzelbaumebene kann dieser Prozess durch die Modellierung der astfreien Schaftlänge (auch: „Ansatzhöhe des untersten Totastes“) erfasst werden. Diese Art von Modellen prognostiziert den Astüberwallungsvorgang in longitudinaler Richtung. Als Regressoren wurden von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004), LANGSHAUSEN (2009) dieselben Einflussvariablen wie in den zuvor diskutierten Kronenansatzhöhenmodellen verwendet. Auch die Vorzeichenrichtung der Variablen ist dieselbe, weswegen hier auf eine ausführliche Diskussion verzichtet wird. Um den Astüberwallungsprozess nachzuvollziehen, prognostizierten KINT et al. (2010) den Totastanteil von Buchen und Eichen in Abhängigkeit der Baumhöhe, der Einzelbaumvitalität, des Schaftdurchmessers und der Bestandesdichte.

Auch auf Einzelastebene lässt sich die Astüberwallung untersuchen. Die Überwallungsdauer hängt dabei vom durchschnittlichen Radialzuwachs des Schaftes während der Überwallungszeit (vgl. z.B. KELLOMÄKI et al. (1989)) und vom Astdurchmesser wie auch vom Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns ab; zwei Dimensionen des Totastes, die vom Baum in tangentialer sowie radialer Richtung umschlossen werden müssen (vgl. z.B. HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007), HEIN (2008)). TAKEUCHI (1981) und PETRUNCINO et al. (1997) fanden ähnliche Zusammenhänge bei der

Überwallung künstlich geasteter Äste, wobei die vom umgebenden Holz in radialer Richtung zu umschließende Distanz die nach der Astung verbliebene Aststummellänge darstellt.

Der Radialzuwachs des Schaftes und die bei der künstlichen Astung verbleibende Aststummellänge können durch den Bewirtschafter aktiv gesteuert werden, der Astdurchmesser kann indirekt durch die Bestandesdichte beeinflusst werden. Der Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns, welcher bei natürlicher Astreinigung unweigerlich auftritt, kann entweder durch den Bewirtschafter verkürzt („Trockenastung“) oder sich selbst überlassen werden. Versuche von GELINSKY (1933) an Buche zeigten, dass die Kraft, die benötigt wird, um einen toten Ast abzurechen, vor allem von seinem Durchmesser, seinem Ansatzwinkel und dem Grad seiner Zersetzung abhängt. Dabei wird im Allgemeinen angenommen, dass die Überwallungsdauer in durchforsteten Beständen rascher verläuft, da Zersetzungsprozesse von Totästen durch den größeren Einfluss abiotischer Kräfte wie Wind, Schnee, Sonneneinstrahlung und Regen begünstigt werden (MÄKINEN (1999b)).

1.2.6.2 RADIUS DES ASTHALTIGEN KERNS

Nach der vollständigen Astüberwallung, wenn der Faserverlauf des Holzes wieder ungestört verlaufen kann, befindet sich im Inneren des Schaftes der asthaltige Kern, dessen Radius vor allem der späteren Ausbeute wegen von Bedeutung ist.

SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und NUTTO et al. (2005) zeigen Ansätze auf, die horizontale und vertikale Ausdehnung des asthaltigen Kerns des Baumschaftes mit Hilfe der auf Einzelbaumebene entwickelten Modelle zur Prognose der Ansatzhöhe des untersten Totastes zu bestimmen. Danach kann die Dimension des asthaltigen Kerns über das Dickenwachstum des Schaftes gesteuert werden, wobei die horizontale Ausdehnung des Radius des asthaltigen Kerns mit zunehmendem Radialzuwachs zunimmt.

Auch auf Einzelastebene ist eine Prognose des Radius des asthaltigen Kerns möglich (vgl. HEIN (2004), HEIN (2008)), wobei hier Astdurchmesser und Astansatzwinkel als Dimensionsparameter des überwachten Astes sowie der Radialzuwachs des Schaftes während der Lebenszeit des Astes Einfluss auf den Regressor nahmen. Dabei erwies sich bei allen drei Einflussfaktoren ein signifikanter positiver Einfluss auf den Radius des asthaltigen Kerns.

1.2.7 SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTEN VON BUCHE UND EICHE

1.2.7.1 SCHATTENTOLERANZ

Schattentoleranz bezeichnet die Fähigkeit einer bestimmten Spezies, geringe Lichtverhältnisse zu tolerieren (VALLADARES & NIINEMETS (2008)). Die Baumart Eiche gilt in der Jugend als mäßig, im Alter jedoch als sehr lichtbedürftig (ROLOFF (2001)). Die Baumart Buche hingegen ist über ihre gesamte Lebensspanne hinweg sehr schattentolerant und übertrifft damit die meisten mitteleuropäischen Baumarten mit Ausnahme der Eibe und der Tanne (ELLENBERG (1996)). Auch der Lichtbedarf ihrer Jungpflanzen ist verglichen mit Jungpflanzen von Eichen sehr viel geringer (HAGEMEIER (2002)).

Insbesondere sind es dabei physiologische Prozesse, die eine Baumart befähigen, im (Halb-)Schatten nicht nur zu überleben, sondern auch „Zuwachs zu schaffen“ (BURGER (1947), BURGER (1949-1950)). Die Buche kann schon bei geringen Lichtverhältnissen sehr effizient die einfallende Strahlung absorbieren (vgl. z.B. HAGEMEIER (2002), HANSEN et al. (2002), BONOSI (2006)). Gerade die Blätter der Schattenkrone besitzen eine hohe spezifische Absorptivität (BONOSI (2006)). Die Strahlungsabsorption der Eiche ist hingegen weniger effizient, dies gilt sowohl für die Licht- als auch für die Schattenkrone (vgl. z.B. HAGEMEIER (2002) oder HANSEN et al. (2002)). Der Blattflächenindex der Buche liegt im Vergleich zur Eiche auf einem hohen Niveau (HAGEMEIER (2002)). Zusätzlich vermag sie die relative Beleuchtungsstärke am Waldboden mit verhältnismäßig geringen Investitionen (hohe spezifische Absorptivität bei niedriger spezifischer Masse der Schattenblätter) mit Hilfe einer eher plagiotropen Ausrichtung ihrer Blätter zu verringern (HAGEMEIER (2002)). Diese Eigenschaft hilft der Buche, die photosynthetisch aktive Strahlung auf ein Niveau zu reduzieren, bei dem Konkurrenten nicht mehr existieren können (HAGEMEIER (2002)). Darin sehen TILMAN (1977), TILMAN (1988) und HAGEMEIER (2002) ihre Konkurrenzstärke gegenüber anderen Baumarten begründet.

1.2.7.2 ARCHITEKTURMODELL

Das Architekturmodell der Baumart Buche folgt dem Modell „TROLL“ (vgl. HALLÉ et al. (1978), ROLOFF (2001)). Alle Triebe einschließlich des Wipfeltriebs aber mit Ausnahme der Johannistriebe sind zuerst plagiotrop orientiert und richten sich erst sekundär auf. Dabei hängt nach ROLOFF (2001) der Zeitraum bis zum Aufrichten der Triebe primär von der Beschattung ab. Im Schatten aufwachsende Bäume können jahrzehntelang mit schirmartigen Zweigsystemen (HEMPEL et al. (1889)) im

Unterstand existieren, wo die Buche durch Vermeidung der Selbstbeschattung durch plagiotrope Blattanordnung (GIVNISH (1988)) trotzdem das noch einfallende Licht optimal ausnutzen kann. In vollem Licht dagegen richten sich die Wipfeltriebe schon in der ersten Vegetationsperiode auf (ROLOFF (2001)). Die große individuelle Plastizität dieses Architekturmodells dient dazu, sich den herrschenden Umweltbedingungen in Höhe und Kronenform bestmöglich anzupassen. Nach KING (1998) besitzen Bäume mit plagiotropen Astanordnungen auch flachere Blattanordnungen.

Das Architekturmodell der Eiche ist das Modell „RAUH“ (vgl. HALLÉ et al. (1978), ROLOFF (2001)), bei dem alle Triebe mehr oder weniger orthotrop orientiert sind und dennoch eine weitausgreifende Krone (vgl. u.a. HEMPEL et al. (1889), HARMER (1992)) bilden können. Volles Sonnenlicht lässt sich besser mit Hilfe aufrechter Triebe ausnutzen, was eine rasche Eroberung weiteren „Luftraums“ ermöglicht (ROLOFF (2001)). Bäume mit orthotropem Wachstum besitzen steile Äste, welche nach mehreren Seiten hin spiralig (GIVNISH (1988), ROLOFF (2001)) mit Blättern versehen sind und somit „dreidimensionaler“ als Äste von Bäumen mit plagiotropen Astanordnungen wirken (KING (1998)). Untersuchungen von BONOSI (2006) ergaben jedoch keine Unterschiede zwischen der Blatorientierung von *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus* und *Fraxinus excelsior*.

1.2.7.3 MORPHOGENETISCHER ZYKLUS

Bezüglich des morphogenetischen Zyklus unterscheiden sich beide Baumarten nicht. Sie zeigen ein „gebundenes“ Höhenwachstum, bei dem die Knospenanlage bereits im Vorjahr erfolgt. Im Juli sind so bereits alle Anlagen für den Laubaustrieb im nächsten Frühjahr vorhanden (ROLOFF (2001)). Das Höhenwachstum erfolgt bei beiden Baumarten schubweise nach dem so genannten „*Quercus* - Typ“; im Frühjahr streckt sich nur der im Vorjahr in der Knospe gebildete Trieb. Die Zeit des jährlichen Höhenzuwachses der Buche in Mitteleuropa erstreckt sich über etwa 30 Tage und kann somit bereits Ende Mai beendet sein (ROLOFF (2001)). KIENHOLZ (1941) beobachtete bei Jungpflanzen von *Fagus grandifolia* und *Quercus rubra* einen raschen jährlichen Höhenzuwachs beider Baumarten, bei dem innerhalb von 30 Tagen ein Anteil von 90% des gesamten jährlichen Höhenzuwachses geleistet werden kann.

1.2.7.4 HÖHENWACHSTUMSDYNAMIK UND REAKTIONSFÄHIGKEIT

Nach ASSMANN (1961) lässt sich aus dem Verlauf des Höhenwachstums auch auf individuelle Entwicklungsphasen besonders hoher beziehungsweise nachlassender Vitalität und damit auf die

Reaktionsfähigkeit gegenüber waldbaulichen Maßnahmen schließen. Bis zur Kulmination des Höhenwachstums ist die Reaktionsfähigkeit von Bäumen hoch und nimmt bei Überschreitung des Kulminationspunktes kontinuierlich ab.

Gemäß der Buchen- Ertragstafel nach SCHOBER (1993) weist die Baumart Buche als Schattbaumart eine eher langsame Höhenentwicklung in der Jugend auf (vgl. ASSMANN (1961)), deren Kulmination etwa um das Alter 45 eintritt. Auf Durchforstungsmaßnahmen reagiert die Buche bis in ein hohes Alter hinein stark (vgl. ASSMANN (1961), BURSCHEL & HUSS (1997)).

Die Eiche als Lichtbaumart besitzt ausweislich der Eichen- Ertragstafel nach JÜTTNER (1993) ein rasches Höhenwachstum in der Jugend (vgl. ASSMANN (1961)), welches auf guten Standorten schon bei einem Alter von 25 - 30 Jahren kulminieren kann. In der Jugendphase reagieren Eichen stark auf Durchforstungen, was aber mit zunehmendem Alter deutlich nachlässt.

1.2.7.5 REITERATIONEN UND KURZTRIEBE

Beide Baumarten sind zu Reiterationen der verschiedensten Formen befähigt (ROLOFF (2001)); die Buche wird jedoch von ROLOFF (2001) als „reiterationsträge“ bezeichnet. Sie reagiert primär durch Triebblängenmodifikationen auf Umwelteinflüsse.

Die Eiche hingegen kann als „reiterationsfreudig“ bezeichnet werden (ROLOFF (2001)). Schlafende Knospen befinden sich in großer Zahl an jeder Triebbasisnarbe und im basalen Johannistriebbereich (ebenda). Bei plötzlichem Lichteinfall treiben diese sofort aus. Johannistriebe werden von der Baumart Eiche sehr häufig gebildet (vgl. z.B. HARMER (1989)), wohingegen Johannistriebe bei der Baumart Buche nur bei jungen Bäumen und ausschließlich unter günstigen Bedingungen wie zum Beispiel hohem Lichtgenuss durch Pflanzung auf der Freifläche (vgl. ROLOFF (1985), ROLOFF (2001)) gebildet werden.

Nach ROLOFF (2001) besitzt eine Baumart umso mehr Konkurrenzkraft, je länger ihre seitlichen Kronenbereiche durch Kurztriebbildung in einem Wartzustand verharren können. Wenn eine Baumkrone in Konkurrenz mit der des Nachbarn tritt, gibt es für die von da an beschatteten Äste des unteren Kronenbereichs nur dann eine Überlebenschance, wenn ihr Wachstum stagnieren kann, da bei weiterer Langtriebbildung die Triebe alsbald aufgrund mechanischer Beschädigungen absterben würden (ebenda). Während die Buche mit durchschnittlich 15 Jahren die längste Lebensdauer von Kurztrieben

mitteleuropäischer Hauptbaumarten besitzt, leben die Kurztriebe der Eiche im Mittel lediglich 4 Jahre (ebenda).

1.2.7.6 VERÄNDERUNGEN DER BAUM- UND KRONENGESTALT

Der morphologische Bauplan einer Baumart, von GRUBER (1992) als „idealer Phänotyp“ bezeichnet, kann unter definierten Umweltbedingungen anhand seiner spezifischen Bauelemente und deren Eigenschaften festgelegt werden. Dieser bestimmt die Baumgestalt nach deren Architekturmodell, dem Ausmaß ihrer apikalen Kontrolle und apikalen Dominanz, der spezifischen Ausprägung des negativen Geotropismus, der Allokation des sekundären Dickenwachstums an Stamm und Ästen sowie der Art und zeitlichen Entwicklung von Degeneration und Alterung (WEINREICH (2000)).

Jedoch ist der „ideale Phänotyp“ in der Realität nur schwer auffindbar, da er ständig durch die Einwirkung exogener Faktoren (auch anthropogen durch verschiedene Bewirtschaftungsregime herbeigeführt (vgl. CHAMBEL et al. (2005))) oder Beschädigung zum „realen Phänotyp“ modifiziert werden muss (WEINREICH (2000)). Das Ausmaß dieser Modifikationen wird im Allgemeinen als Plastizität bezeichnet und war Gegenstand vieler Untersuchungen.

So wird schattentoleranten Baumarten im Vergleich zu lichtbedürftigen Baumarten in Untersuchungen von CANHAM (1988) an *Acer saccharum* und *Fagus grandifolia*, und DELAGRANGE et al. (2004) an *Acer saccharum* und *Betula alleghaniensis* unter Konkurrenzdruck eine hohe morphologische Plastizität bescheinigt, während sich in Untersuchungen von OSADA et al. (2004) an *Fagus crenata* und *Quercus crispula* die Letztere, eher lichtbedürftigere Baumart als die morphologisch Plastischere erwies. Dies korrespondiert mit den Untersuchungsergebnissen von SIPE & BAZZAZ (1994) an *Acer pensylvanicum*, *Acer rubrum* und *Acer saccharum*, MESSIER & NIKINMAA (2000) an *Fagus grandifolia*, *Acer saccharum* und *Betula alleghaniensis* und BONOSI (2006) an *Fraxinus excelsior*, *Acer platanoides* und *Fagus sylvatica*.

Demgegenüber stehen zum Beispiel Untersuchungen von CHEN et al. (1996) an *Pinus contorta* und *Pseudotsuga menziesii* oder MOURELLE et al. (2001) an *Acer saccharum*, *Prunus serotina*, *Fagus grandifolia*, *Quercus rubra*, *Juglans nigra* und *Populus grandidentata*, in denen deutlich wurde, dass die jeweils schattentolerantere Art eine äußerst ausgeprägte laterale Plastizität besaß und unter Konkurrenzdruck „von einer vertikalen zu einer horizontalen Wuchsform wechseln“ (MOURELLE et al. (2001)) könne. DIELER & PRETZSCH (2010) stellten bei der Untersuchung von Buchenkronen in

Rein- und Mischbeständen eine große Variabilität in der vertikalen und horizontalen Kronengestalt, die auf vorherrschende Wuchs- und Konkurrenzsituationen flexibel angepasst werden kann, fest. Auch Untersuchungen von KUNSTLER et al. (2005) an *Fagus sylvatica* und *Quercus pubescens* bestätigten eine hohe morphologische Plastizität der Buche im Vergleich zur Eiche bei geringen Lichtverhältnissen. Dies steht im Einklang mit der Hypothese von MESSIER et al. (1999): Einer der Hauptfaktoren, warum schattentolerante Baumarten über lange Zeiträume unter geringen Lichtverhältnissen wie zum Beispiel bei Überschirmung überleben können, ist, dass sie dazu befähigt sind, ihr Höhenwachstum fast einzustellen, um somit ein günstiges Verhältnis von photosynthetischem und nicht - photosynthetischem Gewebe aufrecht zu erhalten („sit- and- wait- strategy“). BEAUDET & MESSIER (1998) konnten indes keinen klaren Zusammenhang zwischen artspezifischer Schattentoleranz und lichtinduzierter morphologischer Plastizität bei *Betula alleghaniensis*, *Acer saccharum* und *Fagus grandifolia* feststellen.

Um die Plastizität von Baumarten in den Tropen schätzen und damit auf ihre Schattentoleranz (plastisch= schattentolerant) schließen zu können, wurde von DAWKINS (1963) das jeweilige Kronenausladungsverhältnis¹ für unterschiedliche Schaftdurchmesser bestimmt. Baumarten, welche bei gleichem Schaftdurchmesser ein geringeres Kronenausladungsverhältnis besaßen, wurden als schattentolerant identifiziert. Baumarten mit einem in Abhängigkeit vom Schaftdurchmesser stark variierenden Kronenausladungsverhältnis wurden desgleichen als plastisch und somit schattentolerant klassifiziert. Von HEMERY et al. (2005) wurde diese Methode auf Daten mitteleuropäischer Baumarten mit bekannter Schattentoleranz angewandt. Obwohl eine breite Spreitung unterschiedlich schattentoleranter Baumarten verschiedener Durchmesserklassen untersucht wurde, konnte die Zuverlässigkeit dieser Methode zur Bestimmung der jeweiligen Schattentoleranz weder bestätigt noch abgelehnt werden.

1.2.7.7 CHARAKTER MORPHOLOGISCHER ANPASSUNGEN AN UNTERSCHIEDLICHE LICHTVERHÄLTNISSE

Die Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse erfolgt durch die Ausbildung unterschiedlicher Kronenformen. Dabei existieren zwei theoretische „Extremformen“:

¹ Kronenausladungsverhältnis= Kronenbreite [m]/ Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe [m] (vgl. ASSMANN, 1961)

- **Anpassung an hohe Lichteinstrahlungen:** Ausbildung von dichten, schmalen Kronen, in denen sich die kleinen Blätter auch durchaus überlappen können (CORNELISSEN (1993)) und die durch viele kurze laterale Achsen charakterisiert sind. Diese Kronenform ist mechanisch effizienter und weist ein gutes Verhältnis zwischen Lichtaufnahmekapazität und den Investitionskosten in nichtphotosynthetisches Material auf (GIVNISH (1988)). Ein reduziertes laterales Wachstum durch erhöhte Apikaldominanz zugunsten des Höhenwachstums wird als ein Charakteristikum von lichtbedürftigen Baumarten angesehen (vgl. CHEN et al. (1996), MESSIER et al. (1999)).
- **Anpassungen an Schwachlichtbedingungen:** Ausbildung von breiten Kronen, in denen die Überlappung der Blätter minimiert wird. Die Lichtaufnahme wird durch offene, spärlich verzweigte Kronen mit großen Blättern maximiert (vgl. GIVNISH (1988); CORNELISSEN (1993)). Schattbaumarten neigen im Gegensatz zu Lichtbaumarten dazu, zunächst das laterale Wachstum zu Ungunsten des Höhenwachstums zu forcieren, was die Selbstbeschattung minimiert (vgl. CHEN et al. (1996), MESSIER et al. (1999)). Besagtes wird von BONOSI (2006) bei Untersuchungen an *Fagus sylvatica* im Vergleich zu *Fraxinus excelsior* und *Acer pseudoplatanus* bestätigt.

1.2.7.8 ONTOGENETISCHE UND ALLOMETRISCHE MODIFIKATIONEN

Unabhängig vom Lichteinfluss kann sich der Lichtbedarf sowie die phänotypische Ausprägung einer Baumart auch ontogenetisch mit ihrem Alter verändern (BORCHERT & TOMLINSON (1984)). So verliert sich die Fähigkeit zur Plastizität mit zunehmendem Alter (MESSIER & NIKINMAA (2000)), wobei sich jedoch auch die Lichtansprüche verändern: ältere Bäume sind meist lichtbedürftiger als Jungpflanzen der gleichen Art (GIVNISH (1988)).

HALLÉ & NG (1981) berichten bei Ihrer Untersuchung über Dipterocarpen von Modifikationen der Astarchitektur mit zunehmendem Alter in einem solchen Ausmaße, dass von einem Wechsel des Architekturmodells gesprochen werden kann. Es scheint, als ob im Laufe eines Pflanzenlebens unterschiedliche morphologische Strukturen benötigt werden (FARNSWORTH & NIKLAS (1995)). BONSER & AARSSSEN (1994) weisen darauf hin, dass unabhängig von der angesprochenen ontogenetischen Veränderung der Baumgestalt auch eine allometrische Veränderung mit zunehmender Größe existiert. Dies geschieht aufgrund sich verändernder Proportionen infolge verschiedener

Wachstumsgeschwindigkeiten während der Ontogenese. Junge Bäume können deswegen nicht einfach nur als Miniaturversionen älterer Bäume erachtet werden (BONSER & AARSSSEN (1994)).

1.2.7.9 HOLZANATOMIE UND WASSERLEITUNG

Die Anatomie des Holzes bestimmt letztlich über die Charakteristik des axialen Wasserstroms. Auch hier finden sich wichtige Unterscheidungsmerkmale zwischen den beiden Baumarten Buche und Eiche.

Das Holz der Buche gehört dem primitiven Angiospermen - Typ an, welcher sich durch zerstreut - mikropor liegende Gefäße auszeichnet. Diese sind weitgehend gleichmäßig über den Jahrring verteilt, annähernd gleich groß und nicht über 100 μ weit. Die Tracheiden des Grundgewebes verknüpfen die Gefäßsysteme über die Jahrringgrenzen (BRAUN (1963)). Dabei können bei der Buche die Jahrringe der letzten zehn Jahre an der Wasserleitung beteiligt sein, dies jedoch bei einer geringen Leitgeschwindigkeit von etwa 1 bis 6 m/h (DENFFER & STRASBURGER (1983)). So berichtet GELINSKY (1933) in seiner Arbeit zur Astreinigung der Buche von bis zu fünf ausfallenden Jahrringen an den von ihm untersuchten Ästen. Offensichtlich ist die kontinuierliche Jahrringbildung von Buchenästen nicht überlebensnotwendig, da in den verbleibenden Jahrringen immer noch ein gewisser Wassertransport stattfinden kann. Auch wenn Embolien durch spätwinterliche Frostereignisse auftreten, ist es der Buche mit ihrer zerstreutporigen Holzanatomie möglich, die hydraulische Leitfähigkeit des Xylems vor allem durch den Wurzeldruck wieder herzustellen (vgl. SPERRY et al. (1994), COCHARD et al. (2001)).

Im ringporigen Holz der Eiche hingegen befinden sich mit über 100 μ sehr weite Gefäße, welche indes auf das Frühholz beschränkt sind. Im Spätholz herrschen hingegen faserförmige Tracheiden und englumige Holzfasern vor (DENFFER & STRASBURGER (1983)). Die Wasserleitung im ringporigen Holz kann eine hohe Geschwindigkeit erreichen und wird von DENFFER & STRASBURGER (1983) mit 4 bis 44 m/h angegeben. Dies wird jedoch durch einen frühen Funktionsausfall der Gefäße erkauft (DENFFER & STRASBURGER (1983)), denn durch spätwinterliche Frostereignisse kommt es zu Embolien in den Frühholzgefäßen (vgl. COCHARD & TYREE (1990), HACKE & SAUTER (1996), BARBAROUX & BREDA (2002)), was letztendlich zur Funktionsunfähigkeit der Gefäße führt (DENFFER & STRASBURGER (1983)). Oft genügt dafür ein einziges Frostereignis (COCHARD et al. (2001)). Im nächsten Frühjahr reicht der Wurzeldruck der Eiche nicht mehr aus, um die funktionsfähig gebliebenen, weitlumigen Gefäße erneut mit Wasser zu füllen (BLANK (1997)). Gleichwohl sind es hauptsächlich die im laufenden Jahr frisch angelegten Gefäße, die den apikalen Wassertransport durch

den Stamm gewährleisten (vgl. COCHARD & TYREE (1990), SPERRY et al. (1994)). Radiale Wasserverschiebungen zwischen den Jahrringen spielen im Vergleich zu Baumarten mit zerstreutporigem Holz nur eine untergeordnete Rolle (LÖSCH (2003)). Somit führen bei ringporigen Baumarten schon die vorjährigen Jahrringe in der Regel nur noch in ihren englumigen Spätholzgefäßen Wasser. Bei der Eiche pflegt selbst der Spätholzteil bereits im dritten Jahr für die Wasserleitung auszufallen (LÖSCH (2003)). Um die Wasserleitung zu Beginn der Vegetationsperiode gewährleisten zu können, ist bei der Eiche deswegen eine vor Laubaustrieb beginnende Bildung von Frühholzgefäßen notwendig (ASSMANN (1961)). BARBAROUX & BREDA (2002) geben an, dass das Dickenwachstum bei jungen Eichen etwa 10 Tage vor Laubaustrieb beginnt und folglich 30% des jährlichen Dickenzuwachses vor Laubaustrieb geleistet werden (vgl. auch HÖLL (1997), BARBAROUX & BREDA (2002)). Die Eiche ist dafür auf die bisher eingelagerten Speicherstoffe im Splintholz angewiesen, welche sich in den äußersten 8-10 Jahrringen des Holzes befinden (BARBAROUX & BREDA (2002)). So weist HANECA (2005) in seinen Untersuchungen darauf hin, dass in der Literatur bislang noch nie über das Auftreten ausfallender Jahrringe in Eichenholz berichtet wurde. Auch HUBER et al. (1965) erklären, dass sich unter mehr als 100.000 von ihnen vermessenen Jahrringen an Eichenholz noch nie ein Jahrringausfall gezeigt hat. LÖHR (1969) berichtet jedoch von nur teilweise ausgebildeten Jahrringen an extrem unterdrückten Eichen, welche sich kurz vor dem Absterben befinden. Diese Aussagen beziehen sich jedoch nur auf Untersuchungen an Stammscheiben der Eiche.

Die kleinen Gefäße der Buche sind weniger anfällig für frostinduzierte Embolien, weswegen die Reaktivierung des Wachstums im Frühjahr weniger von den gespeicherten Energiereserven abhängig ist, die von der Baumart Buche im gesamten Holzkörper eingelagert werden können. Der Wassertransport ist - wenn auch eingeschränkt - sofort möglich, wenn das Laub austreibt (BARBAROUX & BREDA (2002)).

1.2.7.10 ZERSETZUNG Toter ÄSTE

Die Untersuchungsergebnisse von BUTIN & KOWALSKI (1983a, b) zur natürlichen Astreinigung und ihren biologischen Voraussetzungen zeigen unterschiedliche Charakteristiken in der Zersetzung abgestorbenen Astmaterials bei Buche und Eiche auf.

Die natürliche Astreinigung der Baumart Buche verläuft „fast problemlos und unbemerkt“ (BUTIN & KOWALSKI (1983b)). Dabei bricht der von Pilzen zersetzte Ast unabhängig von seinem

Durchmesser besonders leicht unmittelbar an der an der Astbasis ab und hinterlässt einen muschelbruchartigen oder glatten Abbruch. Von MAYER-WEGELIN (1929) wird der Zeitraum vom Mortalitätsereignis bis zum vollständigen Abfallen eines Buchenastes mit 1-5 Jahren beziffert, GELINSKY (1933) gibt dafür für Äste mit einem Durchmesser von bis zu 3 Zentimetern eine Zeit von 4 bis 9 Jahren an.

Demgegenüber spielt der Astdurchmesser bei der Baumart Eiche eine entscheidendere Rolle. Dünne Äste bis zu einem Durchmesser von 0,5 bis 2 Zentimetern werden durch eine den ganzen Ast erfassende Weißfäule zersetzt, was zur Folge hat, dass der Ast von der Basis bis zur Spitze an jeder beliebigen Stelle angebrochen werden kann (BUTIN & KOWALSKI (1983a)). Mit zunehmendem Astalter und damit auch Astdurchmesser beginnen die Äste zu verkernen, was eine Zersetzung erschwert. Äste mit einem Durchmesser von 2 bis 4 Zentimetern brechen zunächst an der Astspitze ab; in der Folge verbleiben bis zu einem Meter lange „Astruinen“ am Stamm haften und beginnen einzuwachsen (ebenda). Fällt der Ast schließlich ab, hinterlässt er am Stamm ein Astloch, welches nur langsam überwältigt werden kann (ebenda). Starke Äste älterer Bäume zersetzen sich aufgrund ihres hohen Kernholzanteils nur noch sehr langsam. Am langsamsten verläuft der Vermorschungsprozess dabei an der Astbasis, wo das Kernholz besonders stark ausgebildet ist (ebenda). In der Folge brechen von der Astspitze her immer wieder Teile des Astes ab, bis die Zersetzung langsam auch die Astbasis erreicht hat (ebenda). Dementsprechend lange dauert es, bis ein solcher Ast vom umgebenden Holz überwältigt wird. Die Überwallung in tangentialer Richtung jedoch, welche nur den Astquerschnitt umschließt, kann, wie Grünastungsversuche von HOCHBICHLER et al. (1990) zeigen, bei der Baumart Eiche in Abhängigkeit vom Astdurchmesser innerhalb eines Zeitrahmens von 2 bis 5 Jahren abgeschlossen sein.

1.2.7.11 EINFLÜSSE BAUMARTENSPEZIFISCHER EIGENSCHAFTEN AUF WACHSTUM UND HOLZQUALITÄTSRELEVANTE MERKMALE

In diesem Kapitel sollen Eigenschaften von Licht- und Schattbaumarten hinsichtlich bewirtschaftungsrelevanter Gesichtspunkte zusammengestellt werden. Wo dezidierte Untersuchungen zu wachstumsbezogenen Unterschieden von Buchen und Eichen vorgenommen wurden, wird dies beschrieben; ansonsten wird allgemein auf bewirtschaftungsrelevante Unterschiede von Licht- und Schattbaumarten eingegangen.

1.2.7.11.1 HÖHENWACHSTUMSDYNAMIK

Informationen bezüglich der unterschiedlichen Höhenwachstumsdynamik von Buche und Eiche lassen sich den zahlreichen Publikationen über Begründung und Bewirtschaftung (gleichaltriger) Buchen-Eichen- Mischbestände entnehmen (z.B. KIBLING (1895), SCHWAPPACH (1916), BONNEMANN (1956), von LÜPKE (1987), FREIST-DORR (1992a, b)). Nach der Ertragstafel für einen Eichen – Buchen - Mischbestand erster Ertragsklasse, welche von WIEDEMANN (1949) aufgestellt wurde, holt die Höhe der schattentoleranten Buche die der lichtbedürftigen Eiche erst in einem Alter von 180 Jahren auf. KRAMER (1988) kritisiert dabei, dass diese Ertragstafel kein allgemeingültiges Behandlungsmodell darstellen kann, da auf den Flächen, deren Daten dieser Tafel zugrunde lagen, die vorwüchsigen Buchen entfernt wurden. Unter für die Buche günstigem, eher ozeanischem Klimaeinfluss² ist sie als Schattbaumart der Eiche im Höhenwachstum zwar zunächst mit jeweils 2 bis 3 Metern Höhenunterschied im gleichen Alter unterlegen (vgl. z.B. auch MARKS (1975)), holt dann jedoch zunehmend auf und beginnt die Eiche bereits ab einem Alter von 50 - 60 Jahren zu überwachsen (vgl. von LÜPKE (1987), KRAMER (1988)). Nach KRAMER (1988) müssen deswegen im Mischbestand schon frühzeitig Maßnahmen eingeleitet werden, um die unterlegenen Eichen zu fördern.

1.2.7.11.2 KRONENKENNGRÖSSEN UND DARAUS ABGELEITETE BEHANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Von HEMERY et al. (2005) konnten für die Baumart Eiche über eine Schaftdurchmesserspanne von 10cm bis 80cm ein immer etwas höheres Ausladungsverhältnis als für die Baumart Buche beobachtet werden. Bei Erreichung eines definierten Zieldurchmessers wird deswegen der Eiche von HEMERY et al. (2005) eine im Vergleich zur Buche etwas größere Standfläche zugewiesen. Diese Kalkulation beruht ausschließlich auf der Beziehung

Kronendurchmesser = f(Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe).

SPIECKER (1991), NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) kalkulierten ausgehend von der Beziehung

² Zur Kennzeichnung des Klimaeinflusses auf das Konkurrenzverhältnis von Buche und Eiche schlägt ELLENBERG, 1996 den Quotient aus dem 1000- fachen Wert der mittleren Juli - Lufttemperatur und dem Jahresniederschlag vor. Werte von unter 30 weisen auf eine höhere Konkurrenzkraft der Buche hin (von LÜPKE (1987)).

Kronendurchmesser = f(Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe, Baumalter, Baumhöhe³)

die Anzahl der Ausleseebäume je Hektar von Buche (LANGSHAUSEN (2009)) und Eiche (SPIECKER (1991), NUTTO (1999)) für unterschiedliche Zieldurchmesser und verschiedene Umtriebszeitszenarien sowie die Anzahl der jeweils zu entnehmenden Bedränger. Das Ergebnis des Vergleichs der Kronenbreitenmodelle dieser Arbeiten für Buche und Eiche steht im Einklang mit den Ergebnissen von HEMERY et al. (2005). So kalkuliert SPIECKER (1991) für die Baumart Eiche bei einem Alter von 100 Jahren und einem jährlichen Radialzuwachs von $ir_{1,3} = 1,5\text{mm}$ eine maximale Baumzahl von 361 Bäumen je Hektar, während LANGSHAUSEN (2009) für die Baumart Buche bei gleichen Voraussetzungen eine Baumanzahl von etwa 550 Bäumen je Hektar unter mittleren Standortsbedingungen berechnet. Allerdings wird hier von SPIECKER (1991) ein Überschirmungsgrad von 70%, bei LANGSHAUSEN (2009) ein Überschirmungsgrad von 80% angenommen.

UHL et al. (2006) konnten in ihren Untersuchungen eine höhere Kroneneffizienz⁴ solitärer Eichen im Vergleich zu solitären Buchen gleichen Brusthöhendurchmessers feststellen. Im Umkehrschluss dieses Ergebnisses kann also angenommen werden, dass Solitäre der Baumart Eiche bei gleicher Kronenprojektionsfläche einen höheren jährlichen Radialzuwachs zu leisten vermögen als Solitäre der Baumart Buche.

1.2.7.11.3 KRONEN- UND ASTARCHITEKTUR

Bezüglich ast- und kronenarchitektonischer Charakteristiken von Licht- und Schattbaumarten konnten in der Literatur vor allem Unterschiede in Astanzahl und Astdichte festgestellt werden. Die Astdichte bezeichnet die Anzahl der Äste erster Ordnung je Längeneinheit (MOURELLE et al. (2001)). Bei Untersuchungen an *Acer saccharum*, *Prunus serotina*, *Fagus grandifolia*, *Quercus rubra*, *Juglans nigra* und *Populus grandidentata* konnten MOURELLE et al. (2001) darstellen, dass schattentolerantere Baumarten unter gleichen Bedingungen eine vergleichsweise höhere Astdichte besaßen als lichtbedürftigere Baumarten. Dies konnte von BONOSI (2006) bei Untersuchungen an *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus* und *Fraxinus excelsior* bestätigt werden, jedoch nicht von DELAGRANGE et al. (2004) an *Acer saccharum* und *Betula alleghaniensis*, welche höhere Astdichten bei der lichtbedürftigen Birkenart fanden. Im Vergleich von früh- und spätsukzessionalen Baumarten in

³ Nur in LANGSHAUSEN (2009)

⁴ Die Kroneneffizienz ist definiert als der Grundflächenzuwachs [cm^2], der pro m^2 Kronenprojektionsfläche geleistet wird.

Nordost-Indien zeigten SHUKLA & RAMAKRISHNAN (1986), dass die Äste von Schattbaumarten im Mittel dichter am Stamm angeordnet sind als die Äste frühsukzessionaler Baumarten. SIPE & BAZZAZ (1994) stellten bei ihren Untersuchungen an drei unterschiedlich schattentoleranten Ahornarten fest, dass die schattentoleranteste Art auch immer die höchste Gesamtanzahl an Ästen besaß. HARMER (1989) stellt in seinen Untersuchungen die ausgeprägte Apikaldominanz der Gipfelknospe von *Quercus petraea* heraus, welche die Astentwicklung von nur wenigen lateralen Knospen zulässt. Der Einfluss dieser Dominanz auf die Bildung von Ästen aus Seitenknospen ist jedoch auch von der Jahreszeit abhängig (HARMER (1992)). Im Sommer weisen die Gipfeltriebe von *Quercus petraea* die höchste Apikaldominanz auf und unterdrücken somit die Bildung von Seitenästen aus den neu gebildeten Knospen. Im Frühjahr ist diese Apikaldominanz jedoch weniger stark ausgeprägt. Überwinternde Knospen können nun austreiben, was zu der Entwicklung von verzweigten Trieben führt, welche keinen eindeutigen Gipfeltrieb aufweisen (HARMER (1992)).

1.2.7.11.4 ASTREINIGUNGSPROZESS

Dezidierte Vergleiche zum Astreinigungsprozess von Licht- versus Schattbaumarten, beziehungsweise von Buchen versus Eichen wurden bislang nur selten veröffentlicht. Die für Eiche (NUTTO (1999)) und Buche (LANGSHAUSEN (2009)) parametrisierten Kronenansatzmodelle respektive die Modelle zur Prognose der Ansatzhöhe des untersten Totastes weisen dieselben Einflussvariablen auf und bieten sich daher zum Vergleich an.

<i>Kronenansatzhöhe [m]</i>		
	LANGSHAUSEN (2009), Buche	NUTTO (1999), Eiche
(Konstante)	-2,93	-0,96
Baumhöhe [m]	0,509	0,737
Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	-0,097	-0,247
Baumalter [Jahre]	0,035	0,064
<i>Ansatzhöhe des untersten Totastes [m]</i>		
	LANGSHAUSEN (2009), Buche	NUTTO (1999), Eiche
(Konstante)	-3,808	-2,27
Baumhöhe [m]	0,563	0,29
Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	-0,102	-0,149
Baumalter [Jahre]	0,031	0,166

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Parameterschätzer der Kronenansatzhöhenmodelle sowie der Modelle zur Schätzung der astfreien Schaftlänge von LANGSHAUSEN (2009) (Buche) und NUTTO (1999) (Eiche)

Einschränkend ist jedoch zu sagen, dass sich die Gültigkeitsbereiche der Modelle beider Autoren stark unterscheiden. Während die Modelle von LANGSHAUSEN (2009) für eine sehr breite Spreitung an Entwicklungsphasen der Buche von Jungbeständen bis hin zu fast 200-jährigen Beständen parametrisiert wurden, basieren die Modelle von NUTTO (1999) ausschließlich auf Daten, die nur die Entwicklung von Eichenbeständen ab einem Baumalter von 12 Jahren bis zum Abschluss der Astreinigungphase mit einem Baumalter von etwa 50 Jahren abdecken.

Auf einem Standort der Ertragsklasse $dGz_{100} = 8 \text{ Vfm/ha/a}$ wird nach den Ertragstafeln (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993)) eine Höhe von 20m in etwa 50 (Buche) bzw. 40 (Eiche) Jahren erreicht. Bei Unterstellung eines durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses von 2,5mm besitzt die Baumart Buche nach dem von LANGSHAUSEN (2009) parametrisierten Modell mit etwa 6,5 Metern eine deutlich niedriger ansetzende Krone als die Baumart Eiche, die nach dem Modell von NUTTO (1999) eine Kronenansatzhöhe von 11,4 Metern aufweist. Auch KINT et al. (2010), welche den Astreinigungsprozess von Buche und Eiche mit Hilfe von logistischen Regressionsmodellen zur Prognose des „Aststatus“ nachvollzogen, stellten fest, dass die Wahrscheinlichkeit bei der Baumart Eiche, unter sonst gleichen Bedingungen einen lebenden Ast auf einer Astansatzhöhe von 6 Metern vorzufinden, mit zunehmender Baumhöhenentwicklung rapide absinkt und ab einer Baumhöhe von etwa 18 Metern gegen Null strebt, wohingegen das Modell für die Baumart Buche auch bei Baumhöhen über 18 Metern noch hohe Wahrscheinlichkeiten prognostizierte, einen lebenden Ast unter gleichen Voraussetzungen zu finden. Dies entspricht den zuvor diskutierten unterschiedlichen Lichtansprüchen beider Baumarten.

KINT et al. (2010) verwendeten den Totastanteil von Buchen und Eichen in Abhängigkeit der Baumhöhe, der Einzelbaumvitalität, des Schaftdurchmessers und der Bestandesdichte um den Astüberwallungsprozess auf Einzelbaumebene nachzuvollziehen. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Totastanteil mit zunehmender Baumhöhe bei der Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche mit rapiderer Geschwindigkeit ansteigt. In dieser Untersuchung liegt die astfreie Schaftlänge der Baumart Eiche unter gleichen Bedingungen unter der der Baumart Buche. Dies steht im Einklang mit den zuvor diskutierten Eigenschaften beider Baumarten vor allem bezüglich der Holzzersetzung.

Setzt man jedoch die oben genannten Werte in die von NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) parametrisierten Modelle ein, wird unter gleichen Bedingungen ein längerer astfreier Schaft für die Baumart Eiche prognostiziert.

1.3 ZIELSETZUNG

In dieser Arbeit sollen Baumgestalt, Astarchitektur und Astreinigungsprozesse der schattentoleranten Buche und der lichtbedürftigen Eiche in Abhängigkeit vom Dickenwachstum untersucht werden. Dabei soll das Entwicklungsstadium der Astreinigungsphase möglichst vollständig abgedeckt werden. Der diese Arbeit gänzlich umfassende Kontext ist dabei die Produktion von wertvollem Holz. Durch möglichst einfache und leicht zu interpretierende baumartenspezifische waldwachstumskundliche Modelle sollen relevante Einflussvariablen, welche auf Baumgestalt, Astarchitektur, Astmortalitätsprozess sowie Astüberwallung und innere Ästigkeit einwirken, auf Einzelbaum- wie auf Einzelastebene herausgefiltert und quantifiziert werden. Auf Grundlage dieser entwickelten Modelle sollen die Baumarten Buche und Eiche kontrastiert werden.

Zunächst werden einzelbaumbezogene Wachstumsmodelle zur orientierenden Beschreibung der Baumgestalt als integrierende Einheit der ihr zugehörigen Module und deren Entwicklung erstellt werden. Dabei wird die Modellierung folgender Zielgrößen angestrebt:

- Baumhöhe
- Kronendurchmesser
- Astanzahl

Ausgehend von den Modellen zur Beschreibung der Baumgestalt soll der Fokus auf die kleinste Informationseinheit dieser Arbeit, den Ast, verengt werden. Einzelastbezogene Modelle sollen Informationen zur Astarchitektur liefern. Dabei wird die Modellierung folgender Zielgrößen angestrebt:

- Astlänge
- Astdurchmesser
- Astradialzuwachs
- Astansatzwinkel

Der Prozess der Astreinigung soll mit Hilfe von einzelbaum- sowie einzelastbezogenen Modellen nachvollzogen werden.

Einzelbaumbezogene Modelle sollen Informationen über den vertikalen Verlauf der Astmortalität liefern. Ein Teilziel dieser Arbeit ist dabei die Modellierung der

- Kronenansatzhöhe

Auf Einzelastebene kann der Prozess Astmortalität noch genauer verfolgt werden. Dafür sollen Modelle zur Prognose des

- Aststatus („lebend“/ „tot“)

erstellt werden.

Als Letztes soll die Astüberwallung und innere Ästigkeit modelliert werden. Auf Einzelbaumebene soll der Prozess der Überwallung mit Hilfe eines Modells zur Vorhersage der

- astfreien Schaftlänge

erfasst werden.

Auf Einzelastebene sollen Modelle zur Vorhersage

- der Astüberwallungsdauer
- der Astüberwallungswahrscheinlichkeit und
- des Radius des asthaltigen Kerns

erstellt werden.

Der Baumartenvergleich wird anhand der entwickelten Modelle durchgeführt. Baumartenspezifische Unterschiede werden aufgezeigt und vor dem Hintergrund der zuvor diskutierten autökologischen Eigenschaften interpretiert. Alle Modelle sollen zusätzlich im Kontext des Dickenwachstums betrachtet werden. Im weiteren Verlauf sollen auf Grundlage der entwickelten Modelle Empfehlungen zur waldbaulichen Gestaltung der Astreinigungsphase von Buche und Eiche gegeben werden.

Diese Arbeit ist im thematischen Überlappungsbereich zweier großer Forschungsfelder angesiedelt:

- zum einen der botanisch - morphologischen bzw. ökophysiologischen Forschungsrichtung, die unter anderem auch strukturelle Unterschiede von Licht- und Schattbaumarten untersucht,
- zum anderen der (wert)holzproduktionsorientierten wachstumskundlichen Forschungsrichtung, welche mit Hilfe statistischer Modelle Gesetzmäßigkeiten zum Wachstum von Bäumen

aufdecken möchte, um deren Bewirtschaftung besser auf spezifische Produktionsziele zuschneiden zu können.

Durch die Parametrisierung einfacher und leicht zu interpretierender waldwachstumkundlicher Modelle und dem anschließenden Baumartenvergleich anhand dieser Modelle werden beide Themenfelder miteinander verschnitten. Damit grenzt sich diese Arbeit zu bisher vorhandenen Forschungsarbeiten dieser Themenfelder ab.

2 METHODEN

2.1 FORSCHUNGSANSÄTZE

Die wissenschaftstheoretische Ausrichtung dieser Arbeit folgt einem induktiven Prozess, der darauf abzielt, aus auf empirischen Daten basierenden Erkenntnissen verallgemeinernde Interpretationen abzuleiten, aus denen sich Prognosen für andere Einzelfälle ergeben. Die Grundidee der Induktion besteht darin, dass die wiederholte Beobachtung eines Sachverhalts die Wahrscheinlichkeit steigen lässt, dass die entsprechend formulierten vorläufigen Hypothesen wahr sind (BALZERT et al. (2008)). Der Terminologie von BALZERT et al. (2008) folgend, ist eine Hypothese eine Vermutung über den Zusammenhang zwischen mindestens zwei Sachverhalten.

In dieser Arbeit sollen die Entwicklungsstadien, in welcher die Astreinigungsphase stattfindet, möglichst vollständig abgedeckt werden. Aus diesem Grund beruht das Untersuchungskonzept dieser Arbeit auf dem Prinzip der unechten Zeitreihe in Kombination mit dem retrospektiven Ansatz der Stammanalyse. In ihrer Gesamtheit sollen die aufgenommenen Flächen ein möglichst großes Spektrum an Entwicklungsstadien vom Beginn bis zum Ende der Astreinigungsphase abdecken. Mit Hilfe dieses Prinzips soll die zeitliche Abfolge von Wiederholungsaufnahmen durch ein räumliches Nebeneinander einmaliger Aufnahmen ersetzt werden (GADOW (2003)).

Diese Arbeit ist in drei Teilbereiche aufgeteilt:

- **Baumgestalt und Astarchitektur**
- **Astmortalitätsprozess**
- **Astüberwallung und innere Ästigkeit.**

In allen drei Teilbereichen werden, wie in Kapitel 1.3 dargestellt, Wachstumsmodelle auf Einzelbaum- wie auch auf Einzelastebene erstellt. Da die in dieser Arbeit untersuchten verschiedenen Charakteristiken von Buche und Eiche in Abhängigkeit vom Dickenwachstum untersucht werden sollen, wurde bei der Modellerstellung im Rahmen der Variablenselektion darauf geachtet, dass Regressoren ausgewählt wurden, die eine Simulation der Zielgröße für verschiedene Radialzuwachsszenarien zulassen.

2.1.1 EINZELBAUMBEBENE

Modelle zur Prognose der Höhenentwicklungen, Kronendimensionen sowie der Astreinigungsprozesse wurden in der Vergangenheit erfolgreich für verschiedene Baumarten angepasst, so auch von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009). An diesen orientiert sich der Forschungsansatz für die in dieser Arbeit parametrisierten Wachstumsmodelle auf Einzelbaumbene.

2.1.1.1 FORSCHUNGSANSATZ ZU BAUMGESTALT

2.1.1.1.1 BAUMHÖHENENTWICKLUNG

In der vorliegenden Studie sollten Bestände untersucht werden, die sich in der anfänglichen bis abgeschlossenen Phase der Astreinigung befinden und somit unterschiedliche natürliche Wuchsklassen beginnend mit der ausgehenden Dickung über die Stangenholzphase bis hin zum geringen Baumholz abdecken (Terminologie nach KRAMER (1976)).

Mit Hilfe der in Baden - Württemberg gebräuchlichen Ertragstafeln (SCHOBER (1993), JÜTTNER (1993)) können Alters- Höhenbeziehungen jedoch erst ab einem Eingangsalter von 20 (Eiche) bzw. 30 (Buche) Jahren bestimmt werden. Für jüngere Bestandesentwicklungsphasen liegen keine Alters - Höhenrelationen vor. Die Baumhöhe wurde jedoch als Eingangsgröße für verschiedene Modelle vorgesehen, ohne Kenntnis der Höhenentwicklung in Abhängigkeit des Alters hätte des Weiteren keine Simulation auf Grundlage dieser Modelle zur Verbildlichung des Modellverhaltens erfolgen können. Deswegen, und nicht zuletzt auch um die unterschiedliche Höhenwachstumsdynamik von Buche und Eiche in der Astreinigungsphase darstellen zu können, wurde ein Höhenwachstumsmodell auf Grundlage der Stammanalysen erstellt.

Für die Modellierung des Höhenwachstums stehen zahlreiche Funktionen zur Verfügung (vgl. ZEIDE (1993)). Jedoch wird in vielen dieser (anamorphen) Funktionen von einem konstanten Verhältnis der Höhen zwischen unterschiedlichen Bonitäten bei gegebenem Alter ausgegangen, was zur Folge hat, dass die Formen der Höhenwachstumskurven keine Unterschiede zwischen den einzelnen Bonitäten aufweisen (GADOW (2003)). Die von SLOBODA (1971) entwickelte polymorphe Wachstumsfunktion erlaubt dagegen eine bonitätsabhängige Verschiebung des Höhenzuwachsmaximums der Einzelkurven in Bezug auf das Alter. Die formbestimmenden Parameter sind hier sowohl baumartenabhängig als auch standortsabhängig (GADOW (2003)). Dieser Modelltypus erlaubt es zusätzlich, individuell an das

vorliegende empirische Datenmaterial angepasste Bonitätsstufen („SI“: *Site Indices*) auszuschneiden, da die Baumhöhe, welche in einem frei wählbaren Referenzalter erreicht wurde, angegeben werden kann. Üblicherweise wird das Referenzalter auf baumartenindividuelle Umtriebszeiten angepasst (z.B. LANGSHAUSEN (2009)), oder der besseren Vergleichbarkeit wegen auf 100 Jahre gesetzt („SI₁₀₀“). Bei der Festlegung des Referenzalters musste in dieser Arbeit der Umstand berücksichtigt werden, dass vergleichsweise junge Bäume untersucht wurden. Des Weiteren erwiesen sich die einzelnen Höhenzuwachsverläufe vor allem bei Bäumen der Baumart Buche in den ersten Jahren als außerordentlich variabel. Aus diesem Grund wurde als Referenzalter nicht das Alter auf Stockhöhe, sondern das Alter des Baumes auf 1,3m Schafthöhe gewählt. Da möglichst viele Daten in das Höhenmodell mit einfließen sollten, wurde ein Referenzalter von 10 Jahren auf 1,3m Schafthöhe gewählt („SI₁₀“). Dieses Alter entspricht der Anzahl der Jahrringe auf der Stammscheibe, die in 1,3m Schafthöhe entnommen wurde. Die allgemeine Modellformulierung für das Höhenmodell lautet somit:

$$\text{Baumhöhe} = f(\text{Alter des Baumes auf 1,3m Schafthöhe}^5, \text{Höhe im Alter 10 [Bezug: Alter}_{1,3}])$$

2.1.1.1.2 KRONENDURCHMESSER

Es ist bekannt, dass ein straffer linearer Zusammenhang zwischen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und Kronendurchmesser existiert (z.B. BURGER (1947), JOBLING & PEARCE (1977), SPIECKER (1991), HAHN (1995), NUTTO (1999), BULLOCK (2000), HEIN (2004), HEMERY et al. (2005), LANGSHAUSEN (2009)). DAWKINS (1963) gibt hingegen zu bedenken, dass der theoretisch korrekte Zusammenhang zwischen Kronendurchmesser und Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe bei Einschluss von Extremwerten eigentlich eine sigmoidale Form annehmen müsste, konstatiert jedoch, dass die praktischste Interpretation des Zusammenhangs beider Größen in den meisten Fällen eine lineare Beziehung sei.

Als besonders praktikabel erwies sich bei SPIECKER (1991), NUTTO (1999) und HEIN (2004) die Prognose der Kronenbreite mit den Eingangsvariablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und Baumalter. LANGSHAUSEN (2009) zog bei der Prognose der Kronenbreite der Baumart Buche als weitere Variable noch die Baumhöhe hinzu.

⁵ Im Folgenden wird für das Baumalter auf 1,3m Schafthöhe der Ausdruck *Alter*_{1,3} verwendet.

Da Modelle dieser Form schon erfolgreich von SPIECKER (1991), NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) auf Daten der Baumarten Buche und Eiche angewendet wurden, wurde folgende allgemeine Modellformulierung gewählt:

$$\textit{Kronendurchmesser} = f(\textit{Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe}, \textit{Alter}_{1,3}, \textit{Baumhöhe})$$

SPIECKER (1991) weist darauf hin, dass die biologisch korrekte Kausalrichtung der Beziehung *Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe* = $f(\textit{Kronendurchmesser})$ lauten müsste, da die Entwicklung des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe von der Kronendurchmesserentwicklung bestimmt wird. Aus Gründen der Praktikabilität wird die Funktion jedoch in den meisten Arbeiten zu diesem Themenkomplex, außer bei der Prognose des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe aus Luftbildaufnahmen (z.B. KALLIOVIRTA & TOKOLA (2005), in umgekehrter Form verwendet. Um in dieser Arbeit Konsistenz mit den Eingangsgrößen des Höhenwachstumsmodells zu wahren, wurde desgleichen nicht das Alter auf Stockhöhe, sondern das $\textit{Alter}_{1,3}$ als Regressor verwendet.

2.1.1.1.3 ASTANZAHL

Für die spezifische Fragestellung dieser Arbeit schien der Modellansatz von DORUSKA & BURKHART (1994) zur Vorhersage der gesamten baumindividuellen Astanzahl am geeignetsten. Für die Schätzung der Anzahl lebender Äste sollte, um einen direkten Vergleich beider Baumarten zu ermöglichen, eine Längenangabe der longitudinalen Ausdehnung der Krone in Form der absoluten Kronenlänge in die Regressionsgleichung miteinbezogen werden. Da von einer schnelleren Astreinigung und damit *ceteris paribus* von einer kürzeren Krone bei der Baumart Eiche ausgegangen werden muss, und um Simulationen für unterschiedliche Radialzuwachsszenarien zu ermöglichen, sollte der Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe in Kombination mit dem $\textit{Alter}_{1,3}$ mit in das Modell einbezogen werden.

Die allgemeine Modellformulierung lautet somit:

$$\textit{Anzahl der lebenden Äste} = f(\textit{Kronenlänge}, \textit{Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe}, \textit{Alter}_{1,3})$$

2.1.1.2 FORSCHUNGSANSÄTZE ZU ASTMORTALITÄT UND ASTÜBERWALLUNG (ASTREINIGUNG)

2.1.1.2.1 KRONENANSATZHÖHE UND ASTFREIE SCHAFTLÄNGE

Der Fortschritt der Astreinigung und der Astüberwallung auf Einzelbaumebene kann wie zuvor beschrieben durch die Anhebung des Kronenansatzes beziehungsweise des untersten nicht überwallten Totastes in Abhängigkeit von verschiedenen Einzelbauparametern quantifiziert werden. In Anlehnung an NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) wurde folgende allgemeine Modellformulierung gewählt:

$$\text{Kronenansatzhöhe}^6 \text{ respektive astfreie Schaftlänge}^7 = f(\text{Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe, Baumhöhe, Alter}_{1,3})$$

2.1.2 EINZELASTEBENE

Als orientierender Rahmen wurden vorhandene Wachstumsmodelle zu verschiedenen Aspekten der Astarchitektur, der Astmortalität, der Astüberwallung und inneren Ästigkeit (z.B. DORUSKA & BURKHART (1994), NUTTO (1999), MAGUIRE et al. (1999), SCHMIDT (2001), MÄKINEN (2002), MÄKINEN & HEIN (2006), HEIN et al. (2007b), HEIN & SPIECKER (2007), HEIN et al. (2007a), HEIN (2008), LANGSHAUSEN (2009), KINT et al. (2010)) bei der Parametrisierung der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle genutzt. Diese lieferten wertvolle Informationen über wachstumskundliche Zusammenhänge. Die in dieser Arbeit zu erstellenden Wachstumsmodelle auf Einzelastebene sollten jedoch auch weitere bestimmte Voraussetzungen erfüllen:

- Die Modelle sollten eine möglichst einfache, lineare oder linearisierte Struktur aufweisen, leicht interpretierbar und insbesondere biologisch plausibel sein. Auf Interaktionsterme innerhalb der Modellformulierungen sollte, sofern sie keine zwingende biologisch plausible Bedeutung besaßen, weitgehend verzichtet werden.

⁶ Während der Vorbereitungen zu den Feldaufnahmen wurde deutlich, dass sich lebende Äste der Baumart Buche auch in den untersten Schaftbereichen mit einer Distanz von bis zu 4 Metern zur restlichen Krone befanden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, wurde die Kronenansatzhöhe der Definition von MÄKINEN (2002) und MÄKINEN et al. (2003b) folgend als die Astansatzhöhe des untersten Astes, welcher gleich oder weniger als 1,5 Meter von den nächst oberen 3 lebenden Ästen entfernt ansetzt, festgelegt.

⁷ Die astfreie Schaftlänge wurde in der vorliegenden Arbeit als die Ansatzhöhe des ersten nicht überwallten Totastes mit einer Aststummellänge von über einem Zentimeter festgelegt.

- Die Modelle sollten in sich konsistent sein. Gewählte Formulierungen verwendeter Regressoren sollten durchgehend verwendet werden. So können einige der Eingangsvariablen, wie zum Beispiel die Astansatzhöhe, auf etliche Arten zum Ausdruck gebracht werden. DORUSKA & BURKHART (1994) oder KINT et al. (2010) etwa verwendeten zur Positionsangabe des Astes am Schaft die relative Astansatzhöhe, MAGUIRE et al. (1999) oder SCHMIDT (2001) die Tiefe des Astes in der Krone, was den Abstand von der Kronenspitze zum Astansatz ausdrückt. Vor Allen bei Modellen für Koniferen, die für gleichaltrige Bestände erstellt wurden, dient oft auch das Quirlalter (z.B. MÄKINEN & COLIN (1998)) als Regressor zur Angabe der Astposition am Stamm.

In dieser Arbeit wurde das Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung in jedem der parametrisierten Modelle, welche diesen Regressor enthalten, für die Angabe der Astposition am Stamm verwendet. Der Ausdruck der vertikalen Astposition in dieser Form hat gegenüber den erwähnten weiteren Möglichkeiten den Vorteil, dass Äste von Bäumen verschiedenster Standortsgüten und verschiedenster Entwicklungsstadien direkt miteinander vergleichbar gemacht werden können. Die Literaturrecherche ergab keinen Hinweis darauf, dass die vertikale Astposition in der Vergangenheit schon einmal auf diese Weise zum Ausdruck gebracht wurde.

- Die Modelle sollten- soweit sinnvoll und biologisch plausibel- einen Regressor beinhalten, welcher das Dickenwachstum zum Ausdruck bringt, um Simulationen für verschiedene Radialzuwachsszenarien zu erstellen. In Frage kamen hier der mittlere jährliche Radialzuwachs oder der Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe in Verbindung mit dem Alter_{1,3}.
- Die Modelle der beiden Baumarten Buche und Eiche sollten dieselben Variablenkombinationen besitzen, um einen Baumartenvergleich zu ermöglichen.

Aus den genannten Gründen war eine direkte Übernahme bisheriger Modelle zur Prognose des Astwachstums sowie der Astreinigung in den meisten Fällen nicht möglich. Mit Hilfe der Literaturstudie wurden mögliche Einflussvariablen zusammengetragen.

2.1.2.1 FORSCHUNGSANSATZ ZUR ASTARCHITEKTUR

2.1.2.1.1 ASTLÄNGE

Bereits in früheren Arbeiten konnte ein straffer Zusammenhang zwischen dem Astdurchmesser und der Astlänge festgestellt werden (z.B. ABETZ & MERKEL (1968), MCMAHON & KRONAUER (1976), ABETZ & UNFRIED (1983) CEULEMANS et al. (1990), DELEUZE et al. (1996), NUTTO (1999), MÄKELÄ & VANNINEN (2001), ILOMÄKI et al. (2003), HEIN (2004), LANGSHAUSEN (2009), KINT et al. (2010)). LANGSHAUSEN (2009) schloss als weitere erklärende Variable eine Positionsangabe des Astes am Schaft in das von ihm entwickelte Astlängenmodell ein. Andere Autoren prognostizieren die Astlänge ausschließlich mit einer Variable zur Angabe der Astposition (MEREDIEU et al. (1998), KANTOLA & MÄKELÄ (2004)). Die Modellierung der Astlänge dient in dieser Arbeit jedoch als Vorstufe des Astdurchmessermodells, in welches Einzelbaumvariablen wie der Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe oder das Baumalter auf 1,3m Höhe einfließen sollen; Variablen, die ebenfalls in bereits vorhandenen Modellen zur Schätzung der Kronenbreite signifikant beitrugen. Das Astlängenmodell soll somit das Kronenbreitenmodell und das Astdurchmessermodell logisch miteinander verketteten.

Die allgemeine Modellformulierung wurde in Anlehnung an das von LANGSHAUSEN (2009) erstellte Astlängenmodell erstellt. Zusätzlich sollte noch der Einfluss des Astansatzwinkels auf die Astlänge überprüft werden. Somit lautet die allgemeine Modellformulierung:

$$\text{Astlänge} = f(\text{Astdurchmesser}, \text{Alter}_{1,3} \text{ zum Zeitpunkt der Astbildung}, \text{Astansatzwinkel}).$$

2.1.2.1.2 ASTDURCHMESSER

Ausgehend von der Überlegung:

$$\text{Kronenbreite} = f(\text{Alter}_{1,3}, \text{Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe})$$

$$\text{Kronenbreite} = f(\text{Astlänge})$$

$$\text{Astdurchmesser} = f(\text{Astlänge})$$

soll die Gültigkeit der Funktion

$$\text{Astdurchmesser} = f(\text{Alter}_{1,3}, \text{Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe})$$

untersucht werden.

Weiterhin wird basierend auf den innerhalb der Literaturstudie herausgearbeiteten Zusammenhängen davon ausgegangen, dass die vertikale Astposition am Schaft sowie der Astansatzwinkel signifikanten Einfluss auf den Astdurchmesser besitzen. Die allgemeine Modellformulierung lautet somit:

$$\text{Astdurchmesser} = f(\text{Alter}_{1,3}, \text{Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe}, \text{Alter}_{1,3} \text{ zum Zeitpunkt der Astbildung}, \text{Astansatzwinkel}).$$

2.1.2.1.3 ASTRADIALZUWACHS

Angelehnt an Modellansätze von MÄKINEN (1999a) und MÄKINEN (2002) zur Prognose des Astradialzuwachses bei *Betula pendula* und *Pinus sylvestris* soll der Einfluss des laufenden Astalters sowie des jährlichen Radialzuwachses des jeweiligen Baumes auf 1,3m Schafthöhe auf den jährlichen Astradialzuwachs von Buche und Eiche untersucht werden.

Einflüsse der baumspezifischen Entwicklungsphase auf den jährlichen Astradialzuwachs sollen zusätzlich mit Hilfe der Variable $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung untersucht werden. Des Weiteren steht zu vermuten, dass der Astansatzwinkel, sofern er signifikant zur Erklärung der Reststreuung des Astdurchmessermodells beiträgt, auch einen signifikanten Einfluss auf den Astradialzuwachs besitzt. Die allgemeine Modellformulierung lautet somit

$$\text{Astradialzuwachs} = f(\text{laufendes Astalter}, \text{jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe}, \text{Alter}_{1,3} \text{ zum Zeitpunkt der Astbildung}, \text{Astansatzwinkel})$$

2.1.2.1.4 ASTANSATZWINKEL

Angelehnt an Modellansätze von HEIN & SPIECKER (2007), aber auch basierend auf den Beobachtungen und Untersuchungsergebnissen unter anderem von KURTH (1946), JANKIEWICZ & STECKI (1976), BOZZUTO & WILSON (1988), MEDHURST & BEADLE (2001), MÄKINEN et al. (2003b), SONE et al. (2006) oder KINT et al. (2010) sollte nicht nur der Einfluss des durchschnittlichen jährlichen Schafradialzuwachses auf 1,3m Höhe während der Lebenszeit des Astes als Proxy für den individuellen Bedrängungsgrad des Baumes auf den Astansatzwinkel, sondern auch der Einfluss des Astalters sowie die vertikale Position des Astes in der Krone auf den Astansatzwinkel analysiert werden. Zuletzt sollte der Astdurchmesser in das Modell eingeschlossen werden. Die allgemeine Modellformulierung lautet somit:

Astansatzwinkel = f (durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Lebenszeit des Astes, erreichtes Astalter, Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung, Astdurchmesser)

2.1.2.2 FORSCHUNGSANSATZ ZUR ASTMORTALITÄT

2.1.2.2.1 ASTSTATUS

Die Aufnahme von toten und lebenden Ästen ermöglicht die Modellierung des Astreinigungsprozesses mit Hilfe einer binären logistischen Regression. In Anlehnung an KINT et al. (2010) wurden als mögliche Einflussvariablen auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ast während der Datenaufnahme im Winter 2008/ 2009 lebend vorgefunden wurde, die Baumhöhe, der Astdurchmesser, das Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung sowie der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der letzten 5 Jahre identifiziert. Anders als der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe zeigt die hier eingesetzte Variable die kurzfristige Vitalitätstendenz eines Baumes an. Hier wird von der Überlegung ausgegangen, dass sich kurzfristige Radialzuwachstendenzen auf den zum Zeitpunkt der Aufnahme vorgefundenen Aststatus auswirken, für welchen Jahre zurückliegende Vitalitätstendenzen nur geringe Relevanz besitzen.

Zusätzlich wurde der Einfluss des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe untersucht, um Aussagen über die Standortsabhängigkeit des Astmortalitätsprozesses zu treffen. Des Weiteren sollte der Einfluss des Astansatzwinkels untersucht werden. Die allgemeine Modellformulierung lautet somit:

Wahrscheinlichkeit für Aststatus „lebend“ = f (Alter_{1,3}, Baumhöhe, Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung, Astdurchmesser, durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der letzten 5 Jahre vor Fällung, Astansatzwinkel)

2.1.2.3 FORSCHUNGSANSATZ ZUR ASTÜBERWALLUNG UND INNEREN ÄSTIGKEIT

2.1.2.3.1 ASTÜBERWALLUNGSDAUER

Gestützt auf die von HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) formulierten Modelle zur Prognose der Astüberwallungsdauer bei Esche, Bergahorn und Buche, soll der Einfluss des Astdurchmessers und des mittleren jährlichen Radialzuwachses während der Überwallungszeit sowie des Radius des totasthaltigen Kerns auf die Astüberwallungsdauer überprüft werden. Die allgemeine Modellformulierung lautet somit:

Überwallungsdauer = f (Astdurchmesser, mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit, totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns)

2.1.2.3.2 WAHRSCHEINLICHKEIT DER ASTÜBERWALLUNG

Einflüsse auf die Astüberwallung können auch dargestellt werden, indem Merkmale toter, nicht überwallter Äste mit denen von toten, überwallten Ästen verglichen werden. Gleichzeitig ist es durch die Einteilung der aufgenommenen Daten in dichotome Kategorien („überwallt“ (Ereignis tritt ein; „1“) und „nicht überwallt“ (Ereignis tritt nicht ein, „0“)) möglich, mit Hilfe einer binären logistischen Regression Vorhersagen über die Eintrittsmöglichkeit des Ereignisses „Überwallung“ in Abhängigkeit verschiedener Prädiktoren zu treffen. Als mögliche Einflussvariablen auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ast bei der Datenaufnahme überwallt vorgefunden wurde, wurden der Astdurchmesser, die Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis und der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe nach dem Mortalitätsereignis bis zum Zeitpunkt der Datenaufnahmen und damit der Fällung im Winter 2008/ 2009 identifiziert. Der somit formulierte allgemeine Modellansatz lautet:

Astüberwallungswahrscheinlichkeit = f (Astdurchmesser, mittlerer jährlicher Radialzuwachs während der (bisherigen) Überwallungszeit, Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis)

2.1.2.3.3 RADIUS DES ASTHALTIGEN KERNS

In Anlehnung an Untersuchungen von HEIN (2004), soll der Einfluss des Astdurchmessers des überwallten Astes, des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses des Schaftes direkt unterhalb des überwallten Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und dem letzten lebenden Jahr des betreffenden Astes sowie der Astansatzwinkel als mögliche Einflussvariablen auf den Radius des asthaltigen Kerns überprüft werden. Da der lebendasthaltige Teil des asthaltigen Kerns davon abhängt, über welchen Zeitraum der betreffende Ast als lebender Ast von dem ihn umgebenden Holz umschossen wird, soll des Weiteren überprüft werden, inwiefern das Astalter den Radius des asthaltigen Kerns beeinflussen kann. Der formulierte allgemeine Modellansatz lautet daher:

Radius des asthaltigen Kerns = f (Astdurchmesser, mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr des betreffenden Astes, Astansatzwinkel, Astalter)

2.2 AUSWAHLKRITERIEN

2.2.1 VORAUSWAHL DER BESTÄNDE

Wie in Kapitel 2.1 diskutiert, sollte in dieser Arbeit die Astreinigungsphase von Buche und Eiche mit allen ihr zuordenbaren Entwicklungsstadien möglichst vollständig abgedeckt werden. Dabei sollten die Entwicklungsstadien von Buche und Eiche so ausgewählt werden, dass ein direkter Vergleich der Baumarten einer bestimmten Entwicklungsphase sinnvoll und möglich ist. Das Alter in Jahren schien durch die unterschiedliche Höhenwachstumsgeschwindigkeit von Buche und Eiche für einen direkten Vergleich ungeeignet. Die Baumhöhe jedoch kann als Weiser für das jeweilige Baumentwicklungsstadium interpretiert werden (vgl. GERECKE (1988), EPP (2004)). Um auch verschiedene Standorte miteinander vergleichbar zu machen, sollten der Methodik von GERECKE (1988), EPP (2004) und OSADA et al. (2004) folgend so genannte „Höhenindizes“ ausgeschieden werden. Dabei werden die erreichten Baumhöhen in Relation zu der auf dem betreffenden Standort voraussichtlich erreichbaren Baumhöhe im Alter 100 gesetzt. Somit sollte der unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeit beider Baumarten Rechnung getragen werden.

Nach den zuvor diskutierten Modellen zur Schätzung der astfreien Schaftlänge bei Buche und Eiche NUTTO (1999), LANGSHAUSEN (2009) und auf Grundlage der Hilfstabellen für die Forsteinrichtung des Landes Baden - Württemberg (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993)) wird ein astfreier Schaft von etwa 8 Metern, was dem Minimalziel der Astreinigungsphase bei Wertholzproduktion entspricht (vgl. BURSCHEL & HUSS (1997)), je nach Standort bei einem Höhenindex von 50% bis 60% der voraussichtlichen Endhöhe im Alter 100 erreicht. Dies wurde als die älteste Entwicklungsstufe der Astreinigungsphase festgelegt. Darüber hinaus wurden zwei zusätzliche Entwicklungsstufen ausgeschieden, welche 10% bis 20% und 30% bis 40% der voraussichtlichen Baumhöhe im Alter 100 erreicht haben sollten.

Da das vorrangige Ziel der Aufnahme die gleichmäßige Abdeckung der Astreinigungsphase und nicht die Abdeckung unterschiedlichster Standorte war, wurden schlechtere Standorte *a priori* von der Aufnahme ausgeschlossen. Als schlechteste für die Datenaufnahme akzeptable Standortsgüte wurde die Ertragsklasse $dG_{100} = 7$ Vfm/ha/a nach den Ertragstafelwerten der Hilfstabellen für die Forsteinrichtung des Landes Baden- Württemberg (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993)) festgelegt.

Astreinigungsprozesse ereignen sich in geschlossenen Beständen in frühen Bestandesjahren. Wie in Kapitel 2.1.1.1.1 jedoch diskutiert, können auf Grundlage der Ertragstafeln nach JÜTTNER (1993) und SCHOBER (1993) keine Alters- Höhenrelationen für Eichen- und Buchenbestände unter 20 (bzw. 30) Jahren abgeleitet werden. Aus diesem Grunde war es nötig, die Beziehung für Bäume jüngeren Alters herzuleiten. Dabei bildeten die Ertragstafelwerte für die Spitzhöhen der unterschiedlichen Ertragsklassen mit einem dG_{Z100} von über 7 Vfm/ha/a von JÜTTNER (1993) und SCHOBER (1993) die Grundlage zur Erstellung der Höhenwachstumskurven, welche mit Hilfe der zuvor diskutierten polymorphen Höhenwachstumsfunktion nach SLOBODA (1971) erstellt wurden:

$$H = a * \left(\frac{bon}{a}\right)^{exp^{b*(Alter^{-c}-Alter_{ref}^{-c})/c}}$$

Formel 1: Höhenwachstumsfunktion nach Sloboda (1971).

wobei:

H = Baumhöhe [m]

bon = absolute Höhenbonität [m]

$Alter$ = Alter auf Stockhöhe [Jahre]

$Alter_{ref}$ = Referenzalter der absoluten Höhenbonität („SI“) [Jahre]

a, b, c = empirische Koeffizienten

Als Referenzalter wurde, wie zuvor dargestellt, die Höhe im Alter 100 verwendet. Die Extrapolation bis zum Alter 0 erfolgte durch gutachterliche Verlängerung der einzelnen Höhenwachstumskurven der Ertragstafelwerte und beruht daher lediglich auf Annahmen.

Die Berechnungen wurden mit Hilfe der Funktion *nls* des Statistikpakets R durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameterschätzer berechnet:

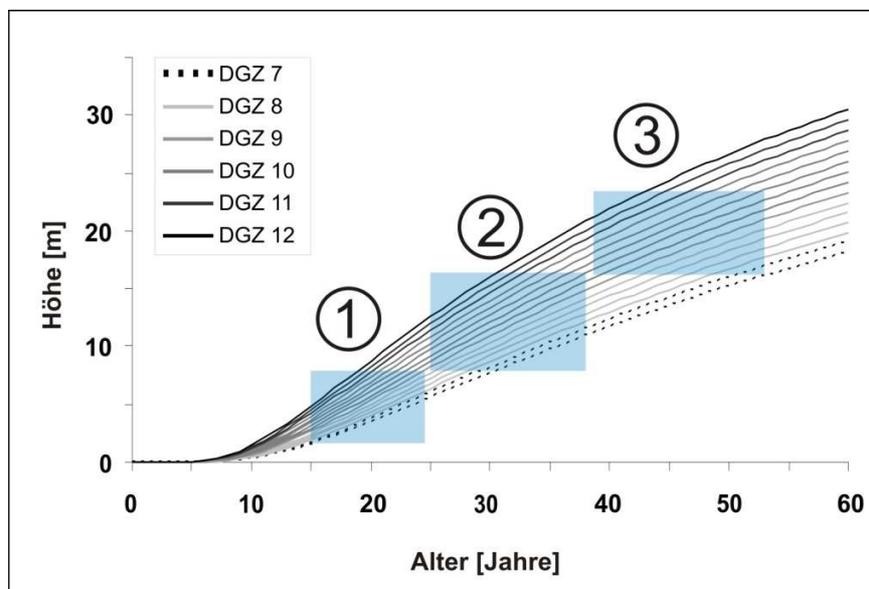
Baumart	Koeffizienten	Parameter-schätzer	Standardfehler des Schätzers	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
<i>Buche</i>	a	0,315	0,017	17,66	<2e-16	***
	b	1,649	0,093	17,71	<2e-16	***
	c	140,80	8,369	16,82	<2e-16	***

Eiche	A	-0,030	0,011	-2,727	0,0067	**
	B	0,5137	0,019	26,179	<2e-16	***
	C	52,513	0,721	72,735	<2e-16	***

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 2: Parameterschätzer des nicht - linearen Höhenwachstumsmodells auf Datengrundlage der Ertragstafelwerte zur Vorauswahl der zu untersuchenden Bestände

Auf Grundlage der erstellten Höhenwachstumskurven konnten in der Folge die Höhenindizes errechnet werden. Ziel der Analyse war es, Alters- und Höhenrahmen für Eichen und Buchen auf Standorten ab einer Ertragsklasse von 7 Vfm/ha/a für die verschiedenen zuvor ausgeschiedenen Entwicklungsstufen (Synonym: „Höhenstufen“) von 10% bis 20%, 30% bis 40% und 50% bis 60% zu erstellen.



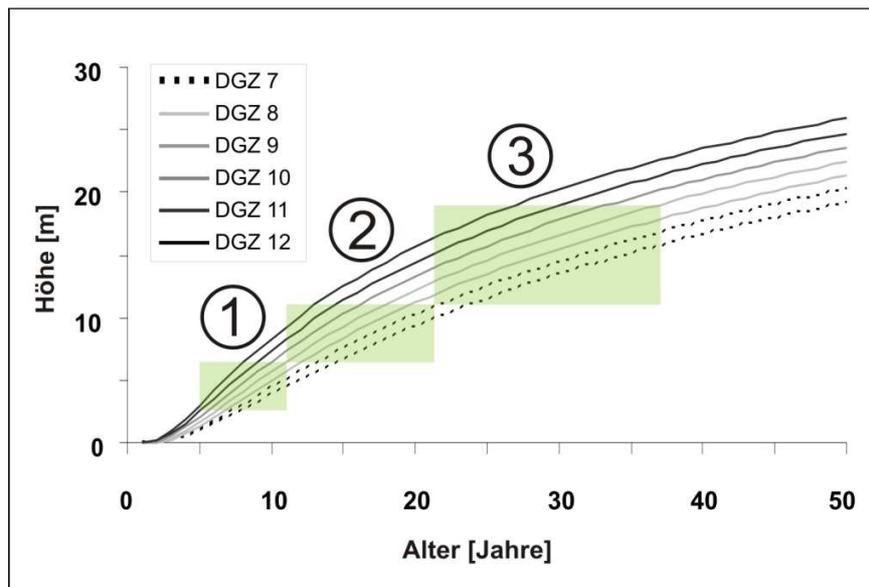


Abbildung 1: Ergebnisse des Höhenmodells auf Grundlage der Ertragstafelwerte und ausgewählte Höhenstufen für Buche (oben, blau) und Eiche (unten, grün). 1= Höhenstufe 10%- 20%; 2= Höhenstufe 30%- 40%, 3= Höhenstufe 50%- 60%.

2.2.2 BESTANDESAUSWAHL

Nach Festlegung der Rahmenbedingungen zur Bestimmung der einzelnen Höhenstufen konnten die zu untersuchenden Bestände ausgewählt werden. Über eine vom Regierungspräsidium durchgeführte Datenbankabfrage wurden zunächst alle Buchen- und Eichenbestände in Baden - Württemberg mit einer Ertragsklasse von $dGZ_{100} \geq 7$ Vfm/a/ha zusammengestellt. Danach konnten, um unerwünschte Einflüsse durch Überschirmung oder konkurrenzkräftige Mischbaumarten möglichst gering zu halten, die Auswahlkriterien an die zu untersuchenden Bestände verfeinert werden:

- bestandesweiser Baumartenanteil von Buche oder Eiche von jeweils über 80%
- Altersspreitung innerhalb der Bestände von maximal 10 Jahren

Es wurden nur Bestände ausgewählt, deren Alter innerhalb des zuvor aufgestellten standortsabhängigen Altersrahmens lag. Ob die Bestände jedoch auch die jeweils festgelegten Höhenanforderungen erfüllten, musste vor Ort anhand einer orientierenden Höhenmessung an fünf zufällig ausgewählten vitalen Bäumen beurteilt werden. In einigen Buchenbeständen wurde zusätzlich eine stichprobenartige Altersbestimmung mittels Bohrkernentnahme durchgeführt.

Bei der Auswahl der Eichenbestände wurde nicht zwischen Beständen von Stiel- und Traubeneiche unterschieden, da sich die Gattungen hinsichtlich ihrer Kronenentwicklung sehr ähnlich sind (ROLOFF (1993)).

2.2.3 AUSWAHL DER PROBEBÄUME

Um eine möglichst große Spreitung unterschiedlicher Dickenzuwachsszenarien zu erhalten, wurden aus allen gewählten Beständen Probebäume der Kraft'schen Klasse 1 (vorherrschend) bis 4 (beherrscht) nach KRAFT (1884) ausgesucht.

Es wurden ausschließlich Bäume aus dem Bestandesinneren gewählt, welche nicht durch störende zusätzliche Faktoren wie Bestandeslücken, Rückegassen oder Mischbaumarten in der direkten Nachbarschaft beeinflusst wurden. Bäume mit Verletzungen oder tief ansetzenden Zwieseln⁸ wurden *a priori* von der Aufnahme ausgeschlossen.

2.3 DATENERHEBUNG

Die Datenerhebungen im Zuge der Feldarbeiten fanden zwischen Oktober 2008 und Februar 2009 statt. Alle in dieser Arbeit angegebenen Zustandsgrößen, welche nicht retrospektiv ermittelt wurden, beziehen sich somit auf den Zustand am Ende der Vegetationsperiode 2008.

2.4 DATENERHEBUNGEN AM STEHENDEN BAUM

Die Probebäume wurden rundum mit einer Markierung auf 1,3m Schafthöhe, einer Baumnummer sowie Markierungen zur Angabe der Himmelsrichtung versehen und einer der sozialen Klassen nach KRAFT (1884) zugeordnet. Der Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe wurde mit Hilfe eines Maßbandes aufgenommen. Zur Erfassung der Konkurrenzsituation wurde Azimut und Abstand zwischen dem Schaft des Probebaums auf 1,3m Höhe und den Schäften der direkten Bedränger⁹ auf 1,3m Höhe aufgenommen. Um den Grad der Kronenüberlappung festzustellen, wurde der Abstand zwischen dem Kronenrand des Bedrängers und der Referenzhöhe von 1,3m des Probebaums aufgenommen.

Sowohl die Baumhöhe als auch der Kronenansatz und der Ansatz des untersten vom Boden aus sichtbaren Totastes wurden mit Hilfe eines elektronischen Distanz- und Winkelmessgeräts¹⁰ an den

⁸ Als Zwiesel wurde ein Ast definiert, welcher 75% der Länge und Höhe der Stammachse vom Verzweigungspunkt aus überschreitet und stärker als 75% des Stammachsendurchmessers ist (vgl. WEINREICH (2000)).

⁹ Als direkter Bedränger galt ein Baum gleicher oder höherer Kraft'scher Klasse, welcher in direktem Kronenkontakt mit dem Probebaum stand.

¹⁰ FORESTOR VERTEX III und Transponder T3, Haglöf, Schweden AB.

Probebäumen als auch deren direkten Bedrängern aufgenommen, wobei hier zunächst die Kronenansatzhöhe als Ansatzhöhe des untersten lebenden Primärastes definiert wurde¹¹.

Die anschließende Kronenablotung der Probebäume wurde nach dem von SPIECKER (1991) entwickelten und dort ausführlich beschriebenen Verfahren ausgeführt. Diese Vorgehensweise zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die Auswahl der Lotpunkte frei an die charakteristische Form der Krone angepasst werden kann und sich nicht, wie von PRETZSCH (2002) vorgeschlagen, an 4 oder 8 Himmelsrichtungen orientiert. Im Normalfall werden 8 Ablotungspunkte je Baumkrone mittels Fluchtstäben auf den Boden projiziert; bei sehr kleinen Kronenschirmflächen erwies sich das Abloten von 8 Punkten jedoch als wenig sinnvoll und bei der Messung hinderlich, weswegen gerade in Beständen der jüngsten Entwicklungsstufe nur 6 bzw. 4 Lotpunkte je Baumkrone erfasst wurden.

Die Justierung der Fluchtstäbe erfolgte mit Hilfe eines Neigungsmessers¹², die Entfernungsmessung zwischen Fluchtstab und dem Referenzpunkt auf 1,3m Schafthöhe wurde mit Hilfe des zuvor spezifizierten elektronischen Distanz- und Winkelmessgeräts durchgeführt. Der Richtungswinkel der Fluchtstäbe wurde mit Hilfe einer Taschenbussole¹³ bestimmt. Alle Kronenablotungen erfolgten in unbelaubtem Zustand, was nach HEIN (2004) durch das fehlende Eigengewicht der Blattmasse zu leichten Unterschätzungen der Kronenschirmfläche führen kann. Jedoch sind die Kronenränder in unbelaubtem Zustand besser zu erkennen; das Risiko einer Fehleinschätzung wird somit vermindert.

2.5 DATENERHEBUNGEN AM LIEGENDEN BAUM

Ziel der Datenerhebungen war die Vermessung von Höhenwachstums- und Astparametern sowie die Probenentnahme von

- Stammscheiben aus definieren Höhen für die Stammanalyse
- Lebenden Ästen zur Vermessung des Astradialzuwachses
- Totästen zur Bestimmung von den Astreinigungprozess betreffenden dimensions- und zeitbezogenen Parametern

¹¹ Die Kronenansatzhöhe wurde später nach Abschluss der Astansatzmessungen als die Ansatzhöhe des untersten Astes, welcher gleich oder weniger als 1,5m von den nächst oberen drei lebenden Ästen ansetzt, bestimmt (Vgl. Kapitel 2.1.1.2.1).

¹² SUUNTO, Finnland.

¹³ SUUNTO, Finnland.

2.5.1 TRIEBLÄNGENMESSUNGEN UND VORBEREITENDE ARBEITEN FÜR DIE STAMMANALYSE

Stehend vermessene Prohebäume wurden für die Astmessungen und die Probenentnahme gefällt. In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein Maßband auf der Stammoberfläche ausgelegt und anhand der Markierung in 1,3m Schafthöhe referenziert. Zunächst wurde ausgehend von der Baumspitze eine Triebblängenmessung basierend auf den Abständen zwischen den Triebbasisnarben bis zu dem Punkt durchgeführt, an dem die Narben nicht mehr erkennbar waren. ROLOFF (1993) beschreibt, dass sich Triebbasisnarben der Eiche von regulären und proleptischen Trieben problemlos 15 bis 20 Jahre zurückverfolgen ließen; dies stellte sich bei der Feldarbeit jedoch als äußerst diffizil heraus, da gerade die Triebbasisnarben an den älteren Schaftteilen aufgrund der rauhen Rinde nicht eindeutig zu erkennen waren. Im Regelfall konnten in dieser Arbeit pro Baum etwa 4 bis 6 Triebbasisnarben mit Sicherheit als solche identifiziert werden. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass sich bei der Baumart Eiche reguläre Triebe und Johannistriebe nicht anhand der Triebbasisnarben unterscheiden lassen, weswegen der Empfehlung von ROLOFF (1993) folgend ein das die Triebbasisnarbe umschließendes Triebstück zur späteren Jahrringauswertung entnommen wurde. Johannistriebe selbst bilden nach ROLOFF (1993) keinen eigenen Jahrring aus. Bei der Baumart Buche hingegen sind die Triebbasisnarben der Johannistriebe, sofern diese überhaupt gebildet werden, sehr schwach entwickelt und meist im Folgejahr nicht mehr zu erkennen (ROLOFF (1985)). Die glatte Rinde der Buche ermöglicht eine problemlose Lokalisierung der Triebbasisnarben an den jüngeren Schaft- und Triebteilen; in dieser Arbeit konnten im Mittel 10 Triebbasisnarben je Baum mit Sicherheit identifiziert werden.

Um eine retrospektive Analyse des Höhenwachstums zu ermöglichen, sollte eine Stammanalyse (vgl. KRAMER & AKÇA (1995)) durchgeführt werden. Dazu wurden zunächst die Stellen am Stamm markiert, an denen später die Stammscheiben entnommen werden sollten. Außer der Scheibe am Stammfuß sollten Scheiben der Höhen 1,3m, 3m und 5m und ab dort in 2,5m - Schritten bis zur Baumspitze entnommen werden.

2.5.2 ASTMESSUNGEN

Jeder Stamm wurde ausgehend von 1,3m in ein – Meter - Sektionen für die Astaufnahme eingeteilt. Prinzipiell wurden alle Primäräste ab einer Astansatzhöhe von 1,3m Schafthöhe vermessen, um etwaige Einflüsse, etwa durch Wildverbiss, zu vermindern. Die Unterscheidung zwischen lebenden und toten Ästen gestaltete sich bisweilen schwierig, da die Außenaufnahmen im Winter stattfanden. In

Zweifelsfällen wurden die Äste mit einem Werkzeug angeritzt, um ihren Status anhand des Rindenparenchyms zu überprüfen. War dieses grün gefärbt und feucht, wurde der Ast als lebend erachtet.

Astmessungen wurden an allen lebenden Ästen ab einem Zentimeter Astdurchmesser und allen toten Ästen ab einem Zentimeter Aststummellänge durchgeführt. Alle toten und lebenden Äste wurden ab 1,3m Schafthöhe bis zum Erreichen der Messgrenze in zwei getrennten Kollektiven („Tot“ = „T“; „Lebend“ = „L“) still durchnummeriert (vgl. PRETZSCH (2002)). Für jeden Ast wurde die Astansatzhöhe als die Höhe des Schnittpunktes von Schaft- und gedanklich verlängerter Astachse mit Hilfe des zuvor ausgelegten Maßbands aufgenommen. Weiterhin wurde der Durchmesser jedes Astes mittels eines elektronischen Messschiebers durch kreuzweise Klappung der Astbasis, welche nicht mehr durch die Schwellung des Astkragens beeinflusst war, ermittelt (vgl. NUTTO (1999)). Der Astansatzwinkel jedes Astes wurde am Schnittpunkt zwischen Schaft - und Astachse als Winkelabweichung von der Vertikalen mit Hilfe eines Geometriedreiecks vermessen. Die Exposition jedes Astes wurde mit Hilfe der zuvor am Stamm angebrachten Markierungen der Himmelsrichtung eingeschätzt. Die Länge von jeweils 3 lebenden Ästen je Baum aus unterschiedlichen Kronenbereichen wurde mit Hilfe eines Maßbands vermessen, wobei alle Knicke des Astes mitberücksichtigt wurden.

In jeder Metersektion wurde der stärkste Ast jedes Aststatus' (tot, lebend) zur späteren Probenentnahme ausgewählt und mit Aluminiumetiketten, auf denen die jeweilige Astidentifikationsnummer vermerkt wurde, markiert. Im astfreien Schaftbereich, wo nur noch überwallte Äste zu finden waren, wurde der stärkste überwallte Ast je Metersektion zur späteren Entnahme markiert. Die Stärke der jeweiligen überwallten Äste wurde anhand der Rindenmerkmale („Rosen“ bzw. „Chinesenbärte“ (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (1969))) eingeschätzt. Der Ast sollte dabei so entnommen werden, dass der Schnittpunkt zwischen Ast- und Schaftachse möglichst noch innerhalb der zu entnehmenden Stammrolle lag. Da die Astansatzhöhe bei überwallten Ästen nicht eingemessen werden konnte, wurde die Höhe der oberen Markierung der zu entnehmenden Stammrolle ermittelt und mit Kreide auf dem Stamm vermerkt. Befand sich sowohl der stärkste nicht überwallte Totast als auch der stärkste überwallte Ast innerhalb einer Metersektion, wurden beide Äste zur Entnahme vorbereitet. Das gleiche Verfahren wurde im Überschneidungsbereich von Totastzone und lebender Krone angewandt.

2.5.3 PROBENENTNAHME

Nachdem die Messungen abgeschlossen waren, konnten die markierten Proben entnommen werden. Überwallte Äste wurden entsprechend der zuvor erläuterten Markierungen entnommen. Sowohl nicht überwallte tote als auch lebende Äste wurden mit einem Teil des unter- und oberhalb des Astinsertionspunktes anschließenden Stammstücks entnommen. Die Äste selber wurden zur Erleichterung des Transports gegebenenfalls auf eine Länge von etwa 10 cm gekürzt. Bei einem Baum je Fläche wurden Astscheiben in verschiedenen Entfernungen zum Stamm entnommen. Dabei wurden zunächst Astscheiben bei 80%, 60%, 40% und 20% der Astlänge entnommen. Zusätzlich wurde eine Astscheibe in 30cm Entfernung vom Astansatz entnommen (vgl. LANGSHAUSEN (2009)).

Die entnommenen Stammscheiben wurden mit einer Angabe zur Himmelsrichtung, Flächennummer, Baumnummer und Entnahmehöhe versehen. Triebbasisnarben der Eiche mit anschließenden Triebstücken wurden mit Hilfe einer Astschere entnommen.

2.6 PROBENPRÄPARATION

Überwallte und nicht überwallte Totastproben wurden der Methode von MAGUIRE & HANN (1987), FUJIMORI (1993), MÄKINEN (2002) oder HEIN (2004) folgend, im Labor mit einer Bandsäge entlang der Stammachse aufgesägt.

Um die Messungen an den Astscheiben der lebenden Äste überprüfen zu können, die sich aufgrund der oftmals sehr eng angeordneten Jahrringe zum Teil recht diffizil gestaltete, sowie um den eventuellen Ausfall von Jahrringen feststellen zu können, wurde für jede entnommene und untersuchte Astscheibe eine Stammscheibe unterhalb des Schnittpunktes von Astachse und Stammachse sowie eine Stammscheibe des Stammbereichs unmittelbar oberhalb des Astes untersucht. Bisweilen musste allerdings auf die Entnahme einer Stammscheibe aufgrund knapper Sägeschnittführung verzichtet werden. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass für jede Astscheibe mindestens eine Stammscheibe präpariert und vermessen wurde. Die Astscheibe selbst wurde so entnommen, dass diese nicht mehr durch die Schwellung des Astkragens beeinflusst war.

2.7 TOTASTMESSUNGEN

An den aufgesägten und geschliffenen überwallten und nicht überwallten Totästen wurde eine Reihe dimensions- und zeitbezogener Parameter erhoben (siehe Abbildung 2).

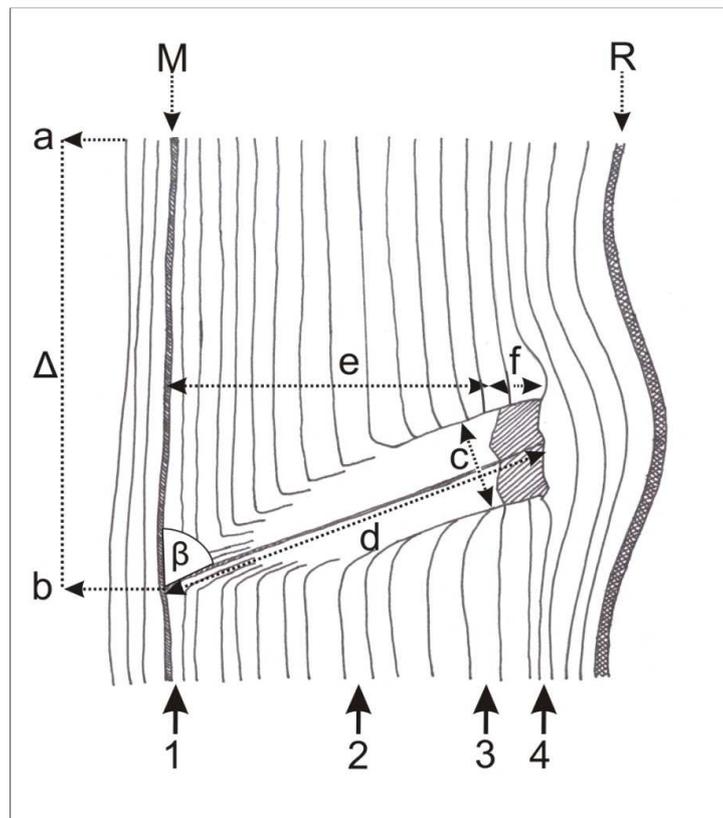


Abbildung 2: Vermessung der Totäste am Beispiel eines überwallten Totastes.

- β = Astansatzwinkel,
- a = Entnahmehöhe der Stammrolle (Referenz: obere Stirnseite),
- b = Schnittpunkt zwischen Astachse und Schaftachse (=Astansatzhöhe),
- Δ = Differenz zwischen Entnahmehöhe und Astansatzhöhe,
- c = Astdurchmesser,
- d = Länge der Astachse,
- e = Radius des lebendasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns,
- f = Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns,
- M = Mark,
- R = Rinde,
- 1 = Zeitpunkt der Astbildung,
- 2 = letztes lebendes Jahr (Eiche), letzter in den Ast führender Jahrring (Buche),
- 3 = Astmortalitätsjahr (Buche),
- 4 = Überwallungsjahr.

Weitere Erläuterungen siehe Text.

2.7.1 AUFNAHME DIMENSIONSBEZOGENER PARAMETER

Der Astdurchmesser (Abbildung 2: c) wurde an der breitesten Stelle im rechten Winkel zur Astachse gemessen. Der Astansatzwinkel (Abbildung 2: β) wurde analog zu den Astansatzwinkelmessungen am liegenden Baum als der Winkel zwischen Schaftachse und Astachse erhoben. Da sich der Astansatzwinkel eines Astes im Laufe seiner Biografie ändert, wurde die Astachse als die Achse zwischen der Streckenhalbierenden des Astdurchmessers und dem Schnittpunkt zwischen Ast- und Schaftachse definiert. Die Astansatzhöhe (Abbildung 2: b) wurde berechnet als die Differenz

(Abbildung 2: Δ) zwischen der Höhe der oberen Stirnseite der Probe (Abbildung 2: a), welche schon bei der Feldarbeit erhoben wurde und deren Distanz zum Schnittpunkt zwischen Schaftachse und Astachse. Die Länge der Astachse (Abbildung 2: d) wurde definiert als die Distanz zwischen dem Schnittpunkt von Astachse und Schaftachse und der Abbruchstelle des Astes. Dieses Maß wurde dem Astansatzwinkel folgend erhoben. Der Radius des asthaltigen Kerns (Abbildung 2: e+ f) bezeichnet ebenfalls die Distanz zwischen dem Schnittpunkt von Astachse und Stammachse und der Abbruchstelle des Astes, gleichwohl wurde hier die horizontale Distanz vermessen. Der Radius des asthaltigen Kerns teilt sich auf in den Radius des lebendasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns (Abbildung 2: e) und den Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns (Abbildung 2: f). Ersterer bezeichnet die horizontale Distanz zwischen dem Schnittpunkt von Astachse und Schaftachse und dem Beginn des verfärbten abgestorbenen Teils des Astes. Letzterer bezeichnet die horizontale Distanz zwischen dem Beginn des abgestorbenen Astteils und der Abbruchstelle des Astes.

2.7.2 AUFNAHME ZEITBEZOGENER PARAMETER:

Das Jahr der Astbildung (Abbildung 2: Zeitpunkt 1) wurde durch die Auszählung der Jahrringe direkt unterhalb des Schnittpunktes zwischen Schaftachse und Astachse ermittelt.

Zur Bestimmung des ersten Jahres, in dem der Ast kein Dickenwachstum mehr leistet sowie des letzten lebenden Jahrs des Astes existieren verschiedene Methoden. In Untersuchungen von RAPRAEGER (1939) (an *Pinus monticola*), MAGUIRE & HANN (1987) (an *Pseudotsuga menziesii*), FUJIMORI (1993) (an *Chamaecyparis obtusa*) und MÄKINEN (2002) (an *Betula pendula*) wird das Astmortalitätsjahr als dasjenige, bei welchem das Ende des der Jahrringverlaufs des Schaftes an der Schnittstelle zum Ast in Richtung Mark gekrümmt ist (Abbildung 2: Zeitpunkt 3), definiert. In der Konsequenz wurde die Anzahl der Jahrringe, welche noch nicht Richtung Mark gekrümmt sind, aber nicht mehr in den Ast einmünden, als die Anzahl der Jahre definiert, in welchen der Ast kein Dickenwachstum mehr leistete (Abbildung 2: Zeitpunkt 2 bis Zeitpunkt 3).

HEIN (2008) (an *Fagus sylvatica*) verwendete den Mittelwert der Zeitpunkte 2 und 3, um das Mortalitätsjahr zu schätzen. Allerdings ist dieses Vorgehen an die Prämisse gebunden, dass ausfallende Jahrringe im Ast (Abbildung 2: Zeitpunkt 2 bis Zeitpunkt 3) *per se* möglich sind. Die holzanatomischen und hydraulischen Charakteristiken der in diesen Arbeiten untersuchten Baumarten (Koniferen oder zerstreutporige Laubhölzer) könnten, wie in Kapitel 1.2.7.9 diskutiert, ein Ausfallen von Jahrringen prinzipiell ermöglichen.

HEIN (2004) (an *Acer pseudoplatanus* (zerstreutporig) und *Fraxinus excelsior* (ringporig)) hingegen definierte das letzte lebende Jahr als dasjenige, in welchem der letzte Jahrring des Schaftholzes in den Ast einmündet. Diese Methode impliziert, dass der Ast keine ausfallenden Jahrringe aufweist; er stirbt ab, sobald keine Jahrringe des Schaftholzes mehr in den Ast führen.

Basierend auf diesen Überlegungen und den zuvor in 1.2.7.9 diskutierten holzanatomischen und hydraulischen Charakteristiken von Eichen und Buchenholz wurde die Methode nach RAPRAEGER (1939), MAGUIRE & HANN (1987), FUJIMORI (1993) und MÄKINEN (2002) zur Bestimmung des Mortalitätsjahrs bei Totästen der Baumart *Buche* und die Methode nach HEIN (2004) zur Bestimmung des letzten lebenden Jahres bei Totästen der Baumart *Eiche* angewandt.

Ferner wurde das Überwallungsjahr (Abbildung 2: Zeitpunkt 4) als dasjenige bestimmt, in welchem der erste Jahrring den zu überwallenden Ast vollständig umschließt.

Alle aufgeführten Zeitpunkte wurden größtenteils an der Unterseite des Totastes bestimmt. Bei sehr schlechter Sichtbarkeit der Jahrringe mussten die Zeitpunkte in Ausnahmefällen kontralateral bestimmt werden. Das Astalter wurde berechnet als die Differenz zwischen dem Beginn des Jahres der Astbildung und dem Ende des Astmortalitätsjahres.

2.8 RADIALZUWACHSMESSUNGEN

Der Radialzuwachs wurde sowohl an den aus definierten Höhen entnommenen Stammscheiben (vgl. Kapitel 2.5.1), den Astscheiben der entnommenen lebenden Äste als auch deren ober- und unterhalb anschließenden Stammscheiben (vgl. Kapitel 2.6) mit Hilfe einer am Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg entwickelten Bildanalysesoftware¹⁴ und einem Digitalpositionimeter¹⁵ mit einer Genauigkeit von $\frac{1}{100}$ Millimeter vermessen.

Stockscheiben oder – keile wurden entlang von zwei Radien, die Stammscheibe aus 1,3m Schafthöhe entlang acht im 45° - Winkel zueinander stehenden Radien vermessen. Alle weiteren nach dem Standardprogramm entnommenen Stammscheiben sowie Stammscheiben, welche ober- und unterhalb der Äste entnommen wurden, wurden entlang vier rechtwinklig zueinander stehenden Radien beginnend mit dem Radius in Nordrichtung vermessen. Alle Ast- oder Stammscheiben, die einen Durchmesser von unter zwei Zentimetern aufwiesen sowie alle Astlängenscheiben wurden entlang von zwei im 180° -

¹⁴ WOODSCAN

¹⁵ Nach K. JOHANN, Typ 1

Winkel zueinander stehenden Radien vermessen, wiederum beginnend mit dem Radius in Nordrichtung.

Die Messstrecken wurden vor der Messung mit Hilfe einer Rasierklinge präpariert, mit Wasser benetzt oder mit verschiedenen den Kontrast erhöhenden Farbstoffen wie Kreide oder Markierstift eingefärbt. Mit diesen Maßnahmen konnte die Sichtbarkeit der Jahringgrenzen erhöht werden. Bei sehr eng zusammen liegenden Jahrringen bewährte es sich, die Jahrringe vor der eigentlichen Messung unter einem Mikroskop mit mittlerer bis starker Vergrößerung zunächst zu lokalisieren und mit einem Bleistiftpunkt zu markieren.

Alle Stammscheiben und Astscheiben größeren Durchmessers mit deutlich zu erkennenden Jahrringen wurden mit Hilfe der Bildanalysesoftware (vgl. Fußnote 14) vermessen. Alle weiteren Astscheiben wurden zur besseren Sichtbarkeit mit Hilfe des Digitalpositiometers (vgl. Fußnote 15) vermessen. An den die Triebbasisnarben enthaltenden Triebstücke wurden auf Ober- und Unterseite Jahringzählungen durchgeführt, um Rückschlüsse darüber ziehen zu können, ob die Triebbasisnarbe den Beginn eines regulären Triebes oder den Beginn eines Johannistriebes kennzeichnet (vgl. Kapitel 2.5.1).

Die Einzelmessungen der jeweils gemessenen Radien wurden durch die Bildung eines jährlichen quadratischen Mittels zu einem Wert zusammengeführt. In dieser Arbeit wurde der Wert der unabhängigen Variablen „durchschnittlicher Radialzuwachs“ durch die Bildung des arithmetischen Mittels der jährlichen Radialzuwächse einer Scheibe hergeleitet.

Nach der Radialzuwachsmessung wurde eine Kreuzdatierung der gemessenen Radialzuwächse der Astscheiben und der dazugehörigen Stammscheiben anhand synchroner Übereinstimmungen der jeweiligen Wachstumsmuster durchgeführt. Dies diente der Diagnose von bei der Messung übersehenen Jahrringen, was insbesondere in den äußeren, oftmals engringigen Randbereichen der Äste gelegentlich vorkam. Zum anderen konnten so auch Jahringausfälle bei der Baumart Buche festgestellt werden, welche in den äußeren Randbereichen des Astes, also in den letzten Lebensjahren vor der Probenentnahme auftraten (vgl. MÄKINEN (2002)).

2.9 RINDENSTÄRKENMESSUNG AN STAMM UND ÄSTEN

Um eine Rindenfunktion für Stammholz erstellen zu können, wurde im Zuge der Totastvermessungen die Rindenstärke an beiden Stirnseiten der Stammrolle protokolliert, welche anschließend arithmetisch zu einem Durchschnittswert gemittelt wurden. Des Weiteren wurden an einer Unterstichprobe der

entnommenen Äste ebenfalls Rindenstärkenmessungen vorgenommen. Dabei wurde die Rindenstärke entlang vier in die Haupthimmelsrichtungen weisenden Radien vermessen; die durchschnittliche Rindenstärke wurde anschließend mit Hilfe des arithmetischen Mittelwerts berechnet.

2.10 DATENAUFBEREITUNG

Die Datenaufbereitung gliederte sich in 3 Teilbereiche: die Berechnung des Kronendurchmessers, die Berechnung des jährlichen Höhenzuwachses und die Bestimmung des Astalters aller am liegenden Baum vermessenen Äste.

Der Kronendurchmesser wurde nach der von SPIECKER (1991) entwickelten Methode über die „als Kreisfläche betrachtete Kronenschirmfläche hergeleitet, welche wiederum aus der Flächensumme der n Teildreiecke einer mit n Lotpunkten auf den Boden projizierten Baumkrone abgeleitet wird“ (LANGSHAUSEN (2009)). Eine detaillierte methodische Beschreibung hierzu findet sich ebenda.

Die Höhenentwicklung wurde nach der Formel

$$h_{ij} = h_j + \frac{\left(\frac{h_{i+1} - h_i}{r_i - r_{i+1}}\right)}{2} + (j - 1) * \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{r_i - r_{i+1}}\right)$$

Formel 2: Berechnung der Höhenentwicklung auf Grundlage der Stammanalyse (Darstellung der Formel sowie Terminologie entnommen aus HEIN (2004)).

ermittelt, wobei:

h_{ij} = berechneter Höhenzuwachs für das Jahr j auf Basis der Stammscheibe i

h_i = Entnahmehöhe der i - ten Stammscheibe

r_j = Anzahl der Jahrringe auf der i - ten Stammscheibe

j = Nummer des Jahrrings beginnend mit dem innersten Jahrring

Für die Ermittlung des Höhenzuwachses standen neben den dafür entnommenen Stammscheiben aus fixen Höhen (vgl. Kapitel 2.5.1) auch die Stammscheiben zur Verfügung, welche im Rahmen der Astradialzuwachsmessungen ober- und unterhalb des Astes entnommen und ebenfalls vermessen wurden (vgl. Kapitel 2.6). Die Grundlage des erstellten Höhenmodells (vgl. Kapitel 4.1.1.1) bildeten, um Fehlinterpretationen bezüglich der Alters- Höhenrelation zu vermeiden, jedoch nur Daten, welche

an Bäumen der Kraft'schen Klasse 1 und 2 erhoben wurden. Die Minimalbelegung je Baumart wurde auf 2 Höhenwerte in jedem Alter festgelegt.

Das Astbildungsjahr konnte nach der Berechnung des jährlichen Höhenzuwachses über die aufgenommene Astansatzhöhe bestimmt werden.

Das Astalter wurde nach der Formel

$$\text{Alter}_{Ast} = (T_F - T_{AB}) + 1$$

Formel 3: Berechnung des Astalters.

berechnet, wobei:

Alter_{Ast} = Astalter [Jahre]

T_F = Fällungsjahr (hier: 2008)

T_{AB} = Astbildungsjahr

Der mittlere Baumabstand kann mit Hilfe des Kronendurchmessers sowie einer Annahme über den durchschnittlichen Überschirmungsgrad bei Unterstellung eines Dreiecksverbands berechnet werden:

$$d = 2 * \sqrt{\frac{F * \sqrt{3}}{6}}$$

Formel 4: Berechnung des Baumabstands nach SPIECKER (2011).

wobei:

d = Baumabstand [m]

F = Standfläche (=Summe der Kronenschirmfläche und dem nicht überschrmtten Flächenanteil) des Baumes [m²]

2.11 HERLEITUNG DES STICHPROBENUMFANGS

In der vorliegenden Arbeit sollen Modelle für zwei unterschiedliche Hierarchieebenen erstellt werden, was die Berechnung eines Stichprobenumfangs auf Einzelastebene erschwerte. Aus diesem Grund wurde der Stichprobenumfang nur für die Einzelbaumebene über die Anzahl der gewünschten

unabhängigen Variablen der jeweiligen einzelbaumbasierten Wachstumsmodelle festgelegt (vgl. Kapitel 2.1.1).

Die Bestimmung des benötigten Stichprobenumfangs erfolgte nach der von SCHENDERA (2008) beschriebenen Faustregel

$$N \geq 50 + 8m$$

Formel 5: Berechnung des Stichprobenumfangs nach SCHENDERA (2008).

wobei:

N = Stichprobengröße

m = gewünschte Anzahl der Prädiktoren im Modell, welche basierend auf den Ergebnissen der Literaturstudie auf maximal 3 festgelegt wurde.

Daraus errechnet sich ein Stichprobenumfang auf Einzelbaumebene von 74 Bäumen je Baumart. Auf die drei ausgewählten Höhenstufen aufgeteilt ergibt sich somit ein Stichprobenumfang von etwa 25 Bäumen je Baumart, welche aus insgesamt 15 Beständen (5 in jeder Höhenstufe) ausgewählt werden sollten. Da nicht alle Bestände (oder Bäume) die zuvor aufgestellten Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Gleichaltrigkeit von Beständen der Baumart Buche, erfüllten, und somit ersatzlos gestrichen werden mussten, wurde folgender Stichprobenumfang erhoben:

		Buche	Eiche
Höhenstufe 10%- 20%	Bestände [N]	5	5
	Bäume [N]	25	24
Höhenstufe 30%- 40%	Bestände [N]	4	5
	Bäume [N]	20	25
Höhenstufe 50%- 60%	Bestände [N]	5	5
	Bäume [N]	24	25
Insgesamt/ Baumart	Bestände [N]	14	15
	Bäume [N]	69	74
Insgesamt	Bestände [N]	29	
	Bäume [N]	143	

Tabelle 3: Stichprobenumfang aufgeteilt nach Baumart und Höhenstufen.

2.12 DATENAUSWERTUNGEN

2.12.1 FEHLENDE WERTE UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNGEN

Am Beginn der Datenaufbereitung steht die Identifikation und gegebenenfalls Ergänzung fehlender Werte (PRETZSCH (2002)). Fehlende Werte traten während der Datenaufnahme dieser Arbeit aus verschiedenen Gründen auf. Trotz vorsichtiger Fällung brachen während des Fällvorgangs insbesondere bei der Baumart Buche vermehrt Totäste und in einigen Fällen auch lebende Äste ab. Eine nachträgliche Zuordnung abgebrochener Äste zur jeweiligen Abbruchstelle war nur in einigen Fällen möglich, wenn der Ast, was häufig bei Totästen vorkam, ohne einen Aststummel zu hinterlassen, abbrach. Hinterließ der abgebrochene Ast einen solchen, konnte er diesem in vielen Fällen anhand der Abbruchkante zugeordnet werden. Während der Fällung wurden die Äste gerade von älteren Bäumen beim Aufschlag des Baumes auf den Boden auf der unteren Seite bisweilen vollständig zerstört, so dass eine Messung nicht mehr möglich war.

Die Aufnahme von Ästen der Kronen älterer Bäume gestaltete sich häufig diffizil, da Äste auf der dem Boden zugewandten Seite oft schlecht zu messen waren oder sogar manchmal übersehen wurden. Gerade aufgrund der oft sehr geringen Größe des Probenmaterials kam es trotz größtmöglicher Vorsicht zum Verlust einiger Proben insbesondere auf Transportwegen (Bestand- Labor). Fehlende Werte traten zudem durch vereinzelte Ablösung der Aluminiumetiketten während des Transports oder des Trockenvorgangs vom Probematerial auf. Diese Äste konnten nicht mehr zugeordnet werden.

Die Vermessung des liegenden Baumes ermöglichte den Vergleich und gegebenenfalls die Korrektur der am stehenden Baum aufgenommenen Parameter. Der Kronenansatz sowie der Ansatz des untersten nicht überwallten Totastes mit einer Aststummellänge von über einem Zentimeter, welche am stehenden Baum erhoben wurden, konnten anhand der eingemessenen Astansatzhöhe am liegenden Baum gut überprüft werden. Aus diesem Grund wurde auch ein mehrmaliges Einmessen der Parameter von verschiedenen Seiten, wie es zum Beispiel von HEIN (2004) oder LANGSHAUSEN (2009) durchgeführt wurde, nicht für nötig erachtet. Die vom Boden aus gemessene Baumhöhe wurde anhand der am liegenden Baum gemessenen Baumlänge verifiziert. Durch den unterschiedlichen Messvorgang (Höhenmessung mittels elektronischem Distanz- und Winkelmessgerät versus Längenmessung mit Hilfe des Maßbands) konnten beide Werte nicht identisch sein, zumal die Längenmessung durch vertikal abstreichende Äste erschwert und zum Teil auch verfälscht wurde. Es war davon auszugehen,

dass die vom Boden aus gemessene Höhe immer geringer als die am liegenden Stamm gemessene Länge sein musste, was bei allen Probebäumen der Fall war.

Kronenablotungen wurden durch Visualisierung der Schirmflächenform mit Hilfe einer für diesen Zweck am Institut für Waldwachstum entwickelten Software auf ihre Plausibilität hin überprüft. Gerade bei der Notierung der Richtungswinkel der Lotpunkte konnten so einige Fehler festgestellt und anhand der Grafik berichtigt werden.

Radialzuwachsmessungen der einzelnen Stammscheiben wurden zunächst innerhalb eines Baumes und danach innerhalb des Bestandes verglichen, um Messfehler zu ermitteln. Wichen die Messungen stark voneinander ab, wurden die Stammscheiben nochmals gemessen. Radialzuwachsmessungen der Astscheiben wurden zunächst den Messungen der ober- und unterhalb ansetzenden Stammscheibe gegenübergestellt. Danach wurden die Messungen der einzelnen Astscheiben je Baum verglichen. Unterschieden sie sich in der Anzahl der Jahrringe oder wichen die Messungen stark voneinander ab, wurden die Astscheiben nochmals vermessen. Die Visualisierung der Messgrößen in Form von Punktwolken diente zur Aufdeckung von Übertragungsfehlern der Daten aus den Aufnahmebögen in digitale Form.

Das mit Hilfe der Stammanalyse retrospektiv konstruierte Höhenwachstum für die Baumart Buche konnte anhand der im Rahmen der Arbeit von TOJIC (2010) vorliegenden Höhenanalysen überprüft werden, welche dankenswerterweise vom Autor zu diesem Zweck bereitgestellt wurden. Die Relationen zwischen Schaftdurchmesser und Kronendurchmesser konnten ebenfalls für die Baumart Buche anhand von Originaldaten, welche im Rahmen der Arbeit von LANGSHAUSEN (2009) aufgenommen und von diesem Autor ebenfalls freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, überprüft werden.

Alle durchgeführten Korrekturen wurden in den Urlisten kenntlich gemacht.

2.12.2 STATISTISCHE DATENAUSWERTUNG

Der gesamte Datensatz dieser Arbeit umfasst stetige und diskrete Variablen. Stetige Variablen liegen intervallskaliert (z.B. Baumalter) oder verhältnisskaliert (z.B. Astdurchmesser) vor, diskrete Variablen dichotom (Synonym: binär) (z.B. Baumart). Alle statistischen Datenauswertungen dieser Arbeit

erfolgten mit Hilfe des Statistikpakets PASW (2010) und der Funktion „nls“ des Statistikpakets R¹⁶ (R DEVELOPMENT CORE TEAM (2010)). Das gewählte Signifikanzniveau des α - Fehlers liegt in dieser Arbeit bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$.

2.12.2.1 LINEARE REGRESSION

Mit Hilfe der linearen Regression werden die Koeffizienten der linearen Gleichung unter Einbeziehung einer oder mehrerer unabhängiger Variablen geschätzt, die den Wert des Regressanden am besten vorhersagen. Im Unterschied zur Korrelationsanalyse liegt bei der Regressionsanalyse eine vorgegebene Kausalrichtung vor (SCHENDERA (2008)), welche zuvor theoretisch ermittelt wird.

In dieser Arbeit wurde die schrittweise Regressionsmethode gewählt, bei welcher die ausgewählten Variablen nacheinander in die Gleichung aufgenommen werden. Bei jedem Schritt wird dabei die Variable mit der kleinsten F-Wahrscheinlichkeit aufgenommen, sofern diese unter der zuvor bestimmten Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ liegt. Variablen, welche bereits in der Regressionsgleichung enthalten sind, unterliegen dabei einer ständigen Prüfung. Sie werden wieder aus der Gleichung entfernt, wenn ihre F-Wahrscheinlichkeit nach der Aufnahme weiterer Variablen das gewählte Signifikanzniveau überschreitet. Die Parameterschätzer wurden mit einem t - Test überprüft, die Signifikanz des Beitrags einer unabhängigen Variablen zur Erklärung der Gesamtstreuung wurde mit Hilfe eines partiellen F- Tests überprüft. Das Gesamtmodell wurde mit einem F - Test auf Signifikanz geprüft. Da der Determinationskoeffizient bei Modellen mit mehreren Einflussvariablen auch von der Anzahl der unabhängigen Variablen abhängt (SCHENDERA (2008)), wurde zur Beurteilung der Modellanpassung auf das korrigierte Bestimmtheitsmaß (r^2_{adj}) zurückgegriffen, welches um die Anzahl der unabhängigen Variablen korrigiert ist.

Die im Rahmen der Regressionsanalyse erfolgte Variablenauswahl gründete in der Prämisse der Parsimonität. Erstellte Modelle sollten hinsichtlich des Modelltypus möglichst einfach, praktikabel und biologisch plausibel sein. Die Suche nach einem optimalen Modell kann auch mit Hilfe des AICs (*Information Criterion*) erfolgen. Das AIC Kriterium bietet die Möglichkeit, eine Balance zwischen „overfit“ (zu viele Parameter, die zu Pseudoeffekten oder Artefakten führen) und „underfit“ (zu wenige Parameter, was das Risiko erhöht, dass wichtige Zusammenhänge übersehen werden) in der

¹⁶ Im Laufe der Bearbeitungszeit kamen die Versionen 2.5.1 bis 2.11.1 zum Einsatz.

Modellbildung zu finden (vgl. BURNHAM et al. (1995), ANDERSON et al. (2000), SACHS & HEDDERICH (2006)).

Das Maß für die Anpassungsgüte ist dabei als maximale Wahrscheinlichkeit

$$AIC = -2 \log(\text{likelihood}) + 2k$$

Formel 6: Berechnung des AIC mit Hilfe des -2LL (SACHS & HEDDERICH (2006)).

wobei:

k = Anzahl der Modellparameter inklusive Absolutglied und Fehlerterm ε

oder als minimale Varianz der Residuen formuliert, womit der AIC direkt angegeben werden kann:

$$AIC = n * \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2 * k$$

Formel 7: Berechnung des AIC mit Hilfe der Summe der quadrierten Residuen (SACHS & HEDDERICH (2006)).

wobei:

n = Anzahl der Beobachtungen

RSS = Summe der quadrierten Residuen

Ziel ist es dabei, einen möglichst kleinen Wert für das AIC - Kriterium zu erhalten (SACHS & HEDDERICH (2006)). In dieser Arbeit wurde das AIC - Kriterium zur Absicherung dann berechnet, wenn eine Variable durch die schrittweise Regressionsmethode ausgewählt wurde, deren Beitrag zur Verringerung der Gesamtstreuung weniger als ein Prozent betrug.

Bei der Berechnung linearer Regressionen müssen zahlreiche Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst ist es erforderlich, dass die Daten stetig skaliert vorliegen; jedoch ist es nach SCHENDERA (2008) auch möglich, dichotom kodierte Dummy- Variablen inklusive ihrer Interaktionen mit in die Regressionsanalyse einzubeziehen. Zwischen den Messwerten der abhängigen und der unabhängigen Variable muss eine lineare Beziehung bestehen. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, ist es in vielen Fällen möglich, die Beziehung durch Transformation der Variablen zur linearisieren (BACKHAUS (1996)). Damit die Methode der kleinsten Quadrate zu bestimmten gewünschten Schätzeigenschaften (BLUE= **B**est **L**inear **U**nbiased **E**stimator) führt sowie Signifikanztests für die Regressionskoeffizienten

durchgeführt werden können, werden für die Residuen folgende Eigenschaften ihrer Verteilung vorausgesetzt (JANSSEN & LAATZ (2005)):

Normalverteilung der Residuen. Diese wurde mit Hilfe eines Histogramms sowie eines Normalverteilungsdiagramms visualisiert und beurteilt. Zur Absicherung wurde in manchen Fällen der Kolmogorow – Smirnow - Test sowie der Shapiro – Wilk - Test herangezogen. Ist die Modellbedingung der Normalverteilung verletzt, können die statistischen Signifikanzprüfungen nicht mehr vorgenommen werden (JANSSEN & LAATZ (2005)). In diesen Fällen muss eine Variablentransformation vorgenommen werden (ebenda).

Unabhängigkeit der Regressoren. Das lineare Regressionsmodell basiert auf der Voraussetzung, dass die unabhängigen Variablen nicht exakt linear voneinander abhängig sind (BACKHAUS (1996)). Dieser als Multikollinearität bekannte Sachverhalt wird mit zunehmender linearer Abhängigkeit zum Problem, da es zu einer zunehmenden Ineffizienz der Schätzwerte führt (ebenda). Bemerkbar wird dies zum Beispiel durch eine sprunghafte Änderung des Wertes oder des Vorzeichens der Regressionskoeffizienten, sobald das Datenmaterial geringfügig geändert wird. Das Ausmaß der Multikollinearität wurde in dieser Arbeit mit Hilfe des *Variance Inflation Factors* (VIF) geprüft. Für einen VIF von über 10 ist Multikollinearität zu vermuten (FREUND et al. (2006), SACHS & HEDDERICH (2006), SCHENDERA (2008)). Es handelt sich hierbei jedoch um einen Erfahrungswert, welcher keine theoretische Grundlage besitzt. Eine Möglichkeit, hoher Multikollinearität zu begegnen besteht darin, dass eine oder mehrere Variablen aus der Regressionsgleichung entfernt werden (BACKHAUS (1996)). Um das Ausmaß eventuell vorliegender Multikollinearität und deren Wirkung auf die Zuverlässigkeit der Parameterschätzung bewerten zu können, empfehlen FREUND et al. (2006), den jeweiligen VIF hinsichtlich der Gesamtanpassung des erstellten Modells unter Verwendung der Formel

$$\frac{1}{1 - R_{Modell}^2}$$

Formel 8: Evaluierung des VIF- Werts anhand des Bestimmtheitsmaßes FREUND et al. (2006).

zu evaluieren. VIF- Werte, die diese Größe übersteigen, weisen auf einen Zusammenhang zwischen den im Modell verwendeten unabhängigen Variablen hin, der stärker ist als der Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen und dem Regressanden, was die Parameterschätzung in ihrer

Zuverlässigkeit beeinträchtigt. Eine weitere Vorgehensweise, um das Ausmaß der Multikollinearität zu beurteilen, ist die Prüfung der Stabilität der Regressionskoeffizienten bezüglich Betrag und Vorzeichen. In dieser Arbeit wurde in Zweifelsfällen für mehrere zufällig ausgewählte Teilstichproben eine separate Regression angepasst. Mit Hilfe dieser Analyse konnte festgestellt werden, ob Vorzeichen oder Betrag der Parameterschätzer sehr starken Änderungen unterlagen oder akzeptable Stabilität aufwiesen.

Unabhängigkeit der Residuen (SCHENDERA (2008)). Sind Residuen aufeinander folgender Fälle voneinander abhängig, also korreliert, spricht man von Autokorrelation, welche zu erheblichen Verzerrungen bei der Ermittlung des Standardfehlers und somit auch der Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten führt (BACKHAUS (1996)). Die Durbin – Watson - Statistik (d) diente in dieser Arbeit zur Überprüfung der Abhängigkeit eines Residualwerts von seinem direkten Vorgänger (Autokorrelation erster Ordnung), welche die Nullhypothese „Autokorrelation ist gleich Null“ prüft (SCHENDERA (2008)). Niedrige Werte der Durbin – Watson - Statistik deuten auf positive Autokorrelation hin, hohe Werte auf negative Autokorrelation (BACKHAUS (1996)). Für die Beurteilung, ob bestimmte Grenzbereiche in Richtung Signifikanz überschritten wurden, wurden für Regressionen, welche auf einer Anzahl ≤ 200 Beobachtungen basieren, die Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977) (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$) herangezogen; für Regressionen, welche für eine größere Anzahl an Beobachtungen (≤ 2000) erstellt wurden, wurden die Tabellenwerke nach STANFORD UNIVERSITY (2010) (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$) verwendet.

Im Rahmen autoregressiver Schemata kann das Problem der Autokorrelation zwar häufig behoben werden (KEELE & KELLY (2006)). Hierbei werden Regressionsgleichungen mit einer sogenannten Lagvariable verknüpft (YAMANE & ZUBROD (1976)), welche eine um eine oder mehrere Perioden zeitverzögerte unabhängige Variable darstellt. Die zuvor beschriebene Durbin – Watson - Statistik unterschätzt Autokorrelation in autoregressiven Modellen und kann hier somit nur noch in seiner modifizierten Form, der Durbin-H- Statistik, verwendet werden (ANDREN (2007)):

$$h = a \sqrt{\frac{n}{1 - n\hat{V}(b_1)}}$$

Formel 9: Durbin-H-Statistik nach DURBIN (1970).

wobei:

$$a = 1 - \frac{1}{2}d$$

n = Anzahl der Beobachtungen

$n\hat{V}(b_1)$ = geschätzte Varianz des Regressionskoeffizienten der Lagvariable (Standardfehler der Lagvariablen²) (ANDREN (2007)).

Entsprechende Grenzwerte sind der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung zu entnehmen (ANDREN (2007)). Jedoch stehen Autoren neuerer Untersuchungen dem Einschluss einer Lagvariable bei vorliegender Autokorrelation sehr kritisch gegenüber, da es dadurch zu Verzerrungen der Regressionskoeffizienten weiterer Regressoren kommen kann (vgl. ACHEN (2000), KEELE & KELLY (2006)). Ferner wird berichtet, dass der Einfluss zuvor bedeutender Regressoren nach Einschluss von Lagvariablen vermindert wurde oder sogar keine Signifikanz mehr aufwies (vgl. ACHEN (2000), KEELE & KELLY (2006)).

Eine zentrale Annahme der multiplen Regression ist die **Homoskedastie**, welche fordert, dass die Varianz der Fehler für alle vorhergesagten Werte der abhängigen Variable konstant ist (SCHENDERA (2008)). Heteroskedastizität hingegen verfälscht den Standardfehler der Regressionskoeffizienten und verzerrt somit die Schätzung des Konfidenzintervalls. Ob das Modell die Annahme der Homoskedastie erfüllt, wurde visuell anhand des Verlaufsmusters der Residuen durch die Darstellung der Beziehungen zwischen den Residualwerten und einer erklärenden Variable in einem Streudiagramm beurteilt. Bei starker Heteroskedastizität kommt eine Transformation der abhängigen Variablen oder die Durchführung einer gewichteten Regression in Frage (vgl. BACKHAUS (1996), JANSSEN & LAATZ (2005)).

Für den Baumartenvergleich wurden die jeweils für die einzelne Baumart erstellten linearen Regressionsmodelle mit Hilfe einer dichotomen Dummy - Kodierung für die Variable Baumart („0“= Buche; „1“= Eiche) und der Bildung deren Interaktionsterme gegeneinander kontrastiert (vgl. LAROCQUE G. R. & MARSHALL P. L. (1994), COOMES & GRUBB (1998), HEIN (2004) oder ANDREN (2007)). Dabei wurde jeweils getestet, ob die für die Baumart Eiche („1“) gefundenen Parameterschätzer des Interzepts oder des Steigungskoeffizienten sich signifikant von denen der Baumart Buche („0“) unterscheiden.

In Einzelfällen wichen die mit der *stepwise* - Prozedur gewählten Variablenkombinationen für die baumartenspezifisch angepassten Modelle von einander ab. In diesen Fällen wurde versucht, die Variablenkombinationen der Modelle beider Baumarten zu vereinheitlichen, was das Bestimmtheitsmaß

in manchen Fällen etwas verminderte. Dies wurde jedoch in Kauf genommen, um den Baumartenvergleich zu ermöglichen. Sofern die gewählte Variablenkombination von der durch die stepwise- Prozedur gewählten abwich, wurde dies im jeweiligen Fall deutlich gemacht.

2.12.2.2 NICHT- LINEARE REGRESSION

Im Gegensatz zur linearen Regression konnten bei der nicht-linearen Regression die Schätzer der Koeffizienten nicht analytisch bestimmt werden, sondern mussten iterativ ausgewählt werden. Die erforderlichen Startwerte wurden explorativ ermittelt. Die Modellauswahl erfolgte hier auf der Basis der Standardfehler sowie der Residualdiagnostik. Der Methode von KINT et al. (2010) folgend, wurde das Pseudo - r^2 , welches als die quadrierte Produkt – Moment - Korrelation zwischen den echten und den vom Modell vorhergesagten Werten definiert wurde, für das nicht - lineare Höhenmodell berechnet und evaluiert.

2.12.2.3 BINÄRE LOGISTISCHE REGRESSION

Mit Hilfe der binären logistischen Regression können Fragestellungen bearbeitet werden, die sich mit Eintrittsmöglichkeiten der abhängigen Variablen beschäftigen (SCHENDERA (2008)). Dabei handelt es sich um einen Modelltypus für intervallskalierte Prädiktoren und einer dichotom skalierten abhängigen Variable (ebenda). Jedoch können auch dichotome Variablen als Prädiktoren aufgenommen werden, wenn diese 0/1 - skaliert sind (SACHS & HEDDERICH (2006)). Mittels der logistischen Regression lässt sich die Relevanz von Prädiktoren bestimmen, lassen sich die Einflussgrößen schätzen, lässt sich ein Ereignis vorhersagen und die Güte des erstellten Modells beurteilen (SCHENDERA (2008)).

Da der Gegenstand der Modellbildung die Modellierung der unbekanntes Eintrittswahrscheinlichkeit der Zielgröße in Abhängigkeit verschiedener unabhängiger Variablen ist, kann das Ergebnis nur zwischen Eins („Ereignis tritt ein“) und Null („Ereignis tritt nicht ein“) liegen. Aus diesem Grund kann hier keine einfache lineare Regressionsanalyse verwendet werden (SACHS & HEDDERICH (2006)). Jedoch lassen sich die Funktionswerte mit Hilfe der Transformation

$$p(y) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 * x_1)}}$$

Formel 10: Transformation der Funktionswerte im Zuge der binären logistischen Regression (FIELD (2009)).

auf den Bereich zwischen Null und Eins begrenzen (SACHS & HEDDERICH (2006)). Für $b_1 > 0$ steigt die Funktion mit wachsendem x_1 monoton an; das Risiko nimmt zu. Für $b_1 < 0$ fällt die Funktion mit wachsendem x_1 monoton; das Risiko nimmt ab (ebenda). Als Regressionsmethode wurde die schrittweise Rückwärtsmethode angewandt, welche der in PASW (2010) ebenfalls angebotenen vorwärtsgerichteten schrittweisen Methode vorzuziehen ist (SCHENDERA (2008)). Die Überprüfung der Nullhypothese $H_0: b_i = 0$ wird bei der logistischen Regression mit Hilfe der Wald - Statistik (SACHS & HEDDERICH (2006)) durchgeführt.

Die Prüfung der Modellgüte des Gesamtmodells erfolgt unter anderem durch den Hosmer – Lemeshow - Anpassungstest (*HL - Test*), einem modifizierten Pearson - χ^2 - Test (SCHENDERA (2008)). Zusätzlich liefern die deskriptiven Maße der Pseudo - r^2 nach Cox und Snell sowie nach Nagelkerke Hinweise auf die Anpassungsgüte des Gesamtmodells (ebenda).

Ein wichtiges Maß zur Beurteilung der prädikativen Effizienz des Modells ist der Gesamtanteil der durch das Modell korrekt vorhergesagten Gruppenzugehörigkeiten. Des Weiteren werden die Spezifität, welche den Anteil der korrekt vorhergesagten *negativen* Gruppenzugehörigkeiten ausdrückt sowie die Sensitivität, welche dem Anteil der vom Modell korrekt vorhergesagten *positiven* Gruppenzugehörigkeiten entspricht, begutachtet. Werte unter 80% pro Gruppenzugehörigkeit sind dabei nicht akzeptabel (SCHENDERA (2008)). In dieser Arbeit wurde mittels einer Trennwertanalyse derjenige Trennwert zwischen den Ereignissen „0“ und „1“ ermittelt, bei welchem der Youden - Index (Sensitivität + Spezifität - 1) (YOU DEN (1950)) sein Maximum erreicht (HEIN & WEISKITTEL (2010)). Dieser wird als der den Daten am besten angepasste Trennwert betrachtet, bei welchem die Summe der fehlerhaften Gruppenzuweisungen durch das Modell sein Minimum erreicht (ebenda).

Ein weiteres Maß, das zur Beurteilung der prädikativen Effizienz herangezogen wurde, ist die Fläche unter der so genannten „Receiver operating characteristic“ - (oder kurz ROC -) Kurve, eine grafische Darstellung der Sensitivität und Spezifität. Die diagonale Linie des Diagramms repräsentiert die Situation, in welcher das binäre Ergebnis vollkommen zufällig erraten werden würde. Die Fläche unter dieser diagonalen Linie ist AUC („Area under curve“) = 0,5. Jedes Ergebnis, welches zu einem AUC Wert von $> 0,5$ führt, verringert den Fehler der Vorhersage des Modells. Der AUC sollte mindestens einen Wert von 0,7 bis 0,8 annehmen, Werte über 0,8 weisen auf eine exzellente Unterscheidungskraft des Modells zwischen den Gruppen hin (HEIN & WEISKITTEL (2010)).

Wird für die Daten beider Baumarten gemeinsam eine logistische Regression berechnet, kann die Chance, dass das Ereignis unter gleichen Voraussetzungen eintritt und welche vom Statistikprogramm als „*Odds Ratio*“ (OR) ausgegeben wird, durch

$$RR = \frac{OR}{1 - P_0 + (P_0 * OR)}$$

Formel 11: Berechnung des *Risk Ratios* ZHANG & YU (1998).

in ein Wahrscheinlichkeitsverhältnis, das so genannte „*Risk Ratio*“ (RR) umgewandelt werden.

Dabei bezeichnet:

OR = Odds Ratio

P₀ = Prozentualer Anteil der eingetretenen Ereignisse („1“) an den gesamten Ereignissen

Eine Voraussetzung der logistischen Regression ist der Ausschluss von Multikollinearität. Die Toleranzmaße können ermittelt werden, indem für dasselbe Modell eine lineare Regression berechnet wird (SCHENDERA (2008)). Dieses Vorgehen ist zulässig, weil bei der Ermittlung der Toleranzmaße nur die Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen von Bedeutung sind, die abhängige Variable ist irrelevant (ebenda).

2.12.2.4 VERGLEICH ZWEIER ODER MEHRERER MITTELWERTE

Voraussetzung für die Durchführung eines t - Tests beziehungsweise einer Varianzanalyse ist die Normalverteilung der zu testenden Daten. Liegen die Daten jedoch nicht normalverteilt vor, ist es möglich, diese durch geeignete Transformationen in eine Normalverteilung zu überführen, ein Bootstrap - Verfahren einzusetzen oder nicht - parametrische Tests anzuwenden. In dieser Arbeit wird der Man – Whitney – U - Test („*u - Test*“) als nicht parametrische Variante des t - Tests verwendet. Das Bootstrap¹⁷ - Verfahren wird dann angewendet, wenn keine nicht- parametrische Alternative, wie zum Beispiel im Fall der Kovarianzanalyse¹⁸ (ANCOVA), mehr vorliegt.

¹⁷ Bootstrap ist eine Technik, bei welcher die Verteilung einer Stichprobe durch Ziehung wiederholter Stichproben geschätzt werden kann (FIELD (2009)).

¹⁸ Die Kovarianzanalyse ermöglicht die Integration einer Kovariate in die Varianzanalyse, deren Einbeziehung sinnvoll und notwendig ist (BACKHAUS (1996)).

Neben der Angabe der jeweiligen Teststatistik, der Freiheitsgrade und der Signifikanz wird beim Vergleich zweier oder mehrerer Mittelwerte in dieser Arbeit die Effektstärke angegeben. Mit Hilfe dieses Wertes ist es möglich, das Ergebnis objektiv zu beurteilen, da bei großen Stichprobenumfängen unter Umständen ein sehr geringer Unterschied der Mittelwerte trotzdem zu einem signifikanten Ergebnis des jeweiligen Tests führen kann. In dieser Arbeit wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson (r) als Maß für die Effektstärke beim Vergleich zweier Mittelwerte mit Hilfe des u - Tests angegeben. Im Rahmen der Kovarianzanalyse wird die partielle Effektstärke η^2 berechnet (vgl. FIELD (2009)).

2.13 HILFSFUNKTIONEN ZUR ERMITTLUNG DES RINDENANTEILS

Um gemessene Daten und retrospektiv ermittelte Daten (Astdurchmesser überwallter Äste, Schaftdurchmesserentwicklung der vergangenen Jahre) ineinander überführen zu können, war es notwendig, den Rindenanteil für den Schaft als auch für die Äste zu bestimmen. Dabei erwiesen sich sowohl der Schaftdurchmesser wie auch der Astdurchmesser als geeignete Regressoren. Die Hilfsfunktion wurde so konstruiert, dass sich der Schaft- bzw. Astdurchmesser mit Rinde direkt aus dem Schaft- bzw. Astdurchmesser ohne Rinde schätzen lässt und *vice versa*:

$$D = a + b * D_{(OR)}$$

Formel 12: Modell zur Bestimmung des Rindenanteils.

wobei:

D = Schaftdurchmesser [cm] bzw. Astdurchmesser [mm] mit Rinde

$D_{(OR)}$ = Schaftdurchmesser [cm] bzw. Astdurchmesser [mm] ohne Rinde

Die betreffenden Daten zur Bestimmung des Rindenanteils am Schaft wurden während der Arbeiten zur Totastvermessung an den entnommenen Stammrollen aufgenommen. Die Daten zur Bestimmung des Rindenanteils an Ästen wurden während der Radialzuwachsvermessung an lebenden Ästen erhoben.

2.13.1 RINDENFUNKTION SCHAFT

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Schaftdurchmesser mit Rinde [cm]	345	3,4	23,8	11,1	4,08
	Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm]	345	3,2	23,4	10,8	4,03
<i>Eiche</i>	Schaftdurchmesser mit Rinde [cm]	315	4,6	24,0	13,4	4,14
	Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm]	315	4,2	23,2	12,65	4,01

Tabelle 4: Wertebereiche für die Hilfsfunktion „Rindenanteil Schaft“ für Buche und Eiche

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r^2	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	0,124	0,011			***
	Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm]	1,014	0,001	1,0	1,0	***
<i>Eiche</i>	(Konstante)	0,371	0,025			***
	Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm]	1,031	0,002	0,99	1,0	***

<i>Buche</i>	N=345
	$r^2=1,0$; $r^2_{adj}=1,0$
	Nicht standardisierte Residuen: 1,835 mit 343 FG

<i>Eiche</i>	N=315
	$r^2=.999$; $r^2_{adj}=.999$
	Nicht standardisierte Residuen: 5,591 mit 313 FG

*Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant*

Tabelle 5: Ergebnisse der univariaten Regressionsanalyse zur Schätzung des Rindenanteils des Schaftes für Buche und Eiche nach Formel 12.

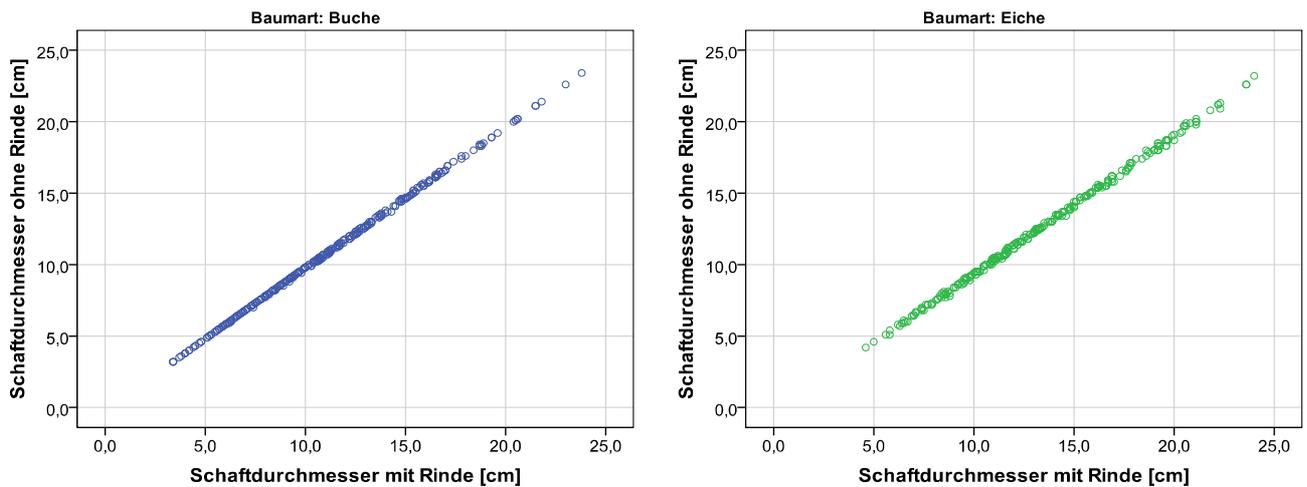


Abbildung 3: Gegenüberstellung des Schaftdurchmessers mit Rinde [cm] mit dem Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm] von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

2.13.2 RINDENFUNKTION ÄSTE

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Astdurchmesser mit Rinde	159	10,0	100,0	25,66	13,5
	Astdurchmesser ohne Rinde [mm]	159	9,6	98,6	24,95	13,3
<i>Eiche</i>	Astdurchmesser mit Rinde [mm]	171	9,0	93,5	28,63	16,76
	Astdurchmesser ohne Rinde [mm]	171	8,3	88,9	27,01	16,23

Tabelle 6: Wertebereiche für die Hilfsfunktion „Rindenanteil Äste“ für Buche und Eiche.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partiell ² r	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	0,345	0,025			***
	Astdurchmesser ohne Rinde [mm]	1,015	0,001	1,0	1,0	***
<i>Eiche</i>	(Konstante)	0,741	0,046			***
	Astdurchmesser ohne Rinde [mm]	1,033	0,001	1,0	1,0	***

<i>Buche</i>	N=159					
	r ² =1,0; r ² adj=1,0					
	Nicht standardisierte Residuen: 3,449 mit 157 FG					

Eiche	N=171
	$r^2=1,0$; $r^2_{adj}=1,0$
	Nicht standardisierte Residuen: 15,95 mit 169 FG

Signifikanz Codes: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 7: Ergebnisse der univariaten Regressionsanalyse zur Schätzung des Rindenanteils der Äste für Buche und Eiche nach Formel 12.

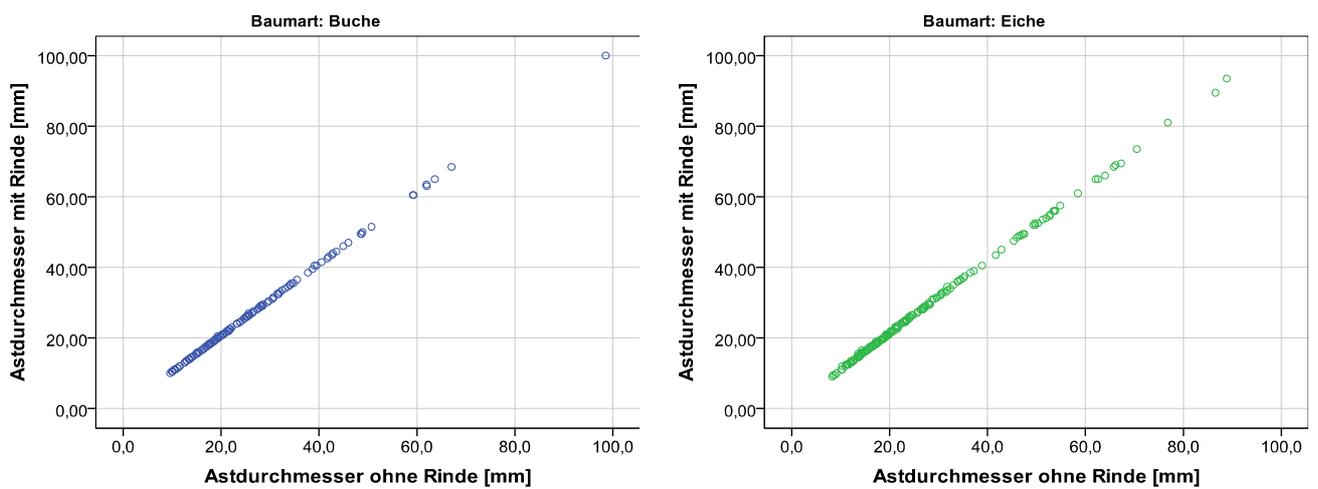


Abbildung 4: Gegenüberstellung des Astdurchmessers ohne Rinde [mm] mit dem Astdurchmesser mit Rinde [mm] für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

3 MATERIAL

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, wurden Buchen - und Eichenbestände in Baden - Württemberg mit einer Ertragsklasse von über $dGz_{100} = 7$ Vfm/ha/a über eine Datenbankabfrage zusammengestellt. Daraus wurden insgesamt 14 Buchen- und 15 Eichenbestände ausgewählt. Die Bestände befinden sich in Gemeinde- und Staatswaldbesitz.

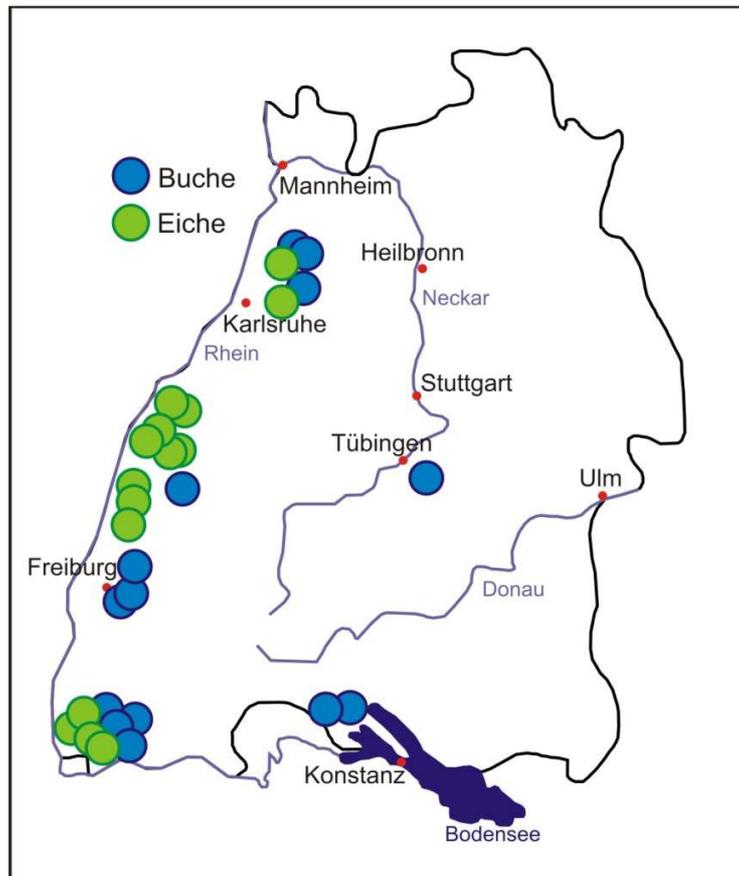


Abbildung 5: Lage der Untersuchungsflächen in Baden - Württemberg. Buche, blaue Signatur, Eiche: grüne Signatur.

3.1 ÜBERBLICK ÜBER DAS AUFGENOMMENE MATERIAL

3.1.1 EINZELBAUMBEZOGENE KENNGRÖSSEN

In dieser Arbeit wurden insgesamt 143 Probestämme stehend sowie liegend vermessen, davon 69 Buchen und 74 Eichen. Von diesen Bäumen stammen die entnommenen Proben der lebenden und toten

Äste. Ferner wurden die Baumhöhe, die Kronenansatzhöhe sowie der Schaftdurchmesser von 277 Bedrängern aufgenommen, davon 145 Buchen und 132 Eichen. Eine Zusammenfassende Darstellung aller aufgenommenen Daten findet sich im Anhang. Zu der in dieser Arbeit verwendeten Definition von Bedrängern findet sich Näheres in Kapitel 2.4.

<i>Dimensions- und Zuwachsgrößen</i>	Buche			Eiche		
	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Baumhöhe [m]	69	4,45 - 26,23	14,65	74	2,83 - 23,35	12,76
Kronenansatzhöhe[m]		1,30 - 16,3	6,89		0,31 - 13,90	5,90
Astfreie Schaftlänge [m]		0,00 - 19,42	4,07		0,00 - 10,10	2,81
Kronenschirmfläche [m ²]		0,86 - 33,47	8,64		0,50 - 29,79	8,62
Kronendurchmesser [m]		1,04 - 6,52	3,05		0,79 - 6,15	3,01
Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]		4,2 - 24,8	11,60		1,9 - 26,6	12,66
Durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs [mm]		1,48 - 3,69	2,36		1,63 - 5,27	3,33
Alter _{1,3} [Jahre]		8 - 51	23,13		4 - 29	15,84
Baumalter auf Stockhöhe [Jahre]		12 - 61	28,39		6 - 32	18,45
Anzahl Bäume gesamt	143					

Tabelle 8: Ausgewählte Dimensions- und Zuwachsgrößen der aufgenommenen Probebäume.

3.1.2 EINZELASTBEZOGENE KENNGRÖSSEN

3.1.2.1 AUFNAHMEN AM LIEGENDEN BAUM

Nach der in Kapitel 2.5.2 erläuterten Methodik wurden die Äste der gefällten Probebäume vermessen. Insgesamt ergab sich so ein Stichprobenumfang von knapp 3800 Ästen, worauf ein Anteil von etwa 75% lebenden Ästen entfiel. Einen Überblick über die aufgenommene Datenspreitung gibt Tabelle 9.

	Buche			Eiche		
<i>Dimensionsgrößen lebende Äste</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	1475	1 - 48	17,8	1381	0 - 27	11,95
Astalter [Jahre]		2 - 38	9,02		1 - 20	6,45
Astdurchmesser [mm]		9,8 - 101,5	22,14		7,8 - 128,7	26,05
Astansatzwinkel [°]		5 - 90	44,44		10 - 100	45,91
Anzahl lebende Äste gesamt	2856					
<i>Dimensionsgrößen Totäste</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	212	1 - 37	9,82	734	0 - 21	8,97
Astalter [Jahre]		3 - 22	10,94		3 - 19	8,15
Astdurchmesser [mm]		3,1 - 46,9	19,35		1,5 - 80,2	24,41
Astansatzwinkel [°]		10 - 80	45,32		10 - 90	50,07
Anzahl Totäste gesamt	946					
Anzahl Äste gesamt	3802					

Tabelle 9: Ausgewählte Dimensionsgrößen der am liegenden Baum aufgenommenen lebenden und toten Äste.

3.1.2.2 ENTNOMMENE ASTPROBEN

Wie ebenfalls in Kapitel 2.5.2 sowie 2.5.3 beschrieben, wurden von lebenden als auch von toten Ästen Proben entnommen, die später im Labor weitergehend untersucht werden sollten. Insgesamt wurden 1560 lebende und tote Äste entnommen, davon wurde an 798 lebenden Ästen der Radialzuwachs gemessen; 762 tote Äste wurden im Labor auf ihren Absterbezeitpunkt und ggf. auf das Jahr ihrer Überwallung untersucht. Die verwendete Methodik ist in Kapitel 2.7 und 2.8 erläutert. Zu beachten ist, dass für jeden lebenden Ast, an welchem der Radialzuwachs gemessen werden sollte, jeweils mindestens eine weitere Stammscheibe vermessen werden musste, womit sich der Umfang der nur für

die Erhebung des Astradialzuwachses vermessenen Ast- und Stammscheiben auf etwa 2000¹⁹ erhöhte. Einen Überblick über die entnommenen Astproben gibt Tabelle 10.

	Buche			Eiche		
<i>Dimensionsgrößen lebende Äste</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	413	1- 44	15,96	385	0- 27	11,53
Astalter [Jahre]		2- 38	10,60		2- 20	7,56
Astdurchmesser [mm]		10,3- 101,5	28,37		10,2- 125,2	35,63
Astansatzwinkel [°]		10- 80	41,92		15- 85	42,28
Durchschnittlicher jährlicher Astradialzuwachs [mm]		0,31	4,11		0,66	4,62
Anzahl lebende Äste gesamt	798					
<i>Dimensionsgrößen nicht überwallte Totäste</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum-Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	122	1-27	9,18	268	1- 21	8,25
Astalter [Jahre]		3- 22	10,99		3- 19	8,12
Astdurchmesser [mm]		2,3- 44,9	20,13		2,0- 71,8	24,88
Astansatzwinkel [°]		10- 75	42,77		10- 90	45,93
Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis [N]		1- 14	3,75		1- 16	4,72
Anzahl nicht überwallte Totäste gesamt	390					

¹⁹ Siehe Kapitel 2.6

<i>Dimensionsgrößen überwallte Totäste</i>	<i>N</i>	<i>Minimum- Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>	<i>N</i>	<i>Minimum- Maximum</i>	<i>Arithmetischer Mittelwert</i>
Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	190	1-27	7,98	182	1- 17	4,94
Astalter [Jahre]		4- 27	11,72		2- 14	7,06
Astdurchmesser [mm]		3,8- 57,3	20,65		3,6- 45,1	17,74
Astansatzwinkel [°]		10- 75	41,51		15- 90	51,12
Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis [N]		1- 35	13,22		2- 21	11,74
Anzahl überwallte Totäste gesamt	372					
Anzahl im Labor vermessene Äste gesamt	1560					

Tabelle 10: Ausgewählte Kenngrößen der im Labor vermessenen lebenden Äste, der nicht überwallten Totäste und der überwallten Totäste.

4 ERGEBNISSE

4.1 BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR

4.1.1 EINZELBAUMBEBENE

4.1.1.1 HÖHENWACHSTUM

Da die empirisch aufgenommenen Daten nur einen geringen Stichprobenumfang aufweisen sowie einen begrenzten Altersrahmen abdecken, war nicht vorgesehen, ein eigenständiges und vielseitig valides Höhenwachstumsmodell zu erstellen. Wie in Kapitel 2.1.1.1.1 erläutert, soll das in dieser Arbeit erstellte Höhenwachstumsmodell dazu dienen, die Alters- Höhenrelationen für beide Baumarten bis zum Alter 20 (30), welche nicht in den gängigen Ertragstafeln (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993)) tabelliert sind, zu erstellen, Wachstumsunterschiede der beiden Baumarten in jungem Alter zu veranschaulichen, den empirischen Daten eine auf diese angepasste Bonitierung zuzuweisen und den dynamischen Prozess der Astreinigung auch unter Berücksichtigung standörtlicher Unterschiede zu prognostizieren. Vor allem dient das in dieser Arbeit erstellte Höhenwachstumsmodell jedoch der Überprüfung des Verhaltens von Modellen des Themenbereichs Astmortalität und Astüberwallung, welche die Baumhöhe als unabhängige Variable enthalten sollten, sowie deren Visualisierung.

Als Datengrundlage dienten die Ergebnisse der Stammscheibenanalyse von Bäumen der Kraft'schen Klasse 1 und 2, bei denen das Höhenwachstum in jährlicher Auflösung vorlag (Eiche 508 Einzelwerte; Buche 514 Einzelwerte). Insgesamt wurden die Daten von 23 Eichen und 22 Buchen zur Modellbildung verwendet.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Buche	Alter _{1,3} [Jahre]	22	11	38	22,91	9,20
	Baumhöhe [m]	22	5,38	23,40	14,46	5,58
	Baumhöhe im Alter 10 (Bezug: 1,3m Schafthöhe) [m]	22	4,57	8,85	7,30	1,02
Eiche	Alter _{1,3} [Jahre]	23	14	29	21,09	4,78
	Baumhöhe [m]	23	10,45	22,9	17,34	3,24
	Baumhöhe im Alter 10 (Bezug: 1,3m Schafthöhe) [m]	23	6,25	12,25	8,96	1,26

Tabelle 11: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Höhenwachstumsmodells.

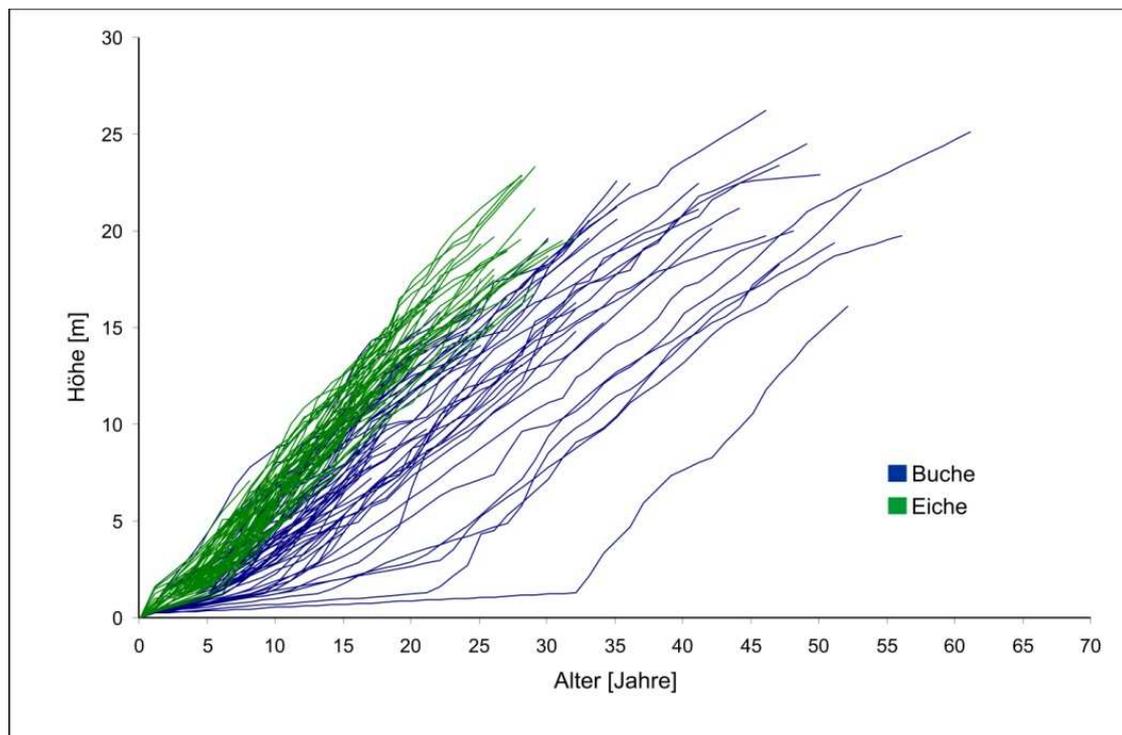


Abbildung 6: Darstellung des auf Grundlage der Stammanalyse berechneten Höhenwachstumsverlaufs der untersuchten Bäume. Buche: blaue Signatur, Eiche; grüne Signatur

Um unerwünschte Einflüsse auf das Höhenwachstum bedingt durch Verbiss, Überschirmung (vgl. Abbildung 6) oder Anwuchsschwierigkeiten der Pflanze nach der Pflanzung aus den in das Modell einfließenden Daten auszuschließen, wurde die Höhe nicht wie sonst üblich in Bezug zum Stockalter sondern in Bezug zum Alter_{1,3} gesetzt (vgl. Kapitel 2.1.1.1.1).

Für die absoluten Höhenbonitäten wurde ein Referenzalter von 10 Jahren auf 1,3m Schafthöhe gewählt, so dass in die Datenanalyse nur Bäume der Kraft'schen Klassen 1 und 2 aufgenommen werden konnten,

die ein Alter von mindestens 10 Jahren auf 1,3m Schafthöhe erreicht hatten. Um eine ausreichende Datengrundlage für die Höhenmodellierung zu erhalten, wurde das vergleichsweise junge Bezugsalter gewählt.

In dieser Arbeit wurde zur Modellierung des Höhenwachstums auf das von SLOBODA (1971) vorgeschlagene Differenzialgleichungsmodell zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.1.1.1.1)

$$H = a * \left(\frac{bon}{a} \right)^{\exp^{b * (\text{Alter}_{1,3}^{-c} - \text{Alter}_{1,3ref}^{-c}) / c}}$$

Formel 13: Modell zur Prognose des Höhenwachstums.

wobei

H = Baumhöhe [m]

bon = absolute Höhenbonität [m]

$\text{Alter}_{1,3}$ = Alter_{1,3} [Jahre]

$\text{Alter}_{1,3ref}$ = Referenzalter der absoluten Höhenbonität („SI“) [Jahre]

a, b, c = empirische Koeffizienten

Die Berechnungen wurden mit Hilfe der Funktion *nls* des Statistikpakets R durchgeführt.

Baumart	Koeffizienten	Parameter-schätzer	Standardfehler des Schätzers	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
<i>Buche</i>	a	39,222	2,608	15,04	<2e-16	***
	b	0,127	0,00490	25,74	<2e-16	***
	c	-0,625	0,027	-23,19	<2e-16	***
<i>Eiche</i>	a	32,220	1,636	19,70	<2e-16	***
	b	0,151	0,0060	25,11	<2e-16	***
	c	-0,699	0,030	-23,48	<2e-16	***

Buche	N=514
	Pseudo- R ² = 0,98
	Nicht standardisierte Residuen: 0,6728 mit 511 FG

Eiche	N=508
	Pseudo- R ² = 0,98
	Nicht standardisierte Residuen: 0,7345 mit 505 FG

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 12: Ergebnisse des multiplen nicht-linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Höhenwachstums nach Formel 13.

Die iterativ bestimmten Parameterschätzer tragen bei beiden Baumarten hochsignifikant zur Verringerung der Gesamtstreuung bei. Das nach der in Kapitel 2.12.2.2 beschriebenen Methodik ermittelte Pseudo- R² liegt für beide Baumarten bei 0.98.

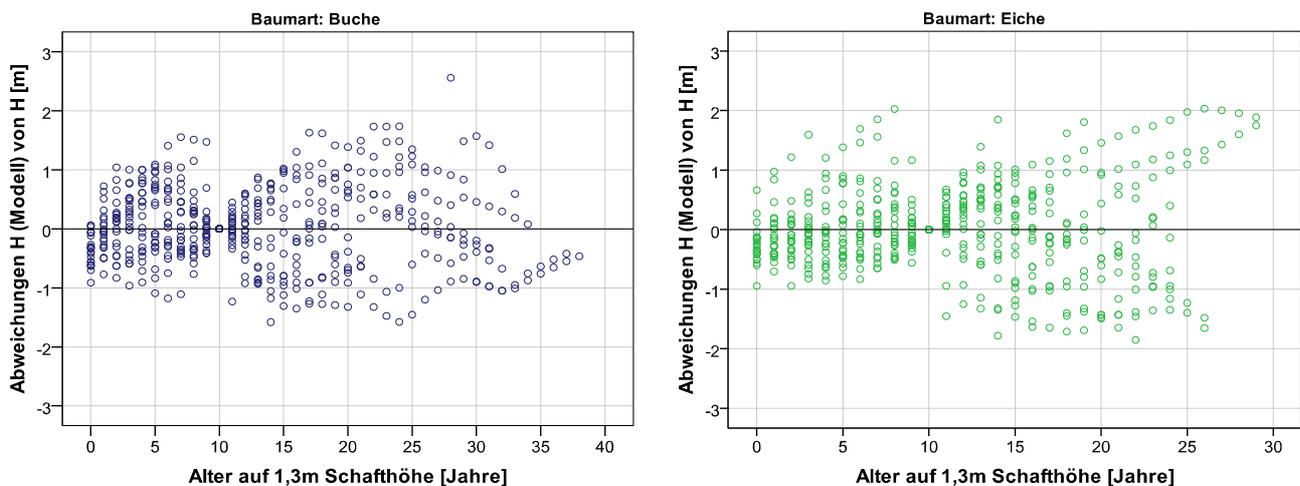


Abbildung 7: Abweichungen des modellierten Höhenwachstumsverlaufs zum tatsächlichen Höhenwachstumsverlauf [m] für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Das Höhenwachstumsmodell für Buche erreicht eine Genauigkeit von etwa +/- 1,0m bis zum Alter 10. Ab diesem Alter liegt die Schätzgenauigkeit bei etwa +/- 1,5m. Bei Eiche kann über das gesamte beobachtete Alter eine Genauigkeit von +/- 2m erzielt werden.

Abbildung 8 visualisiert das Ergebnis der Höhenmodellierung. Das Modell prognostiziert unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen und für einen Altersrahmen bis zu 29 Jahren größere Baumhöhen

für die Baumart Eiche. Verglichen mit den Ergebnissen der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 1.2.7.4) ist dieses Resultat biologisch plausibel; die Eiche zeigt auf fast allen Standorten eine mehr oder weniger deutliche Wuchsüberlegenheit gegenüber der Buche. Der Bonitätsfächer erstreckt sich für die Baumart Buche über einen Höhenrahmen von 5m bis 8,5m im Alter 10, für die Baumart Eiche von 6m bis 12m im Alter 10. Im Überlappungsbereich der Bonitätsfächer beider Baumarten ($SI_{10}= 6m$, $SI_{10}= 7m$, $SI_{10}= 8m$) prognostiziert das Modell einen sich stetig vergrößernden Höhenunterschied zwischen Buche und Eiche, welcher beim Erreichen der Gültigkeitsgrenze des Höhenmodells der Eiche mit 29 Jahren knappe 2m beträgt.

Nicht mit den Ergebnissen der Literaturrecherche konsistent erweist sich das leichte Abflachen der Höhenzuwachskurven der Baumart Buche mit zunehmendem Alter, wohingegen das modellierte Höhenwachstum der Eiche nur leichte Tendenzen eines Abflachens der Höhenzuwachskurve zeigt.

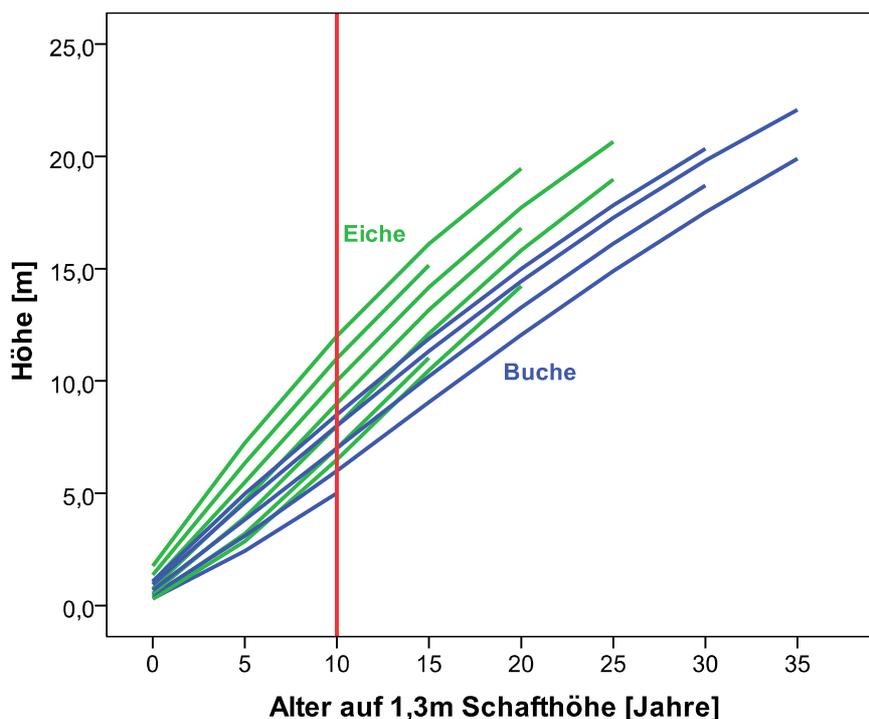


Abbildung 8: Modellierter Höhenwachstumsverlauf für absolute Höhenbonitäten (SI_{10}) im Alter_{1,3} 10 Jahre. Der Gültigkeitsbereich der Kurven ist an die vorliegende Datenstruktur angepasst.

Buche (beginnend mit der untersten Kurve): $SI_{10}= 5m$; $6m$; $7m$; $8m$; $8,5m$.

Eiche (beginnend mit der untersten Kurve): $SI_{10}= 6m$; $7m$; $8m$; $9m$; $10m$; $11m$; $12m$.

Abbildung 9 verbildlicht den jährlichen Höhenzuwachs der beiden Baumarten für zwei verschiedene Höhenbonitäten, welcher auf Grundlage der modellierten Werte berechnet wurde. Die abgebildeten

Höhenzuwachskurven weisen eine bonitätsabhängige Verschiebung des Höhenzuwachsmaximums auf, wobei die Höhenzuwächse der schlechteren Bonitäten zu einem späteren Zeitpunkt kulminieren. Dies entspricht den von ASSMANN (1961) postulierten Wachstumsgesetzen. Zu erkennen ist eine deutliche Überlegenheit des jährlichen Höhenzuwachses der Eiche über die meiste Zeit zwischen dem $\text{Alter}_{1,3}$ von 5 Jahren und dem $\text{Alter}_{1,3}$ von 30 Jahren im Vergleich zur Buche gleicher Standortsbonität, wobei sich Unterschiede im jährlichen Höhenzuwachs von bis zu 16 Zentimetern ergeben.

Im Gegensatz zu entsprechenden Angaben der Literatur (ASSMANN (1961), BURSCHEL & HUSS (1997)) kulminiert der auf Grundlage des modellierten Höhenwachstums berechnete Höhenzuwachs der Baumart Buche sehr früh und bei beiden dargestellten Höhenzuwachskurven noch vor dem der Eiche, womit diesem Ergebnis keine biologische Plausibilität bescheinigt werden kann. Trotz dieser Widersprüchlichkeiten erfüllt das Modell die an es gestellten und in Kapitel 2.1.1.1.1 aufgeführten Forderungen.

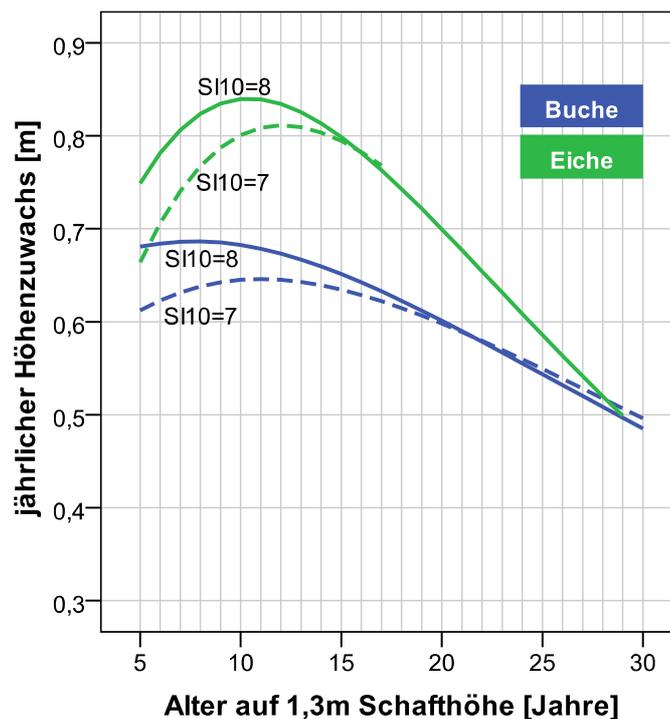


Abbildung 9: jährlicher Höhenzuwachs (Berechnung auf Grundlage der Ergebnisse des Höhenwachstumsmodells) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedene Höhenbonitäten ($SI_{10}=7$ m: gestrichelte Linie; $SI_{10}=8$ m: durchgezogene Linie). Da es aufgrund der überschätzenden Tendenz des Modells im Alter 1 zu unplausiblen Höhenzuwächsen in den ersten 4 Jahren kam, wurde diese Darstellung auf die Zeit zwischen dem $\text{Alter}_{1,3}$ von 5 Jahren und dem $\text{Alter}_{1,3}$ von 30 Jahren beschränkt.

4.1.1.2 KRONENDURCHMESSER

Wie in Kapitel 2.1.1.1.2 erläutert, wurde das Modell zur Prognose des Kronendurchmessers in Anlehnung an die bereits erstellten Kronendurchmessermodelle von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) formuliert:

$$KD = a + b * BHD + c * Alter_{1,3} + d * H$$

Formel 14: Modell zur Prognose des Kronendurchmessers.

wobei:

KD = Kronendurchmesser [m]

BHD = Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]

$Alter_{1,3}$ = Alter_{1,3} [Jahre]

H = Baumhöhe [m]

a, b, c = empirische Koeffizienten

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Kronendurchmesser [m]	69	1,04	6,52	3,0529	1,29822
	Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	69	4,2	24,8	11,609	5,3657
	Alter _{1,3} [Jahre]	69	8	51	23,13	11,32
<i>Eiche</i>	Kronendurchmesser [m]	74	0,79	6,15	3,0159	1,37418
	Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	74	1,9	26,6	12,666	6,5076
	Alter _{1,3} [Jahre]	74	4	29	15,84	7,585

Tabelle 13: Wertebereiche für die einzelnen Variablen des Kronendurchmessermodells.

Bei beiden Baumarten erwies sich die Baumhöhe, wie sie z.B. von LANGSHAUSEN (2009) zur Prognose des Kronendurchmessers bei der Baumart Buche verwendet wurde, neben den Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und Alter_{1,3} als nicht zur weiteren Erklärung der Kronenbreite beitragend.

Dementsprechend modifiziert sich die Modellformulierung zu:

$$KD = a + b * BHD + c * Alter_{1,3}$$

Formel 15: Modifiziertes Modell zur Prognose des Kronendurchmessers.

mit den oben genannten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	Parameter-schätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
Buche	(Konstante)	0,635	0,183			***
	Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	0,286	0,032	0,765	5,405	***
	Alter _{1,3} [Jahre]	-0,039	0,015	0,021	5,405	**

Eiche	(Konstante)	0,720	0,134			***
	Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm]	0,254	0,018	0,851	4,236	***
	Alter _{1,3} [Jahre]	-0,058	0,016	0,024	4,236	***

Buche	N=69					
	r ² =0,787; r ² adj=0,780					
	Nicht standardisierte Residuen: 24,46 mit 66 FG					

Eiche	N=74					
	r ² =0,875; r ² adj=0,871					
	Nicht standardisierte Residuen: 17,234 mit 71 FG					

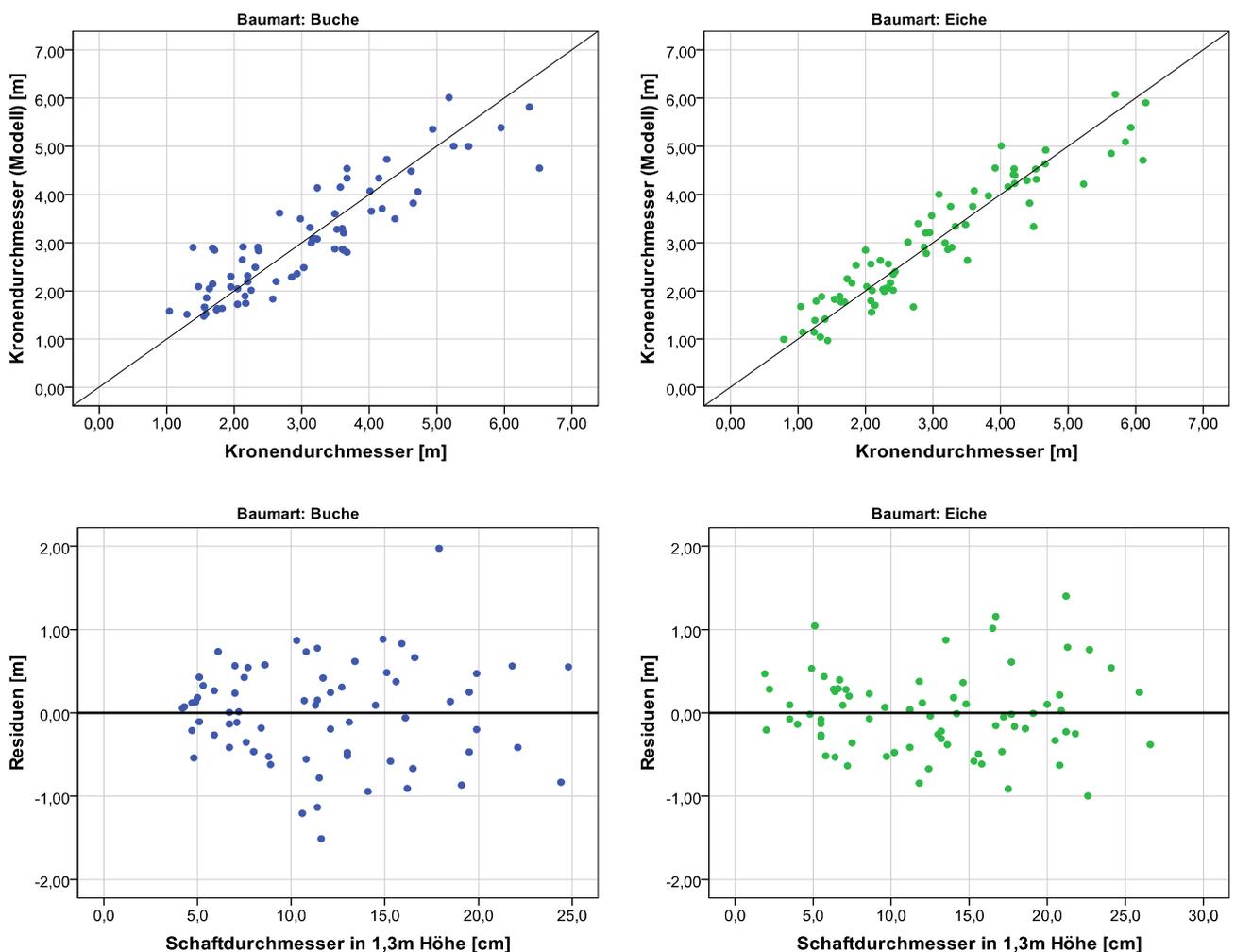
Signifikanz Codes: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001, ns= nicht signifikant

Tabelle 14: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Kronendurchmessers von Buche und Eiche nach Formel 15.

Mit Hilfe der schrittweisen Regression konnten für Buche ungefähr 78%, für Eiche etwa 88% der Streuung der Messwerte mit den unabhängigen Variablen Durchmesser und Alter erklärt werden.

Der Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und Alter und der abhängigen Variable Kronendurchmesser lässt sich mit dem aufgeführten Modell gut beschreiben. Das multiple Bestimmtheitsmaß liegt bei r²=0,787 für Buche (r²adj=0,780) bzw. r²=0,875 für Eiche (r²adj=0,871). Der größte Anteil der Streuung der Messwerte wird bei beiden Baumarten durch den Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe erklärt (Buche: 76%; Eiche 85%); die Variable Baumalter auf 1,3 Metern Schafthöhe trägt bei Buche nur noch zu 2,1% bzw. bei Eiche zu 2,4% zur Verringerung der

Gesamtstreuung bei. Der Variance Inflation Factor (VIF) liegt in allen Fällen unter 10, so dass nach SACHS & HEDDERICH (2006) keine Hinweise auf Multikollinearität vorliegen. Die Durbin – Watson - Statistik des Kronendurchmessermodells der Baumart Buche weist jedoch mit einem Wert von 1,251 auf leichte positive Autokorrelation hin (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)). Nach BACKHAUS (1996) sind hier somit Verzerrungen bei der Ermittlung des Standardfehlers der Regressionskoeffizienten und deren Konfidenzintervallen möglich. Für die Baumart Eiche kann mit einer Durbin – Watson - Statistik von 2,016 Autokorrelation ausgeschlossen werden (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)). Die Residuen wiesen Normalverteilung auf, was zunächst anhand von Histogrammen und Normalverteilungsdiagrammen („P – P - Diagrammen“) visuell beurteilt und des Weiteren den Shapiro – Wilk - Test abgesichert wurde.



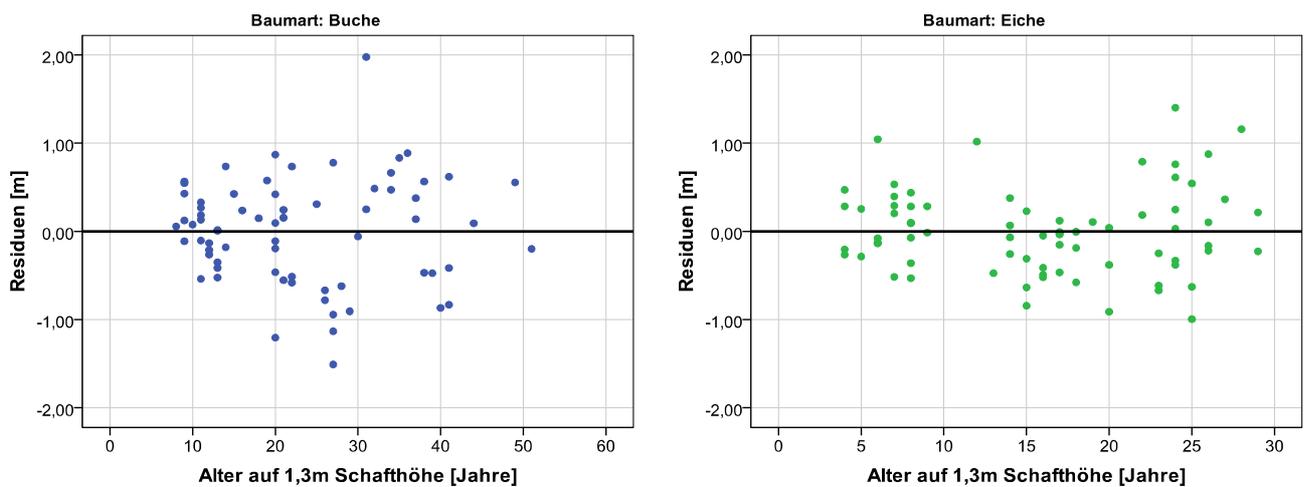


Abbildung 10: Gegenüberstellung der gemessenen Werte des Kronendurchmessers mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung des Kronendurchmessers über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Die Gegenüberstellung der empirischen mit denen durch das Modell prognostizierten Daten zeigt eine gute Übereinstimmung. Auch die Residuen streuen fast gleichmäßig über die unabhängigen Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und $\text{Alter}_{1,3}$. Verletzungen der Voraussetzung der Homoskedastie konnten nicht festgestellt werden. Das erstellte lineare multiple Regressionsmodell prognostiziert den Kronendurchmesser mit Ausnahmen von 4 (Buche) bzw. 3 (Eiche) Werten mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{m}$.

Das Modell schätzt unter Annahme gleicher Voraussetzungen:

- größere Kronendurchmesser mit zunehmendem Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe.
- kleinere Kronendurchmesser mit zunehmendem $\text{Alter}_{1,3}$.

Im Zusammenspiel beider Variablen ergibt sich ein größerer Kronendurchmesser für Bäume mit höherem Radialzuwachs (vgl.

Abbildung 11) unter sonst gleichen Bedingungen. Ein Baum, welcher einen bestimmten Schaftdurchmesser in geringerer Zeit erreichen soll, benötigt dementsprechend einen größeren Kronendurchmesser (vgl. SPIECKER (1983)) und folglich eine größere Standfläche, was die Auffassung der Baumkrone als „Zuwachsmotor“ (z.B. KUPKA (2007), SPRINGMANN et al. (2011)) bestätigt. Zum gleichen Ergebnis kamen SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009). Somit kann den hier vorgestellten Resultaten biologische Plausibilität zugesprochen werden.

4.1.1.2.1 EINFLUSS DER BAUMART

Durch den Einsatz von Dummy - Variablen nach der in Kapitel 2.12.2.1 beschriebenen Methode konnten die Wachstumsgesetzmäßigkeiten beider Baumarten auf signifikante Unterschiede des Interzepts und/ oder der Steigungen verglichen werden. Die Regressionsgleichungen beider Baumarten unterscheiden sich dabei signifikant in der Steigung der Variable $\text{Alter}_{1,3}$, wobei sich das $\text{Alter}_{1,3}$ im Modell der Baumart Eiche mindernd auf den Kronendurchmesser auswirkt. Für diesen Befund kommen drei Erklärungen in Frage:

1. Zum einen könnte es sich bei diesem Befund um ein Datenartefakt, resultierend aus dichterständigerer Erziehung der älteren der beprobten Eichenbestände im Vergleich zu den beprobten Buchenbeständen handeln. Folglich müsste das $\text{Alter}_{1,3}$ der beprobten Eichen signifikant negativ mit dem mittleren jährlichen Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe korreliert sein, während dieser Zusammenhang für die empirischen Daten der Baumart Buche keine Signifikanz aufweisen dürfte. Jedoch konnte für die Daten *beider* Baumarten kein signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Größen festgestellt werden (Buche: $r=-0,207$, $r^2= 0,04$, *ns*; Eiche: $r= 0,167$, $r^2=0,02$, *ns*).
2. Zum anderen könnte dies als artspezifischer Effekt gedeutet werden. Dem prompten Reaktionsvermögen der Eichenkrone auf veränderte Lichtverhältnisse wird im Allgemeinen eine recht geringe Dauerhaftigkeit zugesprochen, wohingegen die Reaktionsfähigkeit der Buche bis ins hohe Alter hinein hoch bleibt (vgl. z.B. BÖRNER (1997), HAYWOOD (2002) und Kapitel 1.2.7.4). Es wäre möglich, dass der hier aufgezeigte Sachverhalt ein Abbild des geringer werdenden Reaktionsvermögens der Eichenkrone im Vergleich zur Krone der Baumart Buche mit zunehmendem Alter darstellt, und somit rein ontogenetisch bedingt ist. Ausweislich den in Tabelle 13 angegebenen Altersspannen, die die dynamischste Phase des Reaktionsvermögens der Eichenkrone abdecken müssten, und vor dem Hintergrund der von HEIN (2004) durchgeführten Kronendurchmessermodellierung von solitären Eschen und Bergahornen, bei welcher das Baumalter als nicht signifikant zur Klärung der Gesamtstreuung beitragend identifiziert wurde, erscheint diese These jedoch wenig plausibel.
3. Eine weitere Erklärung wäre eine höhere Empfindlichkeit der Eichenkrone auf seitlichen Konkurrenzdruck durch Nachbarbäume. Mit zunehmendem Alter beginnt sich dieser zu verschärfen. Die im Vergleich zur Baumart Buche weniger effiziente Strahlungsabsorption der

Schattenblätter der Baumart Eiche (HAGEMEIER (2002), vgl. Kapitel 1.2.7.1) zusammen mit der geringeren Lebensdauer ihrer Kurztriebketten unter Konkurrenzdruck (ROLOFF (2001), vgl. Kapitel 1.2.7.5), könnten dazu führen, dass sich die Eichenkrone mit zunehmendem Alter nicht in dem Maße ausdehnen kann, zu welchem die Buche dank ihrer hohen Schattentoleranz fähig ist. Die Tatsache, dass zumindest zeitweise Überschirmungssituationen der weitgehend naturverjüngten Buchenbestände durch den Vorgängerbestand nicht auszuschließen war, könnte dazu beigetragen haben, diesen baumartenspezifischen Unterschied der morphologischen Plastizität noch stärker zu betonen.

Abbildung 11 verbildlicht den Unterschied der vom Modell prognostizierten Werte. Bei gleichem $\text{Alter}_{1,3}$ sowie gleichem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe besitzt die Eiche einen geringeren Kronendurchmesser. Mit zunehmendem Alter verschärft sich dieser Unterschied und liegt im $\text{Alter}_{1,3} = 29$ bei etwa einem Meter.

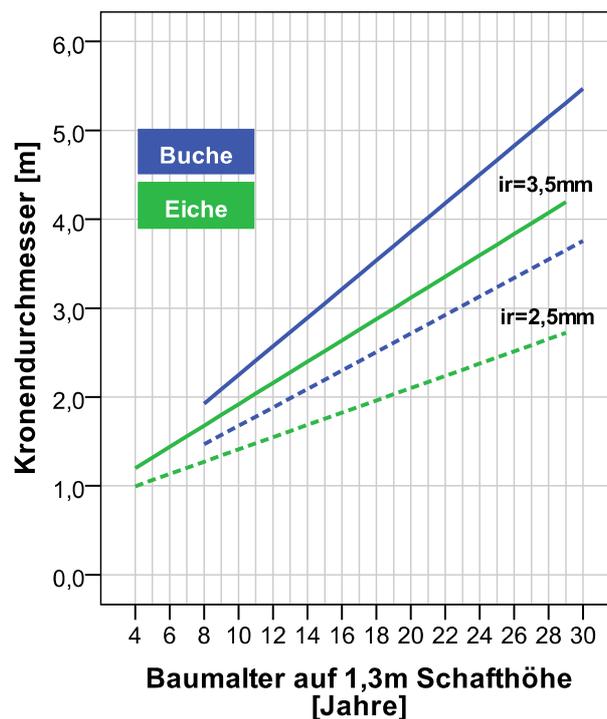


Abbildung 11: Darstellung des vom Modell prognostizierten Kronendurchmessers über dem $\text{Alter}_{1,3}$ für zwei verschiedene Radialzuwachszenarien (durchgezogene Linie= 3,5mm/Jahr; gestrichelte Linie= 2,5mm/ Jahr) für Buche (Signatur: blau) und Eiche

(Signatur: grün).

Weiterhin kann jedoch auch auf Grundlage der vom Modell prognostizierten Werte konstatiert werden, dass die Eiche eine etwas weniger groß dimensionierte Krone benötigt, um den gleichen Schaftdurchmesser in gleichem Zeitraum zu produzieren. Daraus lassen sich zwei Sachverhalte folgern:

1. Das Ausladungsverhältnis der Baumart Eiche liegt immer etwas unterhalb dessen der Baumart Buche, was nicht konform zu den von DAWKINS (1963) formulierten Hypothesen ist.
2. Die Kroneneffizienz²⁰ der Baumart Eiche ist im Vergleich zu der der Baumart Buche größer (vgl. Abbildung 12). Dieses Resultat stimmt mit den Ergebnissen der Untersuchungen von UHL et al. (2006) an solitären Buchen und Eichen überein. Mit gleicher Kronenbreite kann die Eiche also einen höheren durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe produzieren.

²⁰ Die Kroneneffizienz wird in dieser Arbeit als der durchschnittliche jährliche Grundflächenzuwachs in cm^2 pro m^2 Kronenschirmfläche definiert (vgl. UHL et al., 2006).

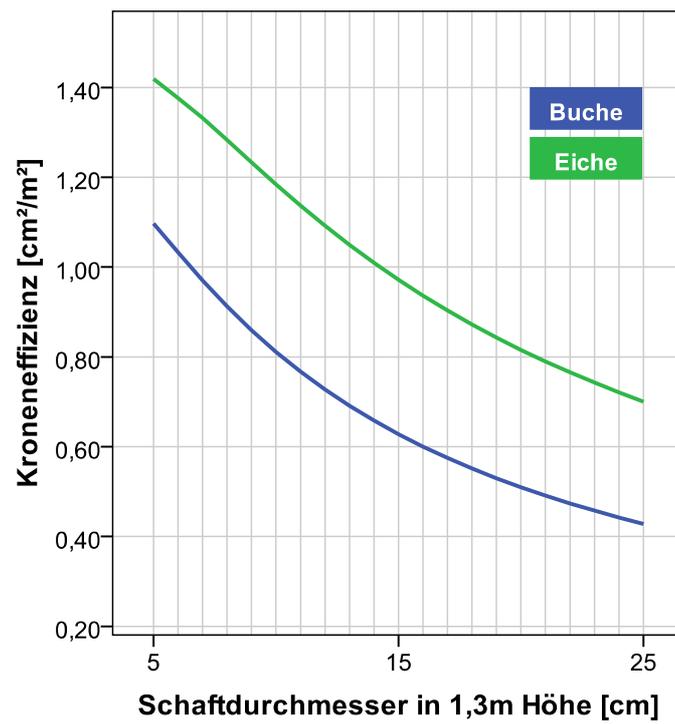


Abbildung 12: Darstellung der über die prognostizierten Werte berechneten Kroneneffizienz über dem Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe für Buche (Signatur: blau) und Eiche (Singnatur: grün) beispielhaft dargestellt am Radialzuwachsszenario 3,5mm/Jahr.

4.1.1.2.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Abbildung 11 stellt die Kronendurchmesserentwicklung über dem Alter_{1,3} für verschiedene Radialzuwachsszenarien dar. Bei beiden Baumarten ist mit zunehmendem Alter ein sich allmählich vergrößernder Unterschied zwischen den dargestellten Szenarien festzustellen, welcher im Alter 29 etwa 1,5m (Buche: 1,65m; Eiche 1,47m) beträgt. Zunehmende seitliche Bedrängung wirkt sich bei beiden Baumarten ähnlich mindernd auf die Kronenbreite und damit auf den durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs aus.

4.1.1.3 ANZAHL LEBENDER ÄSTE

Eine wichtige Komponente zur Beschreibung der Kronenstruktur ist die Anzahl der lebenden Äste eines Baumes. Durch den Astreinigungsvorgang erhält die Anzahl früherer Kronenäste auch Bedeutung für die Holzqualität. So wird etwa die maximale Anzahl sichtbarer Totäste pro Laufmeter Schaftholz für verschiedene Güteklassen der Laub- Rundholz Qualitäts- Sortierung des EUROPÄISCHEN KOMITEES FÜR NORMUNG (1997) dezidiert festgelegt.

Angelehnt an den Modellansatz von DORUSKA & BURKHART (1994) wurde zunächst das Modell zur Schätzung der Anzahl lebender Äste wie folgt formuliert:

$$N_L = a + b * KL + c * BHD + d * Alter_{1,3}$$

Formel 16: Modell zur Prognose der Astanzahl.

wobei:

N_L^{21}	= Anzahl der lebenden Äste
KL^{22}	= Kronenlänge [m]
BHD	= Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]
$Alter_{1,3}$	= Alter _{1,3} [Jahre]
a, b, c	= empirische Koeffizienten

²¹ Die Anzahl der lebenden Äste bezieht sich auf die Anzahl der Äste in dem als Krone definierten Kompartiment des Baumes (siehe Definition Kronenlänge).

²² Die Kronenlänge ist hier definiert als die Distanz zwischen Kronenansatzhöhe (Ansatzhöhe desjenigen lebenden Astes, welcher gleich oder weniger 1,5 Meter von den nächst oberen 3 lebenden Ästen entfernt ist) und der Baumspitze.

Der Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe erwies sich als die einflussreichste Variable zur Vorhersage der Anzahl lebender Äste pro Baum und erklärte alleine 40,6% (Buche) bzw. 38,6% (Eiche) der Gesamtstreuung. Jedoch wurde von deren Verwendung als Regressor abgesehen, da weitere einzelbaumbezogene Variablen wie das Baumalter aber insbesondere die Kronenlänge im Zuge der schrittweisen Regressionsmethode nach Einbeziehung der Variable Schaftdurchmesser in 1,3 Metern Höhe keine partiellen Korrelationen mehr mit dem Regressanden aufwiesen und somit nicht in der Regressionsgleichung berücksichtigt werden konnten. Für die Schätzung der Anzahl lebender Äste sollte, um einen direkten Vergleich beider Baumarten zu ermöglichen, jedoch eine Längenangabe der vertikalen Ausdehnung der Krone in Form der absoluten Kronenlänge in die Regressionsgleichung miteinbezogen werden. Des Weiteren wurde ein Einfluss des mittleren jährlichen Radialzuwachses auf 1,3m Schafthöhe auf die Anzahl lebender Äste vermutet.

Die Regressionsgleichung wurde somit wie folgt modifiziert:

$$N_L = a + b * KL + c * ir_{(mittel)1,3}$$

Formel 17: Modifiziertes Modell zur Prognose der Astanzahl.

wobei:

N_L = Anzahl der lebenden Äste

KL = Kronenlänge [m]

$ir_{(mittel)1,3}$ = mittlerer jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]

a, b, c = empirische Koeffizienten

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
<i>Buche</i>	Anzahl lebende Äste/Baum [N]	69	8	44	20,72	8,792
	Kronenlänge [m]	69	2,6	14,4	7,76	2,72
	Durchschnittlicher Radialzuwachs [mm/Jahr]	69	1,48	3,69	2,36	0,4501
<i>Eiche</i>	Anzahl lebende Äste/ Baum [N]	74	5	37	18,38	7,516
	Kronenlänge [m]	74	2,08	15,35	6,85	2,94
	Durchschnittlicher Radialzuwachs [mm/Jahr]	74	1,63	5,27	3,33	0,8907

Tabelle 15: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astanzahlmodells.

Baumart	Variable	Parameter- schätzer	Standardfehler des Schätzers	partiell ^{es} r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
Buche	(Konstante)	-4,976	4,166			ns
	Kronenlänge [m]	2,181	0,237	0,507	1,035	***
	Durchschnittlicher Radialzuwachs [mm/Jahr]	3,703	1,656	0,035	1,035	*
Eiche	(Konstante)	2,040	2,617			ns
	Kronenlänge [m]	1,095	0,273	0,360	1,423	***
	Durchschnittlicher Radialzuwachs [mm/Jahr]	2,650	0,902	0,069	1,423	**
Buche	N=69					
	r ² =0,541; r ² adj=0,528					
	Nicht standardisierte Residuen: 2409,927 mit 66 FG					
Eiche	N=74					
	r ² =0,430; r ² adj=0,414					
	Nicht standardisierte Residuen: 2352,034 mit 71 FG					
Signifikanz Codes: *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001, ns= nicht signifikant						

Tabelle 16: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung der Astanzahl nach Formel 17.

Das multiple korrigierte Bestimmtheitsmaß liegt für das auf die empirischen Daten der Buche angepasste Modell zur Schätzung der Astanzahl bei $r^2_{adj.}=0,528$, für die Baumart Eiche bei $r^2_{adj.}=0,414$. Den größten Teil der Streuung (50,7% beim Modell für die Baumart Buche, 36,0% beim Modell für die Baumart Eiche) erklärt bei beiden Baumarten die Variable Kronenlänge. Die Variable durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3 Metern Höhe kann weitere 3,5% (Buche) bzw. 6,9% (Eiche) erklären.

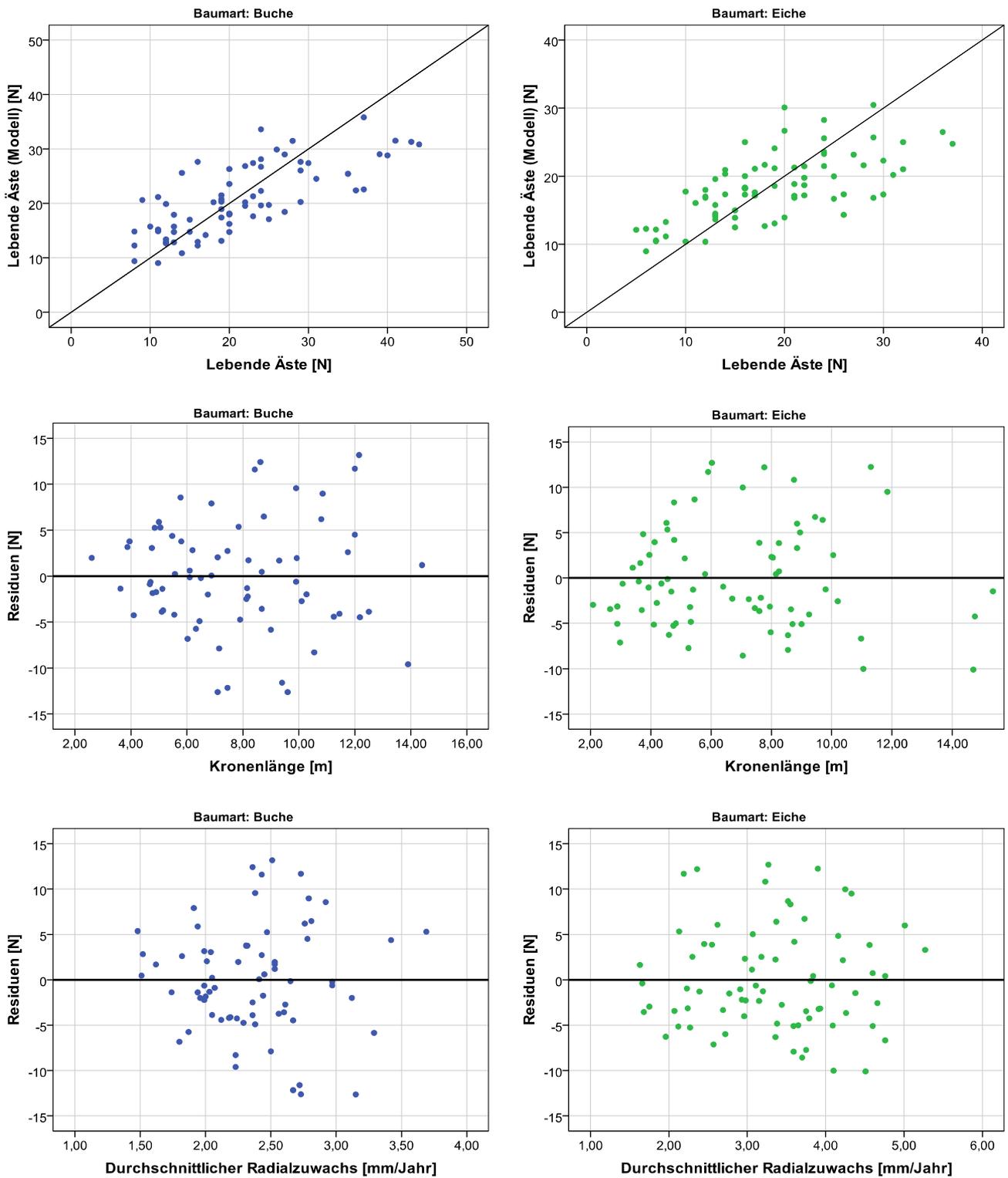


Abbildung 13: Gegenüberstellung der gemessenen Werte der Anzahl lebender Äste mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung der Anzahl lebender Äste über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Die übliche Prüfung auf Verletzung der Prämissen des linearen Regressionsmodells in Bezug auf die Normalverteilung der Residuen, eine nichtlineare Beziehung zwischen dem Regressanden und den einzelnen Regressoren, Multikollinearität oder Heteroskedastizität fiel negativ aus. Die Durbin- Watson Statistik zeigt mit 1,482 für die Baumart Buche und 1,885 für die Baumart Eiche an, dass Autokorrelation mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,01$ ausgeschlossen werden kann (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)).

Bei den Modellen beider Baumarten ist eine sehr große Streuung zu beobachten. So können beide erstellten Modelle die Anzahl lebender Äste lediglich mit einer Genauigkeit von +/- 14 Ästen prognostizieren, was angesichts der jeweiligen Mittelwerte von 20,72 (Buche) bzw. 18,38 (Eiche) Ästen pro Baum sehr hoch ist.

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen:

- Eine höhere Astanzahl mit zunehmender Kronenlänge. Dies ist biologisch plausibel. Auf jeden Meter Kronenlänge wird vom Modell für die Baumart Buche 2,18 Äste, für die Baumart Eiche 1,095 Äste geschätzt.
- Eine höhere Astanzahl mit zunehmendem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs in 1,3 Metern Schafthöhe. Bei gleicher vertikaler Ausdehnung der Krone besitzen Bäume mit höherem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs eine größere Anzahl an lebenden Ästen. Für diesen Zusammenhang kommen zwei Erklärungen in Frage:

1. Die Astanzahl bedrängter und unbedrängter Bäume ist *ceteris paribus* gleich. Der beschleunigte Astabsterbeprozess bedrängter Bäume setzt sich jedoch noch bis weit in die Baumkrone hinein fort. Folglich wäre der dargestellte Zusammenhang das Ergebnis einer schnelleren Astreinigung von Bäumen mit niedrigem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs. Diese Hypothese wurde zunächst anhand des Zusammenhangs zwischen der beobachteten Totastanzahl in dem jeweils als Krone definierten vertikalen Baumkompartiment und dem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs in 1,3 Metern Schafthöhe grafisch überprüft. Da insbesondere bei der Baumart Buche während der Fällung viele nicht überwallte Totäste sehr leicht abbrechen, ist bei der Interpretation von Abbildung 14 Vorsicht geboten. Die tatsächlich in der

lebenden Krone am stehenden Baum vorhandene Anzahl an nicht überwallten Totästen konnte so während der Feldarbeiten nicht korrekt erhoben werden und wird folglich unterschätzt. Obwohl bei keiner der beiden Baumarten ein eindeutiger Trend erkannt werden kann, ergibt sich zumindest für die Baumart Eiche ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs und der Anzahl der in dem als Krone definierten Baumkompartiment vorhandenen Totästen, welcher jedoch positiv gerichtet ist ($r=0,372$, $r^2=0,138$, $p<0,01$). Für die Baumart Buche konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Trotz der Unsicherheiten der Analyse, welche durch das durch die Fällung verursachte Abbrechen der Totäste bedingt wurden, zeigt sich, dass sich die formulierte Hypothese nicht ablehnen lässt.

2. Die Astanzahl von Bäumen mit niedrigerem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe ist *per se* geringer. Dies würde im Einklang mit den Ergebnissen von MAGUIRE et al. (1994), SIPE & BAZZAZ (1994), BONSER & AARSEN (1994), WEINREICH (2000) und DUCHESNEAU et al. (2001) stehen, welche zeigten, dass abnehmende Lichtintensität einen negativen Einfluss auf die Astanzahl besitzt. Der positive Einfluss des in dieser Arbeit als Proxy für die Einzelbaumvitalität und damit als Weiser für den verfügbaren Standraum (vgl. ASSMANN (1961)) verwendeten durchschnittlichen Radialzuwachses auf 1,3m Schafthöhe auf die Anzahl der lebenden Äste lässt sich somit im Sinne der zuvor genannten Studien als positiver Einfluss zunehmender Lichtintensität und eventuell zunehmender Ressourcenverfügbarkeit auf die Anzahl der Äste deuten. Niedrige Lichteinstrahlung sowie Nährstoffverfügbarkeit könnten den Prozess der Astentwicklung zweifach beeinflussen: zum einen könnte die Entwicklung des Astes aus der im Vorjahr gebildeten Knospe durch starke Beschattung oder Nährstoffmangel verhindert werden, zum Anderen könnte auch die Knospenbildung selbst von der Mangelsituation betroffen sein.

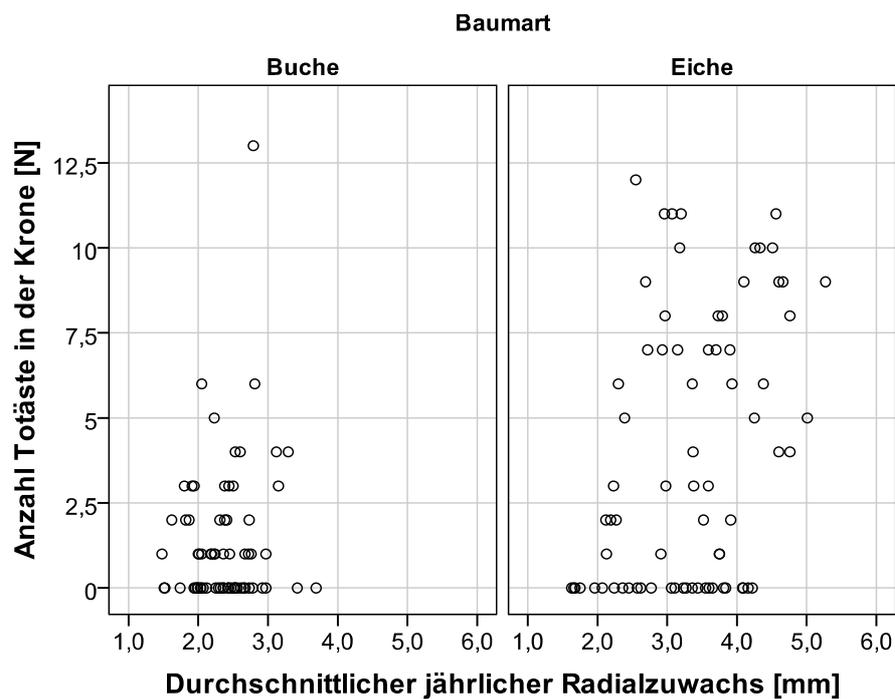


Abbildung 14: Anzahl der Totäste in der Krone in Abhängigkeit vom durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von Buche (links) und Eiche (rechts).

4.1.1.3.1 EINFLUSS DER BAUMART

Die Regressionsgleichungen beider Baumarten unterscheiden sich hinsichtlich der Steigung der Variable Kronenlänge, welche bei der Baumart Buche höher geschätzt wird, signifikant zum Niveau $p=0,05$. So berechnet sich auf Basis des vorliegenden Modells für eine Kronenlänge von 10 Metern für einen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm eine Anzahl von knappen 30 lebenden Buchen- aber nur eine Anzahl von etwa 22 lebenden Eichenästen (vgl. Abbildung 15). Bei einer Kronenlänge von 14 Metern und einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm besitzt die Buche mit etwa 38 lebenden Ästen schon 12 Äste mehr als die Baumart Eiche unter gleichen Bedingungen.

Für diesen Befund kommen zwei Erklärungen in Frage:

1. Eiche und Buche besitzen zunächst dieselbe Anzahl an gebildeten Ästen, welche jedoch bei der Baumart Eiche durch einen schneller fortschreitenden Mortalitätsprozess im Kronenbereich auch schneller dezimiert wird. Es verbleiben dadurch weniger lebende Äste im Kronenbereich der lichtbedürftigen Eiche im Gegensatz zur schattentoleranten Buche. Dementsprechend müsste

die Baumart Eiche eine größere Anzahl von Totästen in der Krone aufweisen. Tatsächlich konnte über eine Kovarianzanalyse mit Hilfe des Bootstrapping- Verfahrens²³ und dem Einsatz der Kronenlänge als Kovariate, festgestellt werden, dass die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche eine signifikant höhere Totastanzahl von Totästen mit einer Aststummellänge von über einem Zentimeter im Kronenbereich aufwies ($F(1,140)= 49,85$, $p<0,001$, partielles $\eta^2= 0,26$). Da jedoch die Anzahl der Totäste, welche im Zuge der Feldarbeiten aufgenommen wurde, weiteren Einflüssen wie dem Zersetzungs- und Überwallungsprozess oder dem Abbrechen im Zuge der Fällungen unterlegen war, kann die zuvor aufgestellte Hypothese weder bestätigt noch abgelehnt werden.

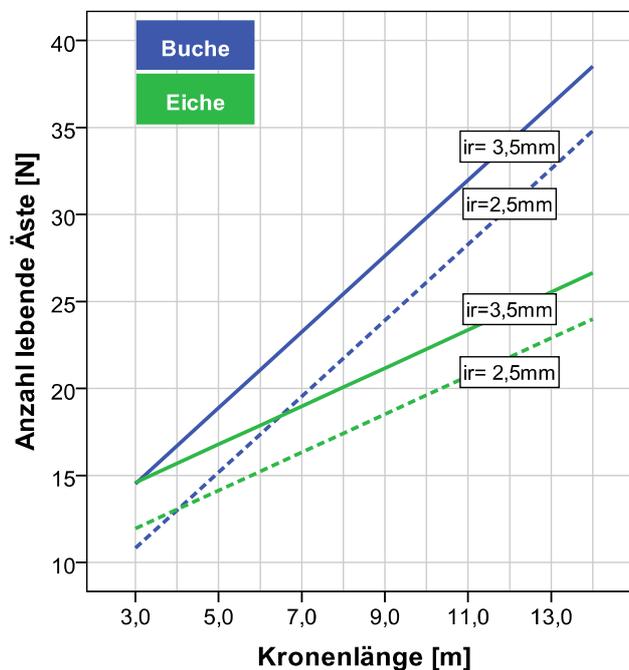


Abbildung 15 Anzahl der lebenden Äste in Abhängigkeit der Kronenlänge von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für Radialzuwachsszenarien von durchschnittlich 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linien) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linien).

- Die Buche als schattentolerante Baumart besitzt per se eine höhere Astanzahl. Diese Erklärung würde mit den Ergebnissen der im Zuge der Literaturrecherche zusammengetragenen Untersuchungen an unterschiedlich schattentoleranten Baumarten übereinstimmen (vgl. Kapitel 1.2.7.11.3). Ob nun jedoch bei beiden Baumarten unter sonst gleichen Bedingungen die gleiche Anzahl Knospen pro Höhentrieb ausgebildet werden, von denen sich bei der Baumart Eiche

²³ Da sich die Grundgesamtheit als nicht normalverteilt erwies.

jedoch weniger zu Ästen entwickeln (können), oder ob von vornherein ein Unterschied in der Anzahl der gebildeten Knospen je Höhentrieb existiert, vermag im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden.

4.1.1.3.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Die Anzahl der lebenden Äste reduziert sich mit abnehmendem durchschnittlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe. Dabei weisen die beiden Baumarten keinen signifikanten Unterschied auf. Bei einer Reduktion des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses um einen Millimeter reduziert sich die vom Modell prognostizierte Astanzahl bei der Baumart Buche um 3,7, bei der Baumart Eiche um 2,6 Äste (Abbildung 15). Wie schon zuvor diskutiert, steht dieses Ergebnis im Einklang zu Ergebnissen bisheriger Studien (vgl. Kapitel 1.2.3).

4.1.2 EINZELASTEBENE

4.1.2.1 ASTLÄNGE

In Anlehnung an das von LANGSHAUSEN (2009) formulierte Modell und unter weiterer Einbeziehung der Variablen „Astansatzwinkel“ (siehe Kapitel 2.1.2.1.1) soll die Beziehung

$$AL = a + b * AD + c * Bab_{1,3} + d * AW$$

Formel 18: Modell zur Prognose der Astlänge.

geprüft werden, wobei:

AL	= Astlänge [cm]
AD	= Astdurchmesser [mm]
$Bab_{1,3}$	= Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
AW	= Astansatzwinkel [°]
a, b, c	= empirische Koeffizienten

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurden unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen kürzere Äste in den unteren Kronenbereichen erwartet; eine vermehrte Kurztriebkettenbildung wird durch zunehmende Beschattung induziert, denn gerade bevor Äste absterben, bringen sie nur noch sehr kurze Jahrestriebe hervor (ROLOFF (1985)). Durch die Aufnahme

der Variable „Baumalter auf 1,3 Metern Höhe bei Astbildung“, welche dem Modell eine vertikale Komponente hinzufügt, konnten weitere 3,1% der Reststreuung im Astlängenmodell der Baumart Buche erklärt werden, womit sich das Bestimmtheitsmaß auf $r^2_{adj} = 0,808$ erhöhte. Für das Astlängenmodell der Baumart Eiche erreichte die Aufnahme dieser Variablen eine minimale Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes von 0,3%.

Jedoch besitzt die Variable „Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung“ in den Astlängenmodellen beider Baumarten ein negatives Vorzeichen. Damit prognostiziert das Modell für Äste, welche zu einem früheren Zeitpunkt gebildet wurden, im Vergleich zu gleichstarken Ästen jüngeren Jahrgangs eine größere Astlänge. Ein Ergebnis gleicher Aussage wurde durch den Einsatz einer Dummy - Variable für Äste der Schattkronen („0“) und Äste der Lichtkronen („1“) erzielt. Das entsprechende Modell prognostizierte unter der Annahme gleicher Voraussetzungen bei beiden Baumarten längere Äste im Schattkronenbereich. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Aussagen von ROLOFF (1985) und auch zu den Resultaten von LANGSHAUSEN (2009), der für Äste tieferer Kronenbereiche im Vergleich zu Ästen der oberen Kronenbereiche geringere Längen bei gleichem Durchmesser feststellte. Eine biologisch sinnvolle Interpretation ließ sich so auf Grundlage früherer Arbeiten nicht herleiten, weswegen dieses Ergebnis als mögliches Datenartefakt resultierend aus Bewirtschaftungseinflüssen gewertet wird. Die Variable wurde somit aus den weiteren Analysen ausgeschlossen.

Die Variable Astansatzwinkel vermochte im Modell der Baumart Buche weitere 1% der Gesamtstreuung erklären, im Modell der Baumart Eiche konnte diese Variable nicht zur Erklärung der verbliebenen Reststreuung beisteuern. Der Astansatzwinkel wirkt sich im Modell der Baumart Buche negativ auf die Astlänge aus: steil ansetzende Äste gleichen Durchmessers erweisen sich so als etwas länger im Vergleich zu Ästen mit größeren Astansatzwinkeln. Eine mögliche Erklärung wäre ein rascherer Verlust des Anschlusses an das Kronendach von horizontal ausgerichteten Ästen, welche daraufhin schneller der seitlichen Konkurrenz unterliegen. Es kommt zu Kurztriebkettenbildung (vgl. ROLOFF (2001) und Kapitel 1.2.7.5), während steiler ansetzende Äste das Astlängenwachstum noch nicht reduzieren müssen. Dieses Ergebnis schien somit zwar biologisch plausibel; da die Variable Astansatzwinkel jedoch nur noch ein zusätzliches Prozent der Gesamtstreuung erklärte, wurde ihr Beitrag zum Gesamtmodell mit Hilfe des AIC Kriteriums untersucht.

Baumart	Modellvariablen	K ²⁴	RSS	N	AIC
<i>Buche</i>	AD	3	1952299	207	1900,5
	AD, AW	4	1863396	207	2369,6

Tabelle 17: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Astlängenmodell der Baumart Buche.

Auf Grundlage dieser Analyse wurde die Variable Astansatzwinkel aus dem Modell zur Prognose der Astlänge entfernt, da diese nicht mehr zu einer maßgeblichen Verbesserung des Modells beitrug.

Die Modellformulierung wurde schließlich wie folgt modifiziert:

$$AL = a + b * AD$$

Formel 19: Modifiziertes Modell zur Prognose der Astlänge.

Es gelten die zuvor genannten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Astlänge [cm]	207	100	1270	327,5	204,3
	Astdurchmesser [mm]	207	10,8	93	26,6	14,3
<i>Eiche</i>	Astlänge [cm]	221	56	1270	319,2	223,4
	Astdurchmesser [mm]	221	9,7	128,7	32,5	20,7

Tabelle 18: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astlängenmodells nach Formel 19

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	-8,053	14,147			ns
	Astdurchmesser [mm]	12,57	0,468	0,779	1,0	***
<i>Eiche</i>	(Konstante)	-14,204	8,686			ns
	Astdurchmesser [mm]	10,242	0,225	0,904	1,0	***
<i>Buche</i>	N=207					
	r ² =0,779; r ² adj=0,778					
	Nicht standardisierte Residuen: 1902995,63 mit 205 FG					

²⁴ K= Anzahl der unabhängigen Variablen + Absolutglied + Fehlerterm ε

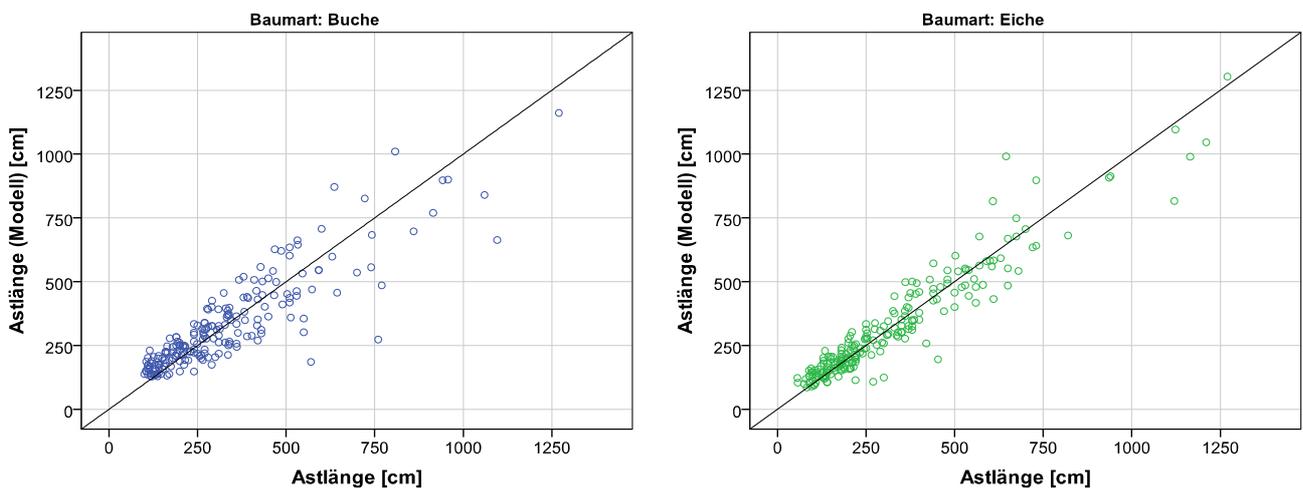
Eiche	N=221
	$r^2=0,904$; $r^2_{adj}=0,904$
	Nicht standardisierte Residuen: 1051386,5 mit 219 FG

Signifikanz Codes: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 19: Ergebnisse des linearen Regressionsmodells für die Astlänge nach Formel 19.

Das Astlängenmodell für die Eiche erreicht mit $r^2_{adj}=0,904$ ein höheres Bestimmtheitsmaß als das univariate Astlängenmodell, welches an die empirischen Daten der Buche angepasst wurde (hier $r^2_{adj}=0,778$) und kann somit etwas mehr als 10% zusätzliche Variabilität erklären. Die Konstante erweist sich in beiden Fällen als nicht signifikant von Null verschieden.

Bis auf wenige Ausreißer schätzt das Modell die Astlänge bei beiden Baumarten auf +/- 2 Meter genau und unverzerrt, wobei die Streuung der Residuen mit zunehmendem Astdurchmesser zunimmt. Die übliche Prüfung der Modellprämissen ergab keinen Hinweis auf deren Verletzung. Residuen erwiesen sich als normalverteilt, Autokorrelation konnte für das Modell der Baumart Buche für eine Durbin-Watson- Statistik mit 1,804 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,01$ ausgeschlossen werden; für das Modell der Baumart Eiche lag die Durbin- Watson- Statistik mit einem Wert von 1,673 innerhalb des Indifferenzbereichs (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)).



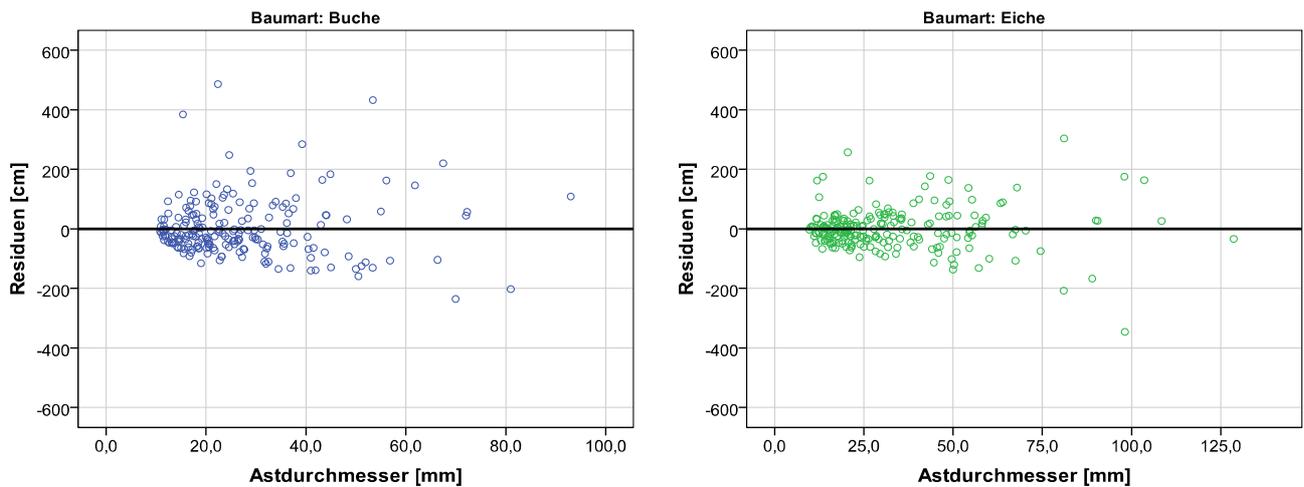


Abbildung 16: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über der unabhängigen Variable Astdurchmesser für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Bei beiden Baumarten prognostiziert das vorliegende Modell zunehmende Astlängen mit zunehmendem Astdurchmesser. KINT et al. (2010), welche den Astdurchmesser als Funktion der Astlänge modellierten, kamen zu demselben Ergebnis, welches von den Autoren als konsistent mit dem hydraulischen Prinzip der „Pipe Model Theory“ (SHINOZAKI et al. (1964)) gewertet wird: Längere Äste, welche mehr Assimilationsorgane aufweisen, besitzen einen höheren Wasserbedarf und benötigen daher mehr wasserleitende Gefäße (KINT et al. (2010)). Als weiterer Grund werden von den Autoren mechanische Erfordernisse angeführt. Demzufolge ist dieses Resultat als biologisch plausibel zu beurteilen.

4.1.2.1.1 EINFLUSS DER BAUMART

Ogleich bei beiden Baumarten das Vorzeichen für die Variable Astdurchmesser gleichgerichtet ist, unterschieden sich die beiden baumartenspezifischen Modelle statistisch signifikant hinsichtlich der Steigung. Bei gleichem Astdurchmesser weist die Baumart Buche längere Äste als die Baumart Eiche auf. Während bei der Baumart Eiche ein Astdurchmesser- Astlängenverhältnis von 1:100 prognostiziert wird, ist auf Basis des erstellten Modells für die Baumart Buche ein Astdurchmesser- Astlängenverhältnis von 1:125 zu konstatieren.

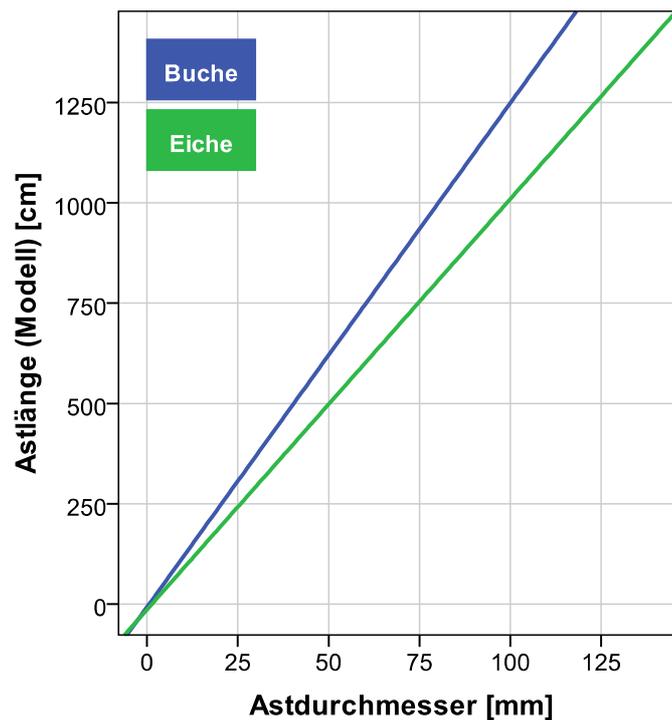


Abbildung 17: modellierte Astlänge in Abhängigkeit des Astdurchmessers für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur).

4.1.2.2 ASTDURCHMESSER

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 1.2.2) und den Überlegungen zum Forschungsansatz (vgl. Kapitel 2.1.2.1.2) wurde das Astdurchmessermodell wie folgt formuliert:

$$AD = a + b * BHD + c * Bab_{1,3} + d * Alter_{1,3} + e * AW$$

Formel 20: Modell zur Prognose des Astdurchmessers.

wobei:

AD	= Astdurchmesser [mm]
BHD	= Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]
$Bab_{1,3}$	= Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
$Alter_{1,3}$	= Alter _{1,3} [Jahre]
AW	= Astansatzwinkel in Bezug auf die Vertikale [°]
a, b, c, d, e	= empirische Koeffizienten

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Astdurchmesser [mm]	1401	9,8	101,5	21,65	11,23
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	69	4,2	24,8	11,6	5,36
	Alter _{1,3} bei Astbildung [Jahre]	1401	1	48	17,66	10,08
	Alter _{1,3} [Jahre]	69	8	51	23,13	11,32
	Astansatzwinkel [°]	1401	5	90	45,22	12,96
<i>Eiche</i>	Astdurchmesser [mm]	1267	7,8	128,7	25,79	17,48
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	74	1,9	26,6	12,6	6,5
	Alter _{1,3} bei Astbildung [Jahre]	1267	1	27	11,91	6,35
	Alter _{1,3} [Jahre]	74	4	29	15,84	7,58
	Astansatzwinkel [°]	1267	10	100	46,56	14,78

Tabelle 20: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astdurchmessermodells.

Äste, die bei der Datenaufnahme als Zwiesel klassifiziert wurden oder sonstige Auffälligkeiten aufwiesen (Verletzungen, Gabelung der Astachse am Astansatz, Verwachsungen, etc.) wurden aus dem Datensatz, auf dessen Grundlage die Parametrisierung erfolgte, ausgeschlossen. Der Anteil der aus der Analyse ausgeschlossenen Äste beträgt bei der Baumart Buche 4%, bei der Baumart Eiche 6,7%.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r^2	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	16,397	1,036			***
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	0,542	0,093	0,173	5,378	***
	Alter _{1,3} bei Astbildung [Jahre]	-1,220	0,048	0,137	4,815	***
	Alter _{1,3} [Jahre]	1,046	0,064	0,110	10,653	***
	Astansatzwinkel [°]	-0,159	0,017	0,033	1,022	***

Eiche	(Konstante)	12,639	1,440			***
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	1,006	0,087	0,231	3,644	***
	Alter _{1,3} bei Astbildung [Jahre]	-3,967	0,102	0,203	5,378	***
	Alter _{1,3} [Jahre]	3,140	0,116	0,205	8,634	***
	Astansatzwinkel [°]	-0,190	0,021	0,023	1,135	***

Buche	N=1401
	r ² =0,453; r ² adj=0,452
	Nicht standardisierte Residuen: 96640,3 mit 1400 FG

Eiche	N=1267
	r ² =0,661; r ² adj=0,660
	Nicht standardisierte Residuen: 131194,2 mit 1262 FG

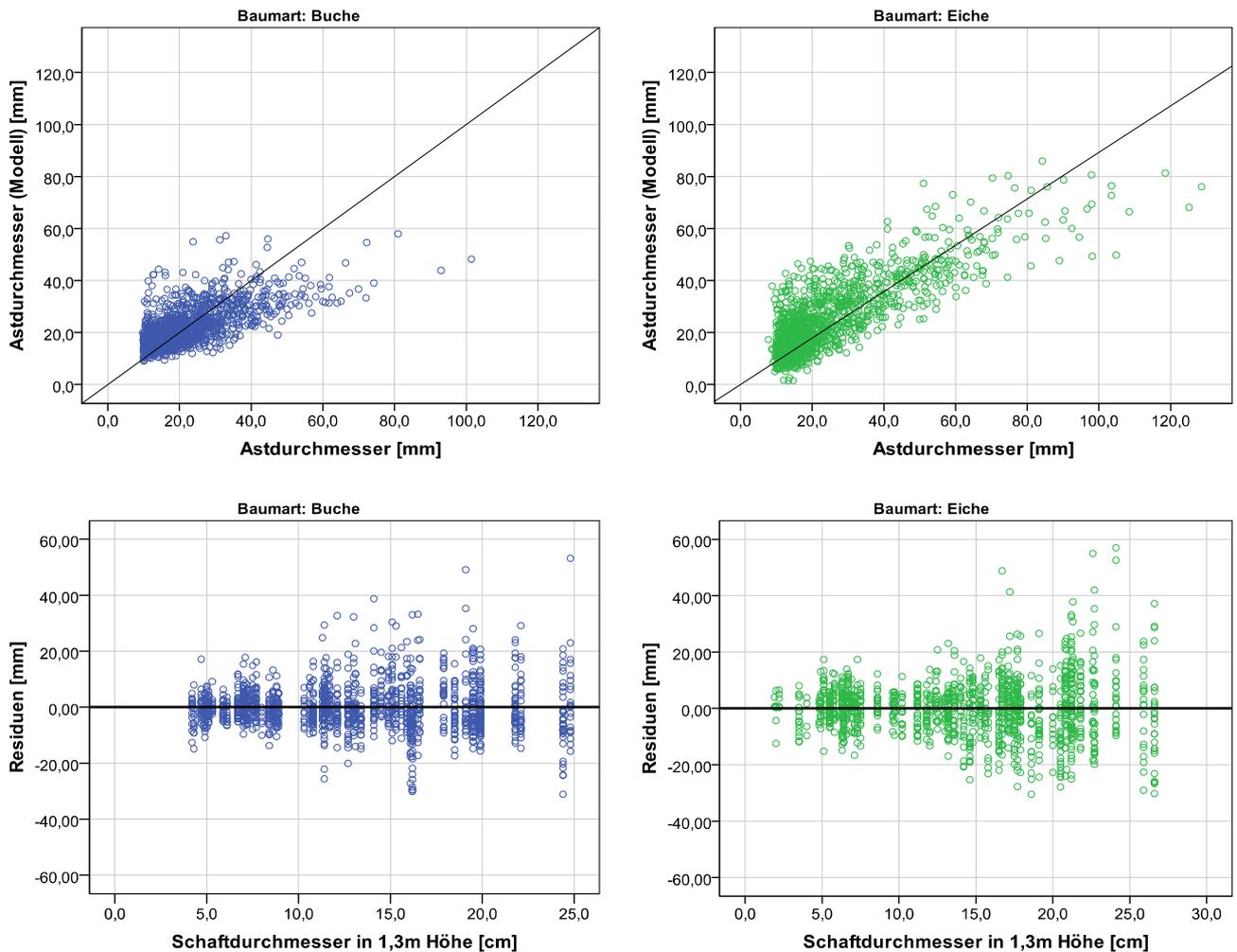
Signifikanz Codes: *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001, ns= nicht signifikant

Tabelle 21: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für die Prognose des Astdurchmessers nach Formel 20.

Mit dem erstellten Modell können bei der Baumart Buche 45,2% der Streuung der Astdurchmesser des Datenmaterials erklärt werden; die Streuung der empirischen Daten der Astdurchmesser der Eiche lassen sich durch das Modell zu 66,0% erklären. Alle gewählten Variablen erwiesen sich als signifikant zum Niveau von 0,001.

Der Variance Inflation Factor (VIF), welcher zur Überprüfung der Multikollinearität dient, liegt im Modell der Baumart Buche für die Variable Alter auf 1,3 Metern Schafthöhe über dem Grenzwert von 10. Hier ist nach SACHS & HEDDERICH (2006) Multikollinearität zu vermuten. Tatsächlich wurde eine Korrelation von r²= 0,8 zwischen der Variable Alter auf 1,3 Metern Schafthöhe und der Variablen Schaftdurchmesser in 1,3 Metern Höhe und von r²= 0,78 zwischen dem Alter auf 1,3 Metern Schafthöhe und dem Baumalter auf 1,3 Metern Schafthöhe zum Zeitpunkt der Astbildung für das Datenmaterial der Baumart Buche festgestellt. Mit zunehmender Multikollinearität werden die Standardfehler der Regressionskoeffizienten größer und damit deren Schätzung ineffizient (BACKHAUS (1996)). Um die Regressionskoeffizienten hinsichtlich ihrer Stabilität bezüglich Betrag und Vorzeichen zu überprüfen, wurde für mehrere zufällig ausgewählte Teilstichproben eine separate Regression angepasst. Mit Hilfe dieser Analyse konnte festgestellt werden, dass sowohl Vorzeichen wie auch Betrag der Parameterschätzer akzeptable Stabilität aufwiesen.

Die Residuen erwiesen sich als normalverteilt. Die Werte der Durbin – Watson - Statistik für die Modelle beider Baumarten unterschreiten mit $DW = 1,56$ (Buche), bzw. $DW = 1,63$ (Eiche) die von den Tabellenwerken der STANFORD UNIVERSITY (2010) aufgeführten unteren Grenzwerte von 1,870 (Buche) bzw. 1,862 (Eiche). Die Variation des Standardfehlers wird aus diesem Grunde unterschätzt, Vertrauensintervalle werden tendenziell zu eng angenommen und wahre Nullhypothesen werden früher verworfen (vgl. HEIN (2004)).



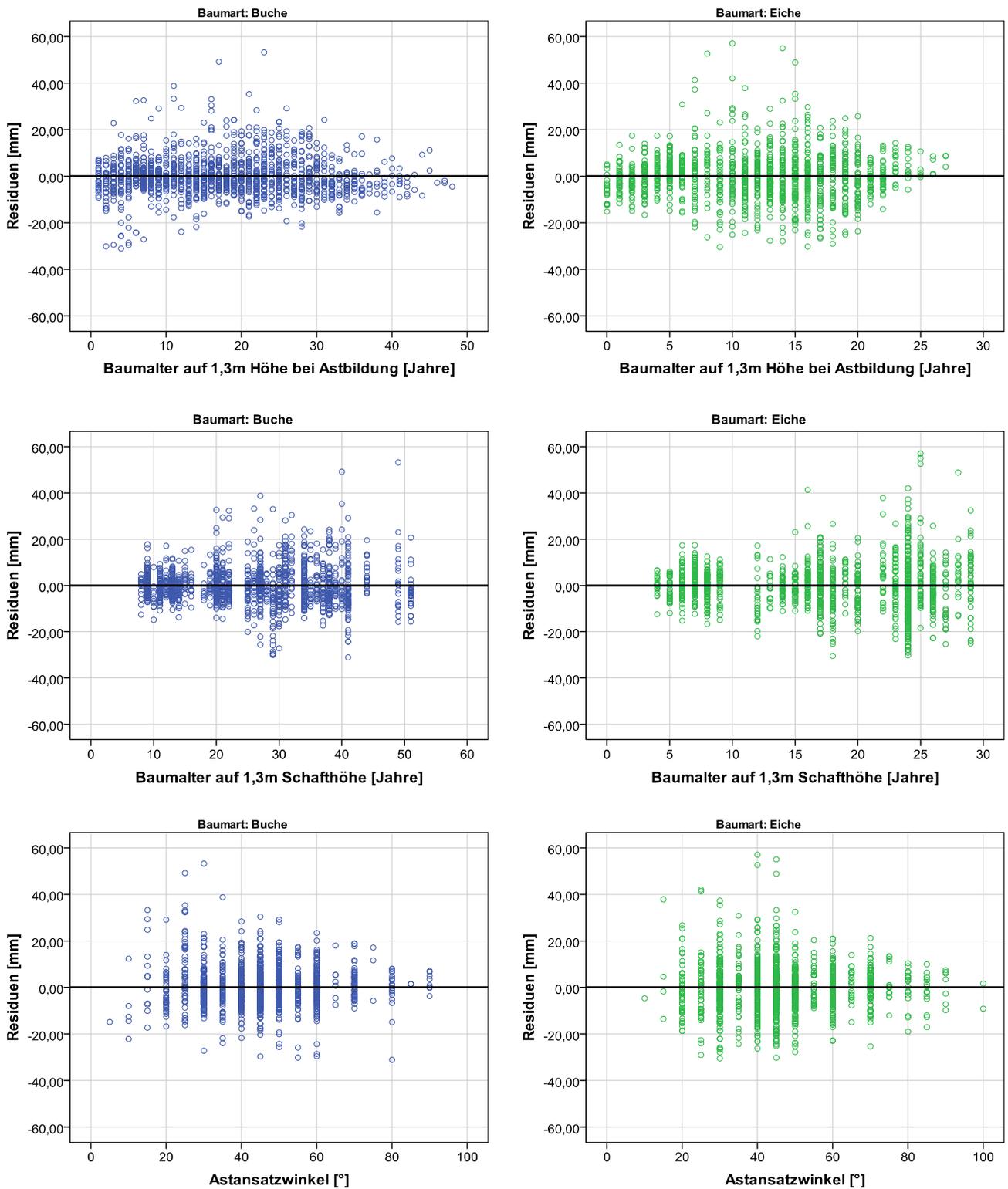


Abbildung 18: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Bei beiden Baumarten ist eine Überschätzung der geringsten Astdurchmesser durch das Modell um bis zu 3 Zentimeter zu beobachten. Des Weiteren kommt es bei Anwendung des Modells bei beiden Baumarten zu einer Unterschätzung der größten Astdurchmesser um bis zu 6 Zentimetern.

Hinsichtlich der Vorzeichen verhält sich das Modell biologisch plausibel. *Ceteris paribus* prognostiziert das Modell:

- größere Astdurchmesser bei steigendem Schaftdurchmesser in 1,3 Metern Höhe. Zunächst ist dieses Resultat im Hinblick auf die unterschiedlichen Entwicklungsstufen der Probestämme, deren Daten in die vorliegende Analyse einfließen, zu werten. Ältere Bäume weisen sowohl einen größeren Schaftdurchmesser wie auch ältere und damit dickere Äste auf. In Verbindung mit der Variable „Alter_{1,3}“ können Rückschlüsse hinsichtlich des Einflusses des Radialzuwachses in selber Höhe gezogen werden: Bäume gleichen Alters, die geringeren Konkurrenzeinflüssen durch benachbarte Bestandesmitglieder ausgesetzt sind, können ihre Kronen weiter ausdehnen. Mit einer breiteren Krone geht auch ein größerer Schaftdurchmesser bei gleichem Alter einher (vgl. Kapitel 4.1.1.2). Sei $Astdurchmesser = f(Astlänge)$ (vgl. Kapitel 4.1.2.1), resultiert daraus unter der Voraussetzung, dass alle weiteren Variablen konstant gehalten werden, ein größerer mittlerer Astdurchmesser der kronenformenden Äste für Bäume mit größerem Schaftdurchmesser auf 1,3 Metern Höhe (bzw. einem höheren mittleren jährlichen Radialzuwachs auf 1,3 Metern Schafthöhe). Umgekehrt jedoch wird der jüngere Baum zweier gleichstarker Bäume unter sonst gleichen Voraussetzungen einen geringeren Astdurchmesser aufweisen. Dieses Resultat ist dem geringeren maximalen Astalter des jüngeren Baums zuzuschreiben und erscheint somit desgleichen biologisch plausibel.
- Ein geringerer Astdurchmesser bei ansteigendem Alter auf 1,3 Metern Höhe bei Astbildung. Durch diese Variable wird die vertikale Charakteristik der Astaltersstruktur an einem Baum beschrieben. Je älter ein Baum in einer Höhe von 1,3 Metern zum Zeitpunkt der Astbildung wurde, desto jünger wurde der jeweils gebildete Ast zum Aufnahmezeitpunkt vorgefunden. Unter gleichen Voraussetzungen und unter der Bedingung gleichen durchschnittlichen jährlichen Astradialzuwachses und der jährlichen Ausformung eines Jahrrings, besitzen ältere Äste größere Astdurchmesser als jüngere Äste. Auch dies ist als biologisch plausibel zu beurteilen.
- Ein höherer Astdurchmesser mit ansteigendem Baumalter in 1,3 Metern Schafthöhe. Werden alle weiteren Variablen konstant gehalten, prognostiziert das Modell geringere Astdurchmesser

bei jüngeren Bäumen. In Verbindung mit der Variable Baumalter auf 1,3 Metern Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung beschreibt diese Variable das erreichte Astalter zum Aufnahmezeitpunkt und besitzt somit des Weiteren biologische Plausibilität bei der Prognose der Astdurchmesser, da jüngeren Ästen unter gleichen Voraussetzungen ein geringerer Astdurchmesser prognostiziert wird. In Verbindung mit dem Schaftdurchmesser in 1,3 Metern Höhe lassen sich für verschiedene Radialzuwachsszenarien Astdurchmesserprognosen erstellen.

- Ein größerer Astdurchmesser mit abnehmendem Astansatzwinkel (Bezug: Vertikale). Steiler ansetzende Äste besitzen somit unter gleichen Voraussetzungen größere Astdurchmesser.

4.1.2.2.1 EINFLUSS DER BAUMART

Die Vorzeichen der einzelnen Parameter sind bei beiden Baumarten gleich gerichtet. Beide Modelle unterscheiden sich somit nur in den Beträgen der Schätzer. Dabei besitzen die auf den einzelnen Baum bezogenen Variablen im Modell der Baumart Eiche jeweils einen doppelt- bis dreifach so großen Einfluss auf den Astdurchmesser im Vergleich zur Baumart Buche. Lediglich der Einfluss des Astansatzwinkels wirkt bei beiden Baumarten in ähnlichem Maße auf den Astdurchmesser ein.

Diese Beobachtung bestätigte der Vergleich beider Baumarten in einem gemeinsamen Modell: Alle Variablen einschließlich des Interzepts aber mit Ausnahme des Astansatzwinkels unterscheiden sich signifikant voneinander. In der Summe ergibt sich auf Grundlage des erstellten Modells für Äste der Baumart Eiche ein steilerer Anstieg des Astdurchmessers mit zunehmendem $\text{Alter}_{1,3}$, was einen im Vergleich zur Baumart Buche erhöhten Astradialzuwachs impliziert. So ergibt sich unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen zum Beispiel im $\text{Alter}_{1,3}$ von 15 Jahren ein Astdurchmesserunterschied von knappen 2 Zentimetern zwischen den Ästen von Buche und Eiche, welcher durch die stärkere Akzentuierung des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe sowie des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe im Modell der Baumart Eiche entsteht (vgl. Abbildung 19).

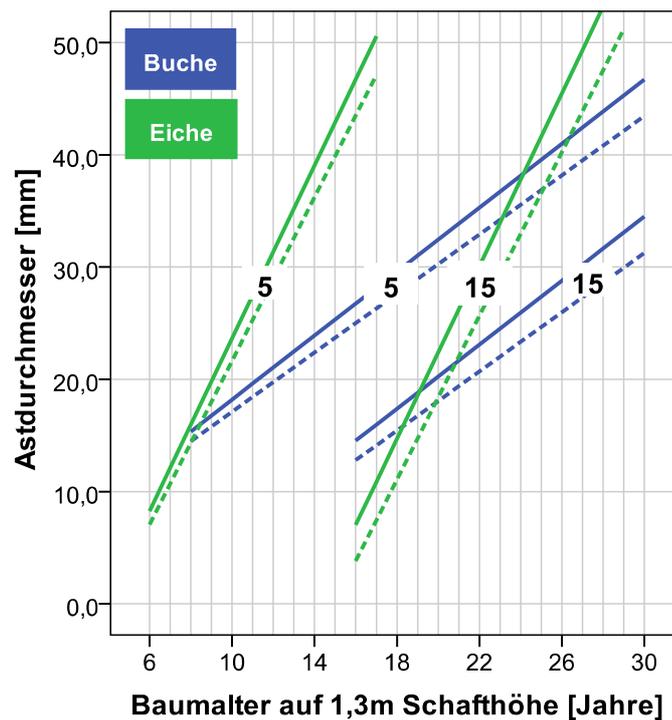


Abbildung 19: Darstellung des vom Modell prognostizierten Astdurchmessers in Abhängigkeit vom Alter_{1,3} für zwei verschiedene Radialzuwachszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) sowie für zwei unterschiedliche vertikale Astpositionen am Schaft (5=Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung: 5 Jahre; 15= Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung: 15 Jahre) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) und einem konstanten Astansatzwinkel von 40°. Die dargestellten Funktionen entsprechen dem Gültigkeitsbereich des vorliegenden Datenmaterials.

Implizit wird vom Modell bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe von 3,5mm für die Baumart Buche ein mittlerer jährlicher Astradialzuwachs von 0,7mm prognostiziert, unter gleichen Bedingungen für die Baumart Eiche jedoch 1,9mm. Mit diesem Resultat lässt sich somit auch die stärkere Akzentuierung der Parameterschätzer Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung erklären: es besteht in der Krone der Eiche auf Grundlage des vorliegenden Modells ein stärkeres vertikales „Astdurchmessergefälle“ aufgrund der hohen Radialzuwachsleistungen der Äste (vgl. Abbildung 20). Ebenso ist somit der höhere Einfluss der Variable Alter_{1,3} auf den Astdurchmesser im Modell der Baumart Eiche erklärbar.

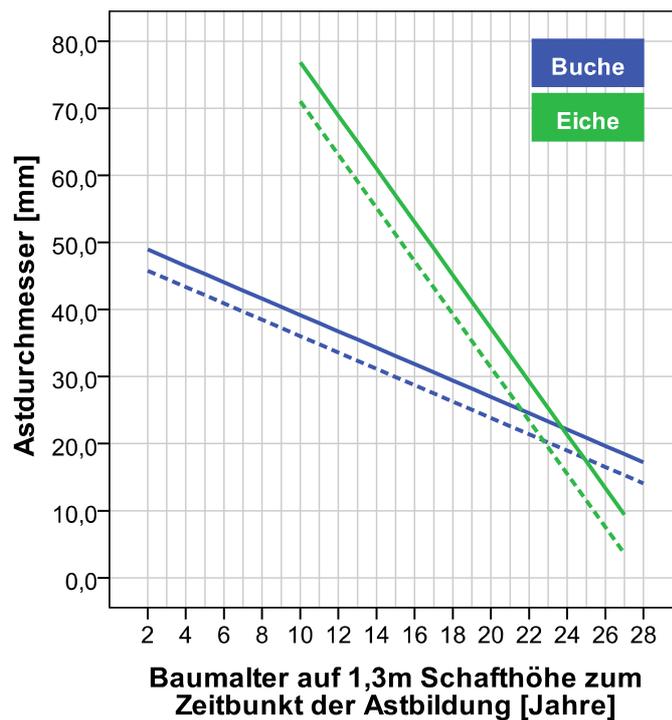


Abbildung 20: Darstellung der vom Modell prognostizierten vertikalen Astdurchmesserverteilung für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem angenommenen $\text{Alter}_{1,3}$ von 29 Jahren und einem konstanten Astansatzwinkel von 40° . Die dargestellten Funktionen entsprechen dem Gültigkeitsbereich des vorliegenden Datenmaterials.

4.1.2.2.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Ebenfalls signifikant stärkeren Einfluss besitzt die Variable Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe im Astdurchmessermodell der Baumart Eiche. Abbildung 19 visualisiert die Astdurchmesserentwicklung über dem $\text{Alter}_{1,3}$ für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien. Durch die allmähliche Vergrößerung der Schaftdurchmesserdiffereenz des Radialzuwachsszenarios 2,5mm und 3,5mm wird vom Modell auch eine allmähliche Vergrößerung der Astdurchmesserdiffereenz beider Szenarien vorhergesagt. So berechnet sich für die Baumart Buche im $\text{Alter}_{1,3}$ von 20 Jahren für Äste, die bei einem $\text{Alter}_{1,3}$ von 15 Jahren gebildet wurden, ein Astdurchmesserunterschied von etwa 2mm zwischen den einzelnen Radialzuwachsszenarien. Für Äste der Baumart Eiche berechnet sich hingegen unter gleichen Bedingungen mit 4mm ein doppelt so großer Astdurchmesserunterschied.

4.1.2.3 ASTRADIALZUWACHS

Angelehnt an die Modellansätze von MÄKINEN (1999a) und MÄKINEN (2002) zur Prognose des Astradialzuwachses bei *Pinus sylvestris* und *Betula pendula* sollte der Einfluss des laufenden Astalters sowie des jährlichen Radialzuwachs des Baumes auf 1,3m Schafthöhe auf den jährlichen Astradialzuwachs von Buche und Eiche untersucht werden. Voruntersuchungen ergaben zudem eine Reduktion des Astradialzuwachses mit zunehmendem laufendem Astalter (vgl. Abbildung 22).

Um zunächst den Zusammenhang der jährlichen Variationen des Radialzuwachses von Schaft und Ästen im Detail nachzuvollziehen, musste der jeweilige Alterstrend aus den Rohdaten entfernt werden. Dem Vorgehen von MÄKINEN (2002) folgend, wurde dazu eine Polynomfunktion dritten Grades gewählt, die für jeden Ast bzw. für jede Stammscheibe individuell angepasst wurde:

$$ir_{1,3/Ast} = a + b * Alter(lfd)_{1,3/Ast} + c * Alter(lfd)_{1,3/Ast}^2 + d * Alter(lfd)_{1,3/Ast}^3$$

Formel 21: Polynomfunktion dritten Grades zur Entfernung des Alterstrends aus den gemessenen Radialzuwächsen.

wobei:

$ir_{1,3/Ast}$ = jährlicher Radialzuwachs des Schaftes auf 1,3m Schafthöhe respektive Astes [mm]

$Alter(lfd)_{1,3/Ast}$ = laufendes Alter_{1,3} respektive laufendes Astalter [Jahre]

Die absoluten Werte wurden in Zuwachsindizes transformiert, welche den tatsächlich gemessenen Wert in Relation zu dem vom Modell nach Formel 21 prognostizieren Wert darstellen.

Die Zuwachsindizes des Schaftes sowie der Äste besitzen teilweise übereinstimmende Tendenzen, wie den Zeitraum von 1998 bis 2008 bei Buche oder die Jahre 1994 bis 1999 bei der Baumart Eiche, partiell ist jedoch auch eine weniger gute Übereinstimmung oder sogar Gegenläufigkeit der Kurven festzustellen.

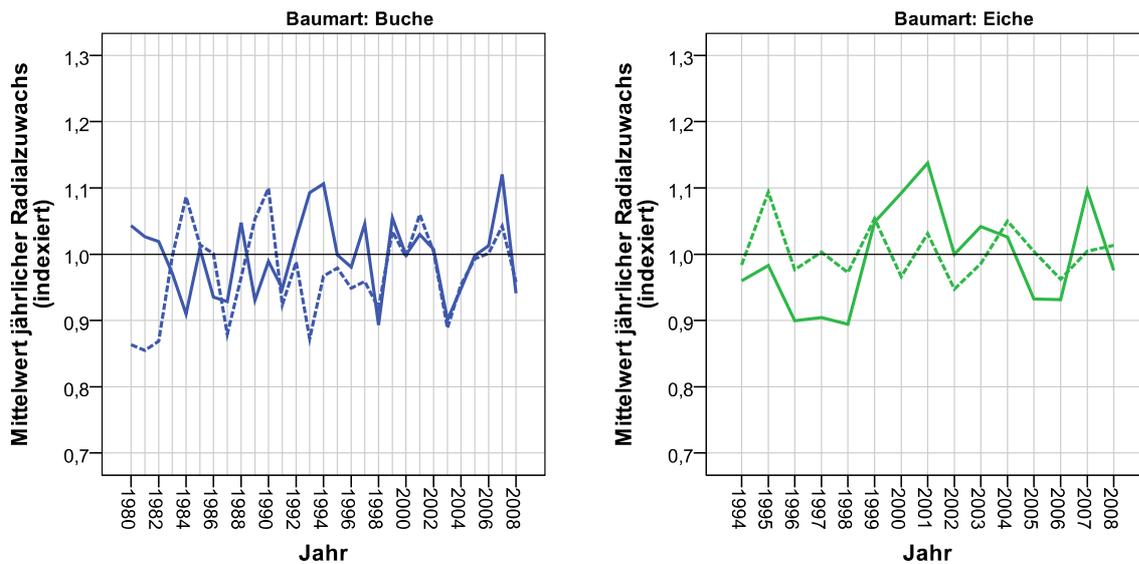


Abbildung 21: Mittlere jährliche Zuwachsindizes des Stammes (durchgezogene Linie) sowie der Äste (gestrichelte Linie) von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur) aller untersuchten Bäume.

Überdies wurde ein Einfluss des Astansatzwinkels auf den jährlichen Astradialzuwachs vermutet. Da Bäume unterschiedlicher Entwicklungsstufen untersucht wurden, wurde zusätzlich das $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung mit in die Analyse aufgenommen, um baumspezifische ontogenetische Einflüsse auf den Astradialzuwachs untersuchen zu können. Zusätzliche Variablen, wie etwa der Abstand zum nächstoberen Nachbarast, deren Einfluss auf den Astradialzuwachs überprüft wurde, konnten keinen signifikanten Beitrag zur Klärung der Gesamtstreuung beitragen.

Das erreichte Astalter konnte insbesondere bei der Baumart Eiche einen signifikanten Beitrag zur Klärung der Gesamtstreuung beitragen, da der jährliche Astradialzuwachs vor allem bei dieser Baumart eine starke Abhängigkeit vom jeweils erreichten Astalter aufwies (vgl. Abbildung 22). Es steht jedoch zu vermuten, dass die in Abbildung 22 dargestellte Sachlage aus einem Datenartefakt resultiert, welches durch die dieser Arbeit zugrunde liegenden Aufnahmemethodik zustande kam, die die vitalsten Äste favorisierte. Der vergleichsweise hohe jährliche Radialzuwachs der ältesten Äste könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass diese die am längsten Überlebenden und somit auch vitalsten Äste des Baumes darstellen und einen Vergleich mit jüngeren Ästen somit schwieriger machen. Da diese Variable in Verbindung mit dem $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung zu widersprüchlichen Aussagen führte, die biologisch nicht interpretierbar waren, wurde sie trotz ihres vergleichsweise hohen Einflusses auf die Klärung der Gesamtstreuung insbesondere im Modell der Baumart Eiche nicht in das endgültige Astradialzuwachsmo- dell eingeschlossen.

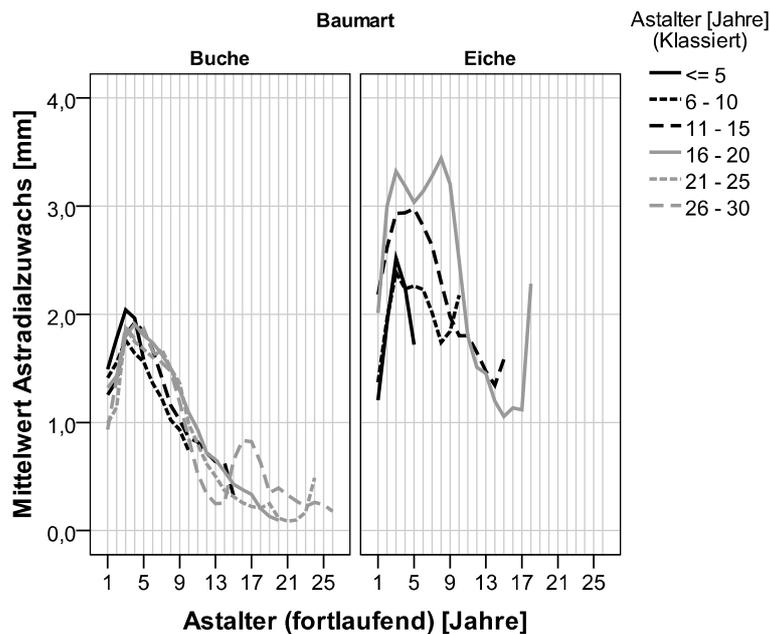


Abbildung 22: Mittelwert des jährlichen Astradialzuwachses über dem Aalter (fortlaufend) von Buche (links) und Eiche (rechts) aufgeteilt nach Aalterklassen. Minimalbelegung: 3 Beobachtungen/Aalter.

Als generell problematisch bei der Parametrisierung des Astradialzuwachsmodells erwies sich, dass die gewählten unabhängigen Variablen bei beiden Baumarten immer nur einen kleinen Teil der Gesamtstreuung erklären konnten. So konnten Modelle mit 6 bis 7 unabhängigen Variablen angepasst werden, welche zwar alle signifikant ($p < 0,001$), jedoch nur zu einem Anteil von unter 1% zur Klärung der Gesamtstreuung beitrugen.

Die Durbin- Watson- Statistik, deren Wert auch als Hinweis auf bislang im Modell fehlende Variablen gewertet werden kann, konnte durch die Aufnahme weiterer Variablen erhöht werden. Nach einer ersten Variablenselektion hinsichtlich der biologischen Plausibilität wurde in Abwägung zwischen angemessener Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes und der gebotenen Parsimonität bei der Auswahl der Variablen mit Hilfe des AIC entschieden, welche der Variablen, die nur noch zu einem sehr geringen Anteil ($\leq 1\%$) zur Klärung der Gesamtstreuung beitrugen, in das Modell aufgenommen werden sollten. Aufgrund der Ergebnisse der AIC- Auswertung wurde der Astansatzwinkel als weitere maßgeblich zur Erklärung der Streuung des Astradialzuwachses beitragende Variable bei der Baumart Eiche gewählt.

Baumart	Modellvariablen	K ²⁵	RSS	N	AIC
Eiche	Alter(lfd) _{Ast} , ir _{1,3} , Bab _{1,3}	5	216,46	1740	-3616,56
	Alter(lfd) _{Ast} , ir _{1,3} , Bab _{1,3} , AW	6	211,33	1740	-3656,30

Tabelle 22: Variablenselektion mit Hilfe des AIC für das Astradialzuwachsmo­dell der Baumart Eiche.

Es wurde eine logarithmische Transformation des Regressanden gewählt. Da auch die ausfallenden Jahrringe von Ästen der Baumart Buche mit einem Radialzuwachs von Null in das Modell mit einbezogen werden sollten, wurde der Wert des Regressanden vor dem Logarithmieren zunächst um den Wert eins erhöht.

Die Regressionsgleichung wurde somit wie folgt formuliert:

$$\ln(ir_{Ast} + 1) = a + b * \text{Alter}(lfd)_{Ast} + c * ir_{1,3} + d * AW + e * Bab_{1,3}$$

Formel 22: Modell zur Prognose des Astradialzuwachses.

wobei:

- ir_{Ast} = jährlicher Astradialzuwachs [mm]
- $\text{Alter}(lfd)_{Ast}$ = laufendes Astalter [Jahre]
- $ir_{1,3}$ = jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]
- AW = Astansatzwinkel in Bezug auf die Vertikale [°]
- $Bab_{1,3}$ = Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
- a, b, c, d, e = empirische Koeffizienten

Der Astradialzuwachs zeichnete sich gerade in den ersten und letzten Lebensjahren durch eine besonders hohe Variabilität aus. Aus diesem Grund wurde die Analyse auf die Astlebensjahre von Alter 3 bis Alter 20 beschränkt. Durch dieses Verfahren lies sich die Gesamtanpassung des Modells der Baumart Buche um 4,7%, das Modell der Baumart Eiche um 12,1% erhöhen.

²⁵ K= Anzahl der unabhängigen Variablen + Konstante + Fehler ϵ

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	jährlicher Astradialzuwachs [mm]	2851	0,00	5,68	1,174	0,867
	laufendes Astalter [Jahre]	2851	4	20	8,81	4,038
	jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]	2851	0,28	6,96	2,409	0,978
	Astansatzwinkel [°]	413	10	80	41,92	12,761
	Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	413	1	44	15,96	9,224
<i>Eiche</i>	jährlicher Astradialzuwachs [mm]	1740	0,06	7,62	2,161	1,235
	laufendes Astalter [Jahre]	1740	4	20	7,31	3,087
	jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]	1740	0,38	8,89	3,311	1,220
	Astansatzwinkel [°]	384	15	85	42,28	13,115
	Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	384	1	27	11,50	6,045

Tabelle 23: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astradialzuwachsmodells.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r^2	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	1,066	0,028			***
	laufendes Astalter [Jahre]	-0,065	0,001	0,355	1,013	***
	jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]	0,124	0,006	0,064	1,033	***
	Astansatzwinkel [°]	-0,005	0,000	0,024	1,032	***
	Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	0,007	0,001	0,023	1,014	***
<i>Eiche</i>	(Konstante)	0,900	0,055			***
	laufendes Astalter [Jahre]	-0,036	0,003	0,105	1,063	***
	jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]	0,113	0,007	0,071	1,122	***
	Astansatzwinkel [°]	-0,004	0,001	0,018	1,032	***
	Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	0,020	0,002	0,060	1,125	***

Buche	N=2851
	$r^2=0,466$; $r^2_{adj}=0,465$
	Nicht standardisierte Residuen: 266,916 mit 2846 FG

Eiche	N=1740
	$r^2=0,254$; $r^2_{adj}=0,252$
	Nicht standardisierte Residuen: 211,339 mit 1735 FG

*Signifikanz Codes: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$, ns= nicht signifikant*

Tabelle 24: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für die Prognose des Astradialzuwachses nach Formel 22

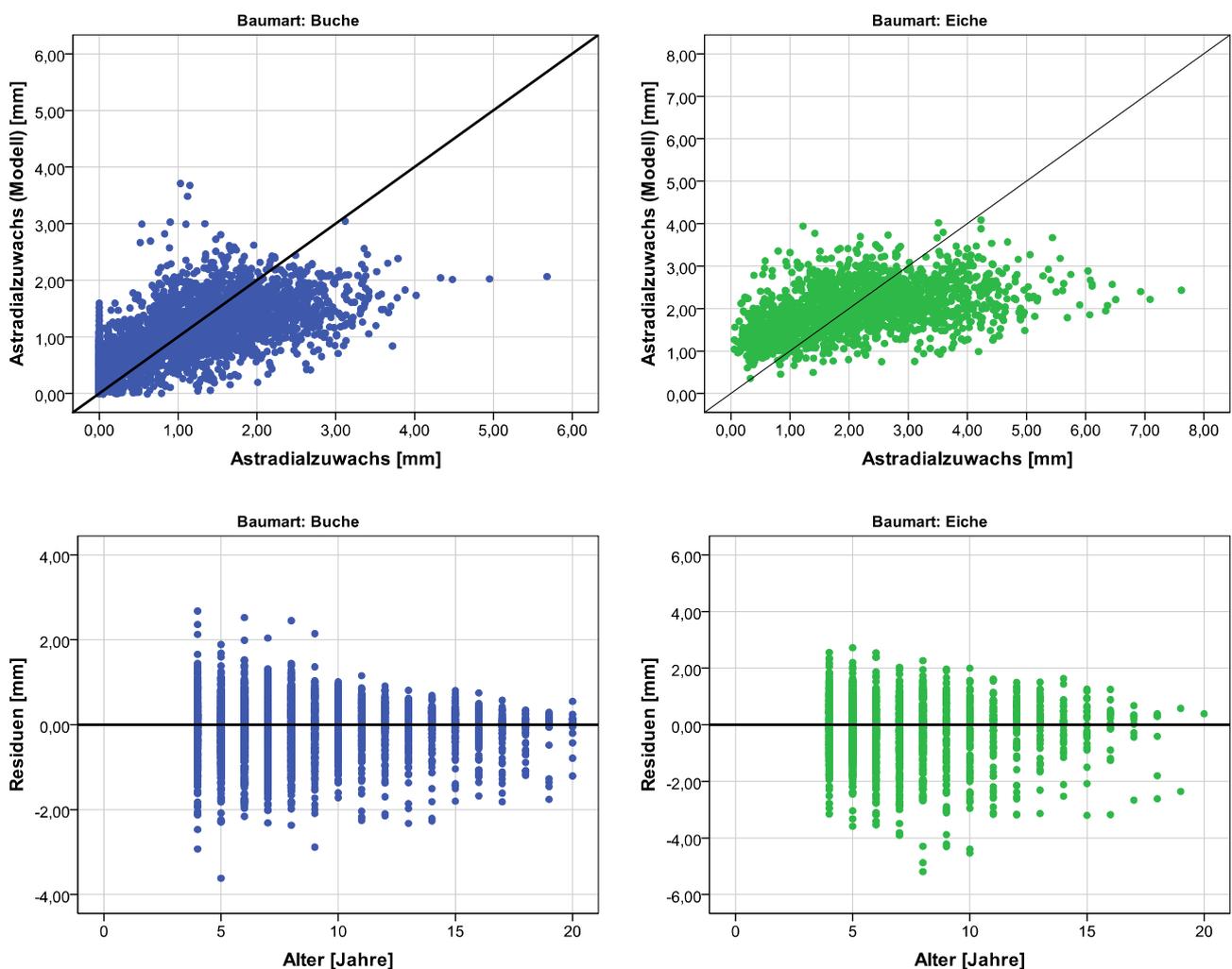
Das parametrisierte Modell kann 46,5% der Gesamtstreuung des Astradialzuwachses im Modell der Buche, jedoch nur 25,3% der Gesamtstreuung des Astradialzuwachses im Modell der Baumart Eiche erklären. Einflussreichste Variable ist bei beiden Baumarten das laufende Astalter, welches 35,5% der Streuung im Modell der Baumart Buche, jedoch nur 10,5% der Gesamtstreuung im Modell der Baumart Eiche zu erklären vermag. Der jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe kann weitere 6,4% (Buche) beziehungsweise 7,1% (Eiche) der Gesamtstreuung erklären. Astansatzwinkel und Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung tragen im Modell der Baumart Buche zu jeweils etwas mehr als 2% zur Verringerung der Gesamtstreuung bei, wohingegen der Astansatzwinkel im Modell der Baumart Eiche nur noch 1,8% der restlichen Streuung erklärt; das Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung kann hier mit weiteren 6% zur Verringerung der unerklärten Reststreuung beitragen.

Die Toleranzwerte beider Modelle deuten nicht auf kritische Multikollinearität hin. Die Residuen sind normalverteilt und homoskedastisch. Jedoch weist die Durbin – Watson - Statistik mit Werten von 0,722 (Buche) beziehungsweise 0,829 (Eiche) auf positive Autokorrelation der Residuen hin. Dies führt zu Verzerrungen bei der Ermittlung des Standardfehlers der Regressionskoeffizienten und folglich auch bei der Bestimmung der jeweiligen Konfidenzintervalle (BACKHAUS (1996)).

Um die Autokorrelation zu beheben, wurde zunächst zusätzlich der Astradialzuwachs des Vorjahres als Lagvariable in die Regressionsgleichung mit eingeschlossen. Das Bestimmtheitsmaß erhöhte sich für die Modelle beider Baumarten dadurch beträchtlich (Buche: $R^2_{adj.} = 0,759$; Eiche: $R^2_{adj.} = 0,675$). Die erneute Prüfung auf Autokorrelation mit Hilfe der Durbin – H - Statistik (vgl. Kapitel 2.12.2.1) deckte mit $h = 5,9$ erneut Autokorrelation für das Modell der Baumart Buche auf ($\alpha = 0,05$; 2 - seitig; $z = 1,96$); für das Modell der Baumart Eiche konnte die Nullhypothese, dass keine Autokorrelation vorliegt, mit einer Durbin – H - Statistik von $h = -1,72$ ($\alpha = 0,05$; 2 - seitig; $z = 1,96$) nicht verworfen werden.

Allerdings ergaben sich hier weitere Probleme: Nach Einschluss der Lagvariable konnte kein signifikanter Einfluss des zuvor bedeutsamsten Regressors „laufendes Astalter“ auf den Astradialzuwachs mehr festgestellt werden. Auf diese Problematik wurde schon in der Literatur (vgl. ACHEN (2000), KEELE & KELLY (2006)) hingewiesen.

Des Weiteren wurde der Vorgehensweise von GARBER & MAGUIRE (2005) folgend ein gemischtes Modell mit den zufälligen Effekten „Bestand“, „Baum“ und „Ast“ angepasst, um der Autokorrelationsproblematik zu begegnen. Jedoch konnte auch diese Methode die Problematik nicht beheben, weswegen das Modell auch zugunsten einer besseren Vergleich- und Interpretierbarkeit in seiner ursprünglichen Form belassen wurde.



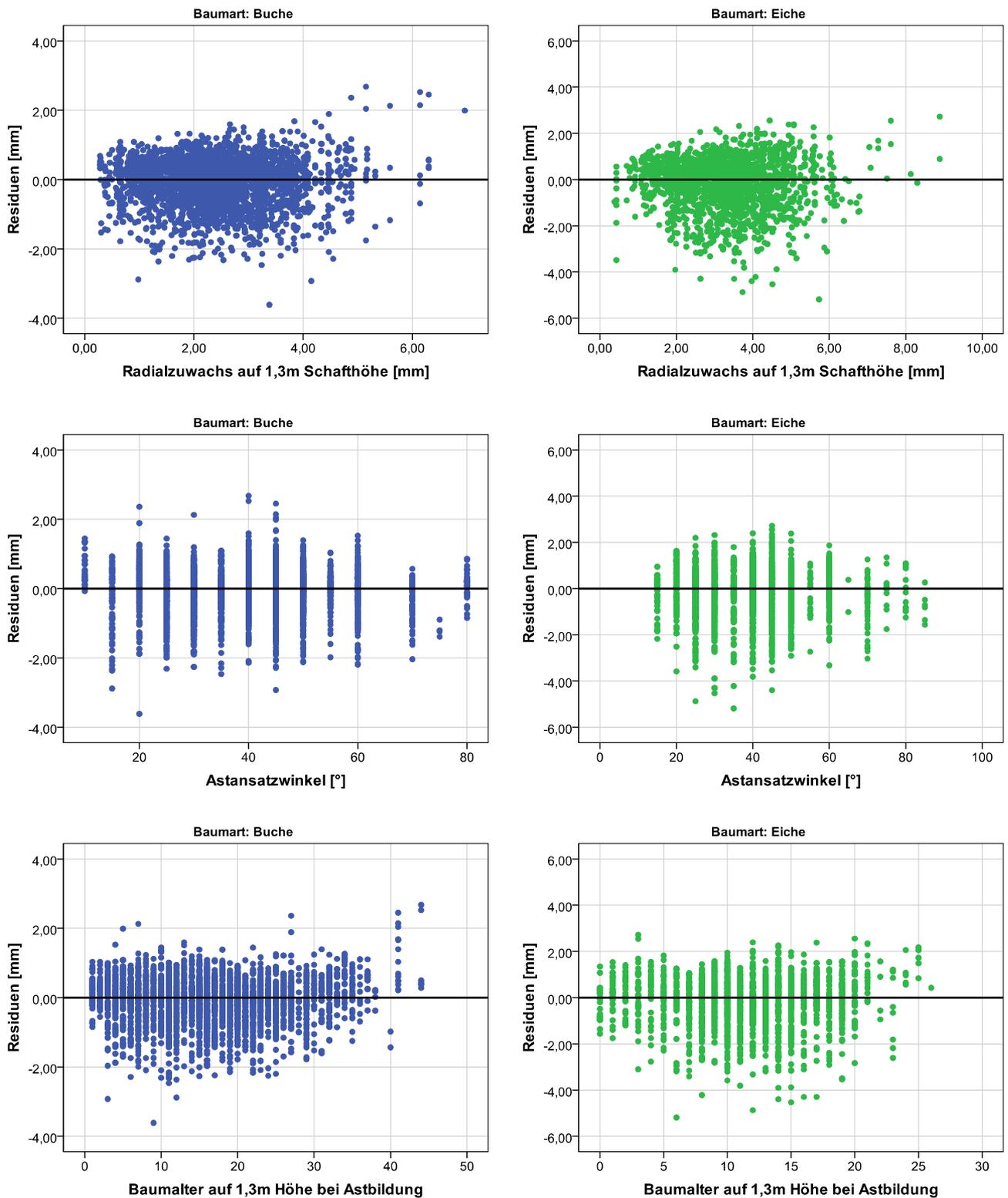


Abbildung 23: Gegenüberstellung der gemessenen Werte des Astradialzuwachses mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung des Astradialzuwachses über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Das parametrisierte Modell zeichnet sich vor allem für die empirischen Daten der Baumart Eiche durch eine geringe Anpassung aus. Während das Modell für die Baumart Buche den jährlichen Radialzuwachs bis auf wenige Ausnahmefälle mit einer Abweichung von etwa ± 2 mm prognostiziert, werden Astradialzuwächse von über 3,5 mm bei der Baumart Eiche systematisch überschätzt, was in einer Abweichung von bis 4 mm, in Ausnahmefällen auch darüber, resultiert. Eine systematische Überschätzung der jährlichen Radialzuwächse durch das Modell ist jedoch auch bei der Baumart Buche ab einem Radialzuwachs von etwa 2 mm zu beobachten. Abbildung 25 und Abbildung 26 belegen zusätzlich die Prognose unplausibler (negativer) Werte für die Radialzuwächse der Baumart Buche gerade bei höheren Astaltern und vergleichsweise frühen Astbildungsjahren.

Insgesamt muss festgehalten werden, dass die große Streuung bei keiner der beiden Baumarten durch die Hinzunahme weiterer biologisch plausibler Variablen verringert werden konnte. Die Hinzunahme einer Lagvariablen, welche gewisse biologische Plausibilität besaß und das Bestimmtheitsmaß substantiell erhöhte, verursachte Probleme an anderen Stellen oder erfüllte ihren eigentlichen Zweck der Beseitigung der Autokorrelation nicht. Trotz der offensichtlichen statistischen Mängel des dargestellten Modells kann es dennoch dazu verwendet werden, wichtige Einflüsse auf den Astradialzuwachs herauszufiltern sowie beide Baumarten hinsichtlich dieser zu kontrastieren.

Das Modell schätzt unter Annahme gleicher Voraussetzungen:

- einen verringerten jährlichen Radialzuwachs mit zunehmendem Astalter. Bei Betrachtung der Baumkrone in einem gegebenen Jahr kann somit eine von der Baumspitze zur Kronenbasis verlaufende sukzessive Abnahme der jährlichen Astradialzuwächse beobachtet werden. Da sich in der Literatur (z.B. MÄKINEN (1999a) und MÄKINEN (2002)) vergleichbare Ergebnisse finden lassen, und dieser Befund als das Ergebnis zunehmender Beschattung der untersten Äste interpretiert werden kann, ist dieses Resultat als biologisch plausibel zu erachten.
- Einen zunehmenden Astradialzuwachs mit zunehmendem Radialzuwachs auf 1,3 m Schafthöhe. Da dieses Ergebnis in Übereinstimmung mit den Aussagen des Astdurchmessermodells sowie Beobachtungen anderer Autoren (z.B. PUKKALA et al. (1992), MÄKINEN (1999b) und HEIN et al. (2007b)) steht, ist ihm biologische Plausibilität zu bescheinigen
- Abnehmende Radialzuwächse mit zunehmendem Astansatzwinkel. Steiler ansetzende Äste besitzen demnach unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen einen höheren Radialzuwachs. Dies korrespondiert mit dem erstellten Astdurchmessermodell sowie

Ergebnissen bisheriger Untersuchungen (vgl. z.B. BOZZUTO & WILSON (1988). MÄKINEN et al. (2003a) und MÄKINEN et al. (2003b)).

- Zunehmende Radialzuwächse mit zunehmendem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung. Diese Variable wurde in die Analyse mit einbezogen, um Einflüsse der baumspezifischen Entwicklungsphase auf den Astradialzuwachs untersuchen zu können. Unter gleichen Bedingungen prognostiziert das Modell für höher am Baum ansetzende Äste, welche folglich bei höherem Alter_{1,3} gebildet wurden, höhere Astradialzuwächse als für Äste, welche zu einem früheren Zeitpunkt gebildet wurden. Dieses Ergebnis könnte auf eine dynamische Konkurrenzphase in jüngeren Beständen hindeuten, welche sich mit zunehmendem Baumalter entschärft, so dass ein später gebildeter und damit höher ansetzender Ast in gleichem Alter einen höheren jährlichen Radialzuwachs zu leisten vermag als ein Ast, der zu einem früheren Zeitpunkt gebildet wurde. Abbildung 24 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

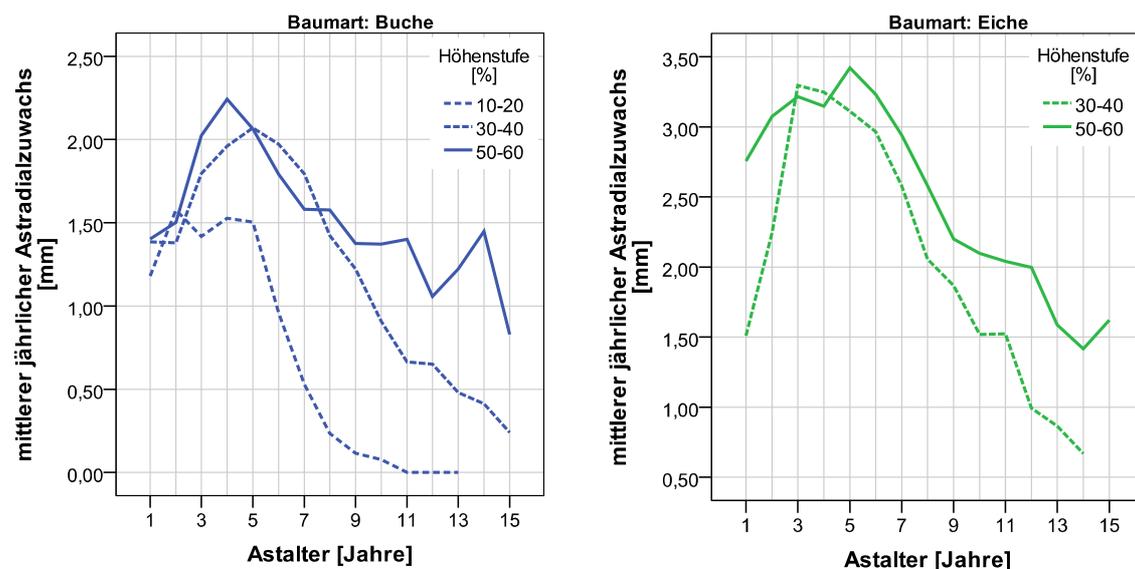


Abbildung 24: mittlerer jährlicher Astradialzuwachs von 11-15-jährigen Ästen unterschiedlich alter Bäume (Höhenstufe 10-20%, Höhenstufe 30-40%, Höhenstufe 50-60%) von Buche (links) und Eiche (rechts) über dem Astalter. Minimalbelegung: 3 Beobachtungen/ Astalter.

Beispielhaft dargestellt ist hier der mittlere jährliche Astradialzuwachs aller 11 bis 15-jährigen Äste von Bäumen der Kraft'schen Klasse 1 und 2 für jede der drei Baumentwicklungsphasen, welche in dieser Arbeit über die relativen Höhenstufen definiert wurden (siehe Kapitel 2.2). Bei beiden Baumarten sind die Beschattungseffekte gut zu erkennen: der gemittelte jährliche Radialzuwachs 11 bis 15-jähriger Äste von Bäumen der Höhenstufe 50-60% sinkt durch die vorteilhafte Astposition in der Lichtkrone, welche durch die abnehmende Höhenwachstumsdynamik länger gehalten werden kann,

weniger schnell ab. Diese Äste wurden bei höherem Baumalter auf 1,3m Höhe gebildet. Äste gleichen Alters von jüngeren Bäumen, welche bei geringerem Alter_{1,3} gebildet wurden, befinden sich in den Kronenbereichen, in denen ihr Durchmesserwachstum durch Beschattungseffekte verstärkt durch eine zu diesem Zeitpunkt große Höhenwachstumsdynamik beeinträchtigt wird (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Damit kann auch diesem Befund biologische Plausibilität bescheinigt werden.

4.1.2.3.1 EINFLUSS DER BAUMART

Der Baumartenvergleich ergab neben einem signifikanten Unterschied des Interzepts einen signifikanten Einfluss des Interaktionsterms der Variablen „Baumart“ und „Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung“ sowie „Baumart“ und „laufendes Astalter“. Der Zeitpunkt der Astbildung wirkt sich im Modell der Baumart Eiche signifikant stärker positiv auf den Astradialzuwachs als im Modell der Baumart Buche aus, was vor dem Hintergrund des zuvor Diskutierten auf die geringere Schattentoleranz der Baumart Eiche zurückgeführt werden könnte.

Des Weiteren weist die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche keine so ausgeprägte Reduktion des Radialzuwachses mit zunehmendem Astalter auf. Die den schattentoleranten Arten von zahlreichen Autoren (vgl. z.B. CANHAM (1988), CANHAM (1989) oder DELAGRANGE et al. (2004)) bescheinigte Plastizität des Wachstums könnte für die Erklärung dieses Befundes herangezogen werden: ungünstige Bedingungen, wie eine sich immer weiter verschärfende Beschattungssituation führen bei Buchenästen zu einer auffallenden Astradialzuwachsreduktion, oder gar zu einem Ausfall der Jahrringe. Die Frage, wie lange Äste der Baumart Eiche einem ähnlichen Konkurrenzdruck standhalten können, kann auf Grundlage des Astradialzuwachsmodells nicht geklärt werden, da in dieses nur Daten der stärksten Äste je Metersektion einfließen.

Durch die Transformierung der abhängigen Variablen ist es schwierig, direkte Schlüsse darüber zu ziehen, ob das Astradialzuwachsmodell der Baumart Eiche, wie es vom Astdurchmessermodell impliziert wird, unter gleichen Bedingungen einen höheren Astradialzuwachs prognostiziert. Abbildung 25 zeigt den modellierten Astradialzuwachs für drei verschiedene vertikale Positionen in der Krone, welcher auf Grundlage eines tatsächlich gemessenen Schafradialzuwachsverlaufs, wie er bei beiden Baumarten zu beobachten war, berechnet wurde. Zunächst ist zu konstatieren, dass die vom Modell vorhergesagten Astradialzuwächse im Vergleich zum Radialzuwachs des Schaftes auf einem augenscheinlich niedrigeren Niveau liegen, was im Einklang mit den Gesetzmäßigkeiten der apikalen Kontrolle steht (vgl. WILSON (2000)). Deutlich zu erkennen ist weiterhin ein stärkeres Absinken des

Astradialzuwachses mit zunehmendem Alter für Äste der Baumart Buche sowie ein sich vergrößernder Unterschied zwischen den Radialzuwachsverläufen beider Baumarten mit zunehmender vertikaler Position in der Krone. Dabei liegt der für die Baumart Eiche prognostizierte Astradialzuwachs unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen immer auf einem Niveau über dem für die Baumart Buche prognostizierten Astradialzuwachs, was somit im Einklang mit den Ergebnissen des Astdurchmessermodells steht.

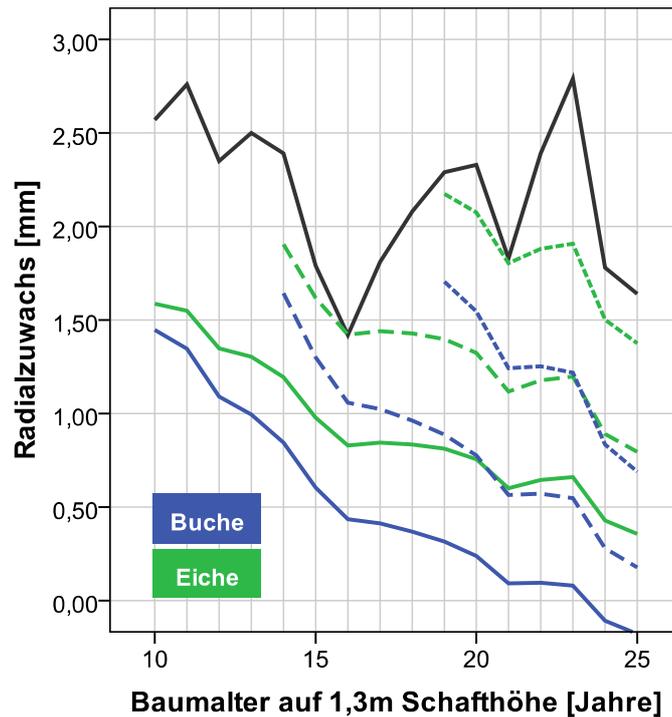


Abbildung 25: Schafradialzuwachs (schwarze Linie) sowie modellierte Astradialzuwachswerte von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) über dem Alter_{1,3} für 3 verschiedene vertikale Astpositionen: Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung 5 (durchgezogene Linie), 10 (gestrichelte Linie) und 15 (gepunktete Linie) bei einem konstanten Astansatzwinkel von 40°.

	Buche	Eiche	Differenz
Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	Durchschnittlicher jährlicher Astradialzuwachs [mm]		
5	0,57	0,96	0,39
10	0,72	1,23	0,51
15	1,08	1,72	0,64
<i>Durchschnittlicher jährlicher Schafradialzuwachs auf 1,3m Höhe [mm]: 2,2mm, Astansatzwinkel: 40°</i>			

Tabelle 25: Darstellung der Durchschnittswerte der in Abbildung 25 dargestellten jährlichen Astradialzuwächse von Buche und Eiche für drei verschiedene vertikale Astpositionen bei einem durchschnittlichen jährlichen Schafradialzuwachs von 2,2mm und einem konstanten Astansatzwinkel von 40°.

4.1.2.3.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Durch die Transformation der unabhängigen Variablen kann der Einfluss des Schafradialzuwachses auf den Astradialzuwachs nicht direkt aus den Parameterschätzern herausgelesen und beziffert werden. Abbildung 26 zeigt den modellierten Astradialzuwachsverlauf von Eiche und Buche für zwei verschiedene Schafradialzuwachsverläufe auf 1,3m Höhe.

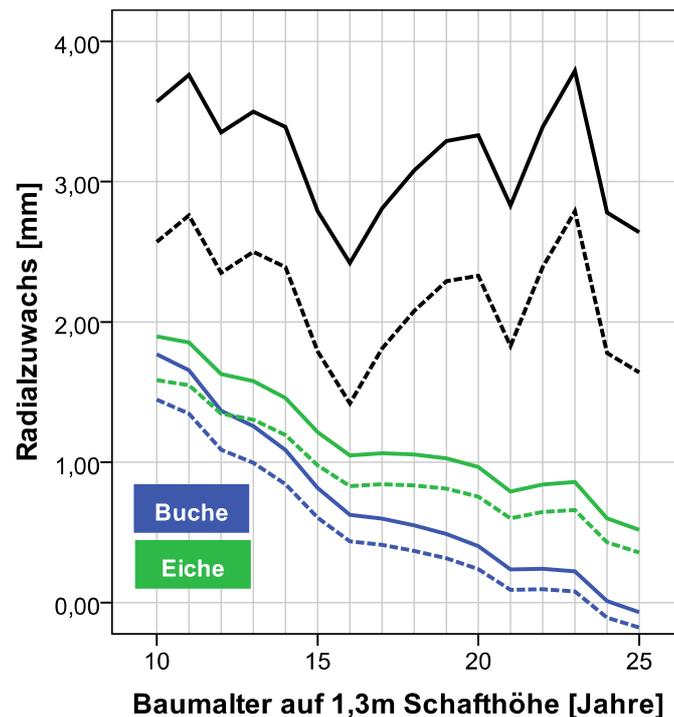


Abbildung 26: Schafradialzuwachs (schwarze Linien) sowie modellierte Astradialzuwachswerte von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) über dem Alter_{1,3} für ein Radialzuwachszenario von durchschnittlich 2,2mm auf 1,3m Schafthöhe (gestrichelte Linien) und 3,2mm auf 1,3m Schafthöhe (durchgezogene Linien) für Äste, welche zu einem Alter_{1,3} von 5 Jahren gebildet wurden bei einem konstanten Astansatzwinkel von 40°.

Wird das Niveau des Schafradialzuwachses mit einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,2mm (Abbildung 26, gestrichelte Linie) um einen Millimeter angehoben (Abbildung 26, durchgezogene Linie), ist ebenfalls eine Anhebung des Astradialzuwachs-niveaus zu beobachten.

Tabelle 26 zeigt schließlich beispielhaft, dass es auch von der jeweiligen vertikalen Astposition in der Krone abhängt, wie sehr der Astradialzuwachs bei Anhebung des Schafradialzuwachses um einen Millimeter erhöht wird. Dargestellt sind die berechneten Astradialzuwächse von Ästen im 5. Lebensjahr, welche sich jedoch in unterschiedlichen Kronenpositionen befinden. Je höher die Äste am

Baum ansetzen, desto höher fällt die Astradialzuwachsreaktion auf eine Erhöhung des Schafradialzuwachses um einem Millimeter aus.

	<i>Buche</i>			<i>Eiche</i>		
Schafradialzuwachs auf 1,3m Höhe [mm]	2,5	3,5	Differenz	2,5	3,5	Differenz
Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung [Jahre]	Astradialzuwachs [mm]					
5	1,42	1,74	0,32	1,56	1,87	0,30
10	1,51	1,84	0,33	1,83	2,17	0,33
15	1,60	1,94	0,34	2,13	2,50	0,37
20	1,69	2,04	0,35	2,46	2,87	0,41
<i>Astalter: 5 Jahre, Astansatzwinkel: 40°</i>						

Tabelle 26: Darstellung des modellierten Astradialzuwachses von Buche und Eiche im Astalter 5 und bei einem Astansatzwinkel von 40° für vier verschiedene vertikale Astpositionen (Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung= 5, 10, 15, 20 Jahre) bei einem Schafradialzuwachs von 2,5mm und 3,5mm.

4.1.2.4 ASTANSATZWINKEL

In Anlehnung an das von HEIN & SPIECKER (2007) formulierte Modell zur Vorhersage des Astansatzwinkels von Bergahorn und Esche und unter weiterer Einbeziehung der Variablen Astalter sowie dem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung, welche im Rahmen der Literaturstudie als weitere mögliche Einflussvariablen identifiziert wurden, wurde das Modell zur Prognose des Astansatzwinkels wie folgt formuliert:

$$AW = a + b * AD + c * irL_{(mittel)1,3} + d * Alter_{Ast} + e * Bab_{1,3}$$

Formel 23: Modell zur Prognose des Astansatzwinkels.

wobei:

AW = Astansatzwinkel (Bezug: Vertikale) [°]

AD = Astdurchmesser [mm]

$irL_{(mittel)1,3}$ = durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]

- $Alter_{Ast}$ = Astalter [Jahre]
 $Bab_{1,3}$ = Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
 a, b, c, d, e = empirische Koeffizienten

Um die Voraussetzung der Homoskedastizität zu erfüllen, wurden die Variablen „Astdurchmesser“ sowie „Astalter“ in ihre logarithmierte Form transformiert. Die modifizierte Modellgleichung lautet somit wie folgt:

$$AW = a + b * \ln (AD) + c * irL_{(mittel)1,3} + d * \ln (Alter_{Ast}) + e * Bab_{1,3}$$

Formel 24: Modell zur Prognose des Astansatzwinkels mit transformierten Variablen.

mit den oben genannten Variablenbezeichnungen.

Im Modell der Baumart Buche erklärte die Variable „Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung“ weniger als ein Prozent der Gesamtstreuung, im Modell der Baumart Eiche konnte ein ebenso geringer Beitrag der Variablen „durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]“ festgestellt werden. Der Beitrag dieser Variablen zum Gesamtmodell wurde deswegen mit Hilfe des AIC Kriteriums untersucht.

Baumart	Modellvariablen	K	RSS	N	AIC
<i>Buche</i>	AD, $irL_{(mittel)1,3}$, $Alter_{Ast}$	5	215414,6	1401	7064,6
	AD, $irL_{(mittel)1,3}$, $Alter_{Ast}$, $Bab_{1,3}$	6	213706,4	1401	7055,4
<i>Eiche</i>	AD, $Alter_{Ast}$, $Bab_{1,3}$	5	220462,6	1246	6459,08
	AD, $irL_{(mittel)1,3}$, $Alter_{Ast}$, $Bab_{1,3}$	6	219744,3	1246	6457,03

Tabelle 27: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Astansatzwinkelmodell der Baumarten Buche und Eiche.

Auf Grundlage dieser Analyse wurden beide Variablen im jeweiligen Modell belassen, da sie dort zur Verringerung der unerklärten Reststreuung und somit zur Verbesserung der Modelle beitrugen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Astansatzwinkel (Bezug: Vertikale) [°]	1401	5	90	45,22	12,96
	Astdurchmesser [mm]	1401	9,8	101,5	21,71	11,28
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]	1401	0,30	4,80	2,30	0,79
	Astalter [Jahre]	1401	2	38	9,10	5,32
	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	1401	1	48	17,73	10,06
<i>Eiche</i>	Astansatzwinkel (Bezug: Vertikale) [°]	1245	10	100	46,56	14,78
	Astdurchmesser [mm]	1245	7,80	128,70	25,71	17,43
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]	1245	0,90	8,20	3,45	1,22
	Astalter [Jahre]	1245	1	20	6,52	3,24
	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	1245	1	27	12,18	6,22

Tabelle 28: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astansatzwinkelmodells.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	62,061	2,413			***
	Astdurchmesser [mm]	-9,536	0,987	0,040	1,752	***
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]	2,205	0,437	0,028	1,094	***
	Astalter [Jahre]	4,085	0,793	0,017	1,748	***
	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	-0,113	0,034	0,007	1,065	**

Eiche	(Konstante)	76,677	2,561			***
	Astdurchmesser [mm]	-12,364	1,027	0,100	2,301	***
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Zeitraum zwischen Astbildungsjahr und Fällungsjahr (2009) [mm]	0,727	0,361	0,003	1,375	*
	Astalter [Jahre]	6,582	1,159	0,019	2,321	***
	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	-0,522	0,068	0,056	1,239	***

Buche	N=1401
	r ² =0,092; r ² adj=0,090
	Nicht standardisierte Residuen: 213706,4 mit 1400 FG

Eiche	N=1246
	r ² =0,177; r ² adj=0,174
	Nicht standardisierte Residuen: 219744,3 mit 1241 FG

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant

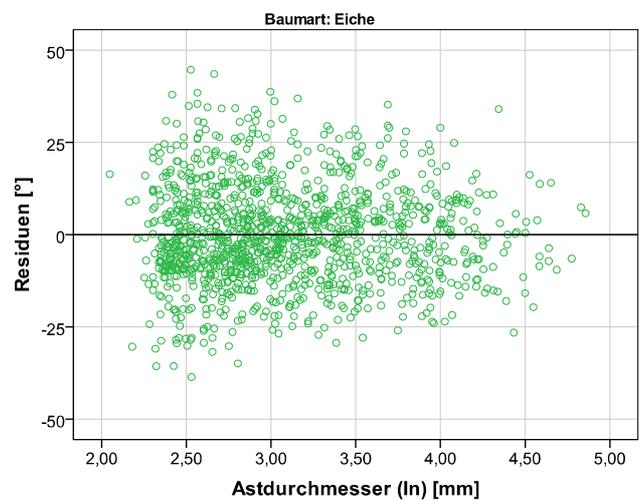
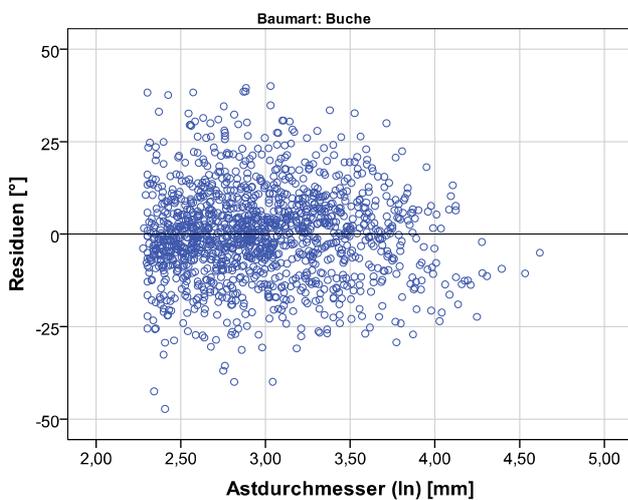
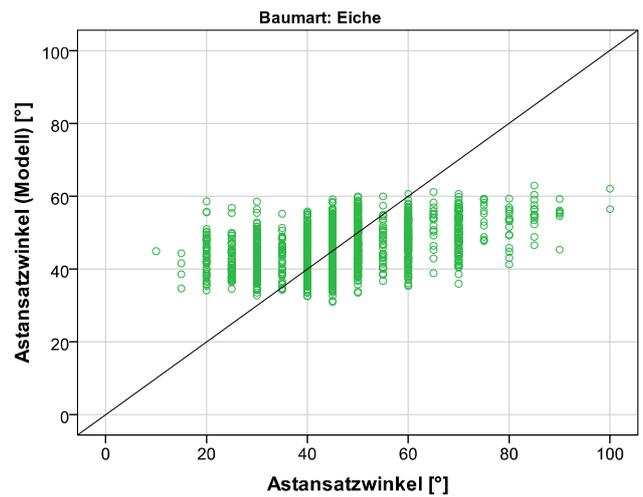
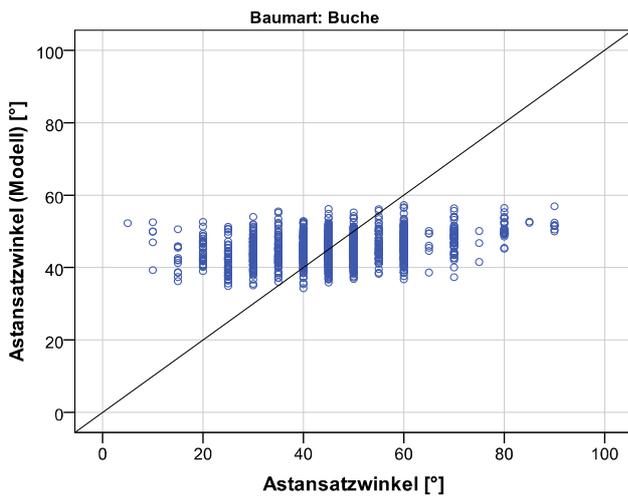
Tabelle 29: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für den Astansatzwinkel nach Formel 24.

Das Astansatzwinkelmodell für die Baumart Buche kann lediglich 9% der Gesamtvariation erklären, wohingegen es mit Hilfe des Modells für die Baumart Eiche möglich war, 17,4% der Gesamtstreuung zu klären. Damit ist die Verlässlichkeit beider Modelle eingeschränkt; dennoch lassen sich mit ihrer Hilfe Einflüsse und Wirkungsrichtungen der gewählten Variablen auf den Astansatzwinkel studieren.

Die Residuen weisen Normalverteilung auf. Die dargestellten VIF - Werte weisen nicht auf beeinträchtigende Multikollinearität hin. Der Vergleich der Durbin – Watson - Statistik von 1,378 (Buche) beziehungsweise 1,522 (Eiche) mit den tabellierten Werten (STANFORD UNIVERSITY (2010)) lässt jedoch Modellbeeinträchtigungen durch positiv autokorrelierte Residuen vermuten. Nach der Transformierung der Variablen Astdurchmesser und Astalter lassen die Residuen keine gravierende Heteroskedastizität mehr erkennen.

Der Astdurchmesser erklärt in den Modellen beider Baumarten mit 4% (Buche) bzw. 10% (Eiche) den größten Streuungsanteil. Der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Astlebenszeit trägt zu 2,8% (Buche) bzw. 0,3% (Eiche) zur Klärung der Gesamtstreuung bei,

während das Astalter bei beiden Baumarten knappe 2% zur Klärung der Gesamtstreuung beisteuert. Die vertikale Position des Astes am Baum, welche durch die Variable „Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung“ beschrieben wird, kann nur bei der Baumart Eiche noch substantiell zur Verringerung der Gesamtstreuung beitragen; im Modell der Baumart Buche kann diese Variable nur noch 0,7% der unerklärten Reststreuung klären.



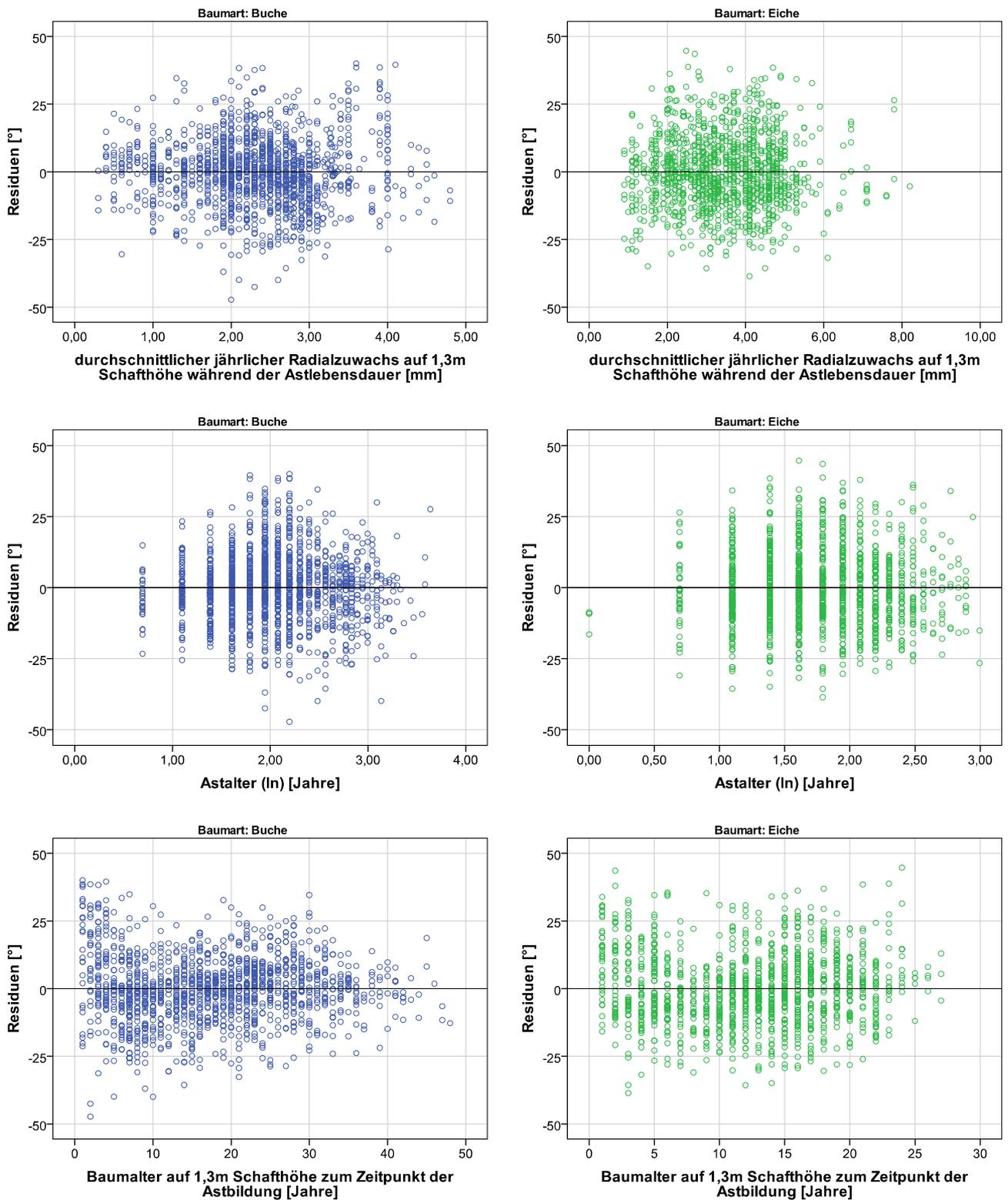


Abbildung 27: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Die Abweichung der von den Modellen prognostizierten Werten und den empirischen Daten beträgt bis zu 50°, was die geringe statistische Verlässlichkeit der Modelle ein weiteres Mal unterstreicht. Die Vorzeichen der Koeffizienten beider Modelle sind gleich gerichtet. Unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen schätzt das Modell:

- Abnehmende Astansatzwinkel mit zunehmendem Astdurchmesser (vgl. Abbildung 28). Mit zunehmendem Astdurchmesser wird vom Modell ein abnehmender Astansatzwinkel prognostiziert. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen des Astdurchmesser- sowie des Astradialzuwachsmodells und ist auch vor dem Hintergrund der Ergebnisse bisheriger Untersuchungen (vgl. z.B. MÄKINEN et al. (2003b), HEIN & SPIECKER (2007) oder HEIN (2008)) als biologisch plausibel zu erachten.
- Zunehmende Astansatzwinkel mit zunehmendem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Lebenszeit des Astes (vgl. Abbildung 28). Dieser kann als Proxy für den Bedrängungsgrad des Baumes während der Astentwicklung angesehen. Somit steht dieses Ergebnis in Übereinstimmung mit Beobachtungen anderer Autoren (vgl. z.B. HASHIMOTO (1990), HASHIMOTO (1991), MÄKINEN (1996), ALCORN et al. (2007)) sowie mit den Ergebnissen des Astansatzwinkelmodells von HEIN & SPIECKER (2007). Damit ist auch diesem Ergebnis biologische Plausibilität zuzusprechen.
- Zunehmende Astansatzwinkel mit zunehmendem Astalter (vgl. Abbildung 28), respektive eine sukzessive Absenkung der Äste mit zunehmendem Astalter. Vor dem Hintergrund der von JANKIEWICZ & STECKI (1976) formulierten Überlegungen sowie den Übereinstimmungen mit Astansatzwinkelmodellen anderer Autoren (vgl. z.B. COLIN & HOULLIER (1992), HASHIMOTO (1990), HASHIMOTO (1991), MÄKINEN (1996) oder ACHIM et al. (2006)) kann dieses Ergebnis als biologisch plausibel beurteilt werden.
- Abnehmende Astansatzwinkel mit zunehmendem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung (vgl. Abbildung 28). Dieses Resultat steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen KURTH (1946), MEDHURST & BEADLE (2001), MÄKINEN et al. (2003b), SONE et al. (2006) oder KINT et al. (2010), die ebenfalls steilere Astansatzwinkel in den oberen Kronenbereichen feststellten. Durch die horizontale Ausrichtung der Äste in den unteren Kronenbereichen kann nach SONE et al. (2006) die Lichtinterzeption der Blätter maximiert werden. Vor diesem Hintergrund ist das Ergebnis ebenfalls biologisch plausibel einzustufen.

4.1.2.4.1 EINFLUSS DER BAUMART

Astansatzwinkelunterschiede zwischen Buche und Eiche sind zwar vorhanden (vgl. Abbildung 28), jedoch nicht statistisch signifikant. Der Baumartenvergleich ergab weder für den Interzept noch für die Interaktionsterme einen signifikanten Unterschied zwischen den Modellen der beiden Baumarten. Während der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe im Modell der Baumart Buche einen vergleichsweise größeren Einfluss auf den Astansatzwinkelverlauf ausübt, kann eine vergleichsweise stärkere Abnahme des Astansatzwinkels mit zunehmendem Alter_{1,3} unter sonst gleichen Bedingungen für den vom Modell der Baumart Eiche prognostizierten Astansatzwinkelverlauf konstatiert werden (vgl. Abbildung 28).

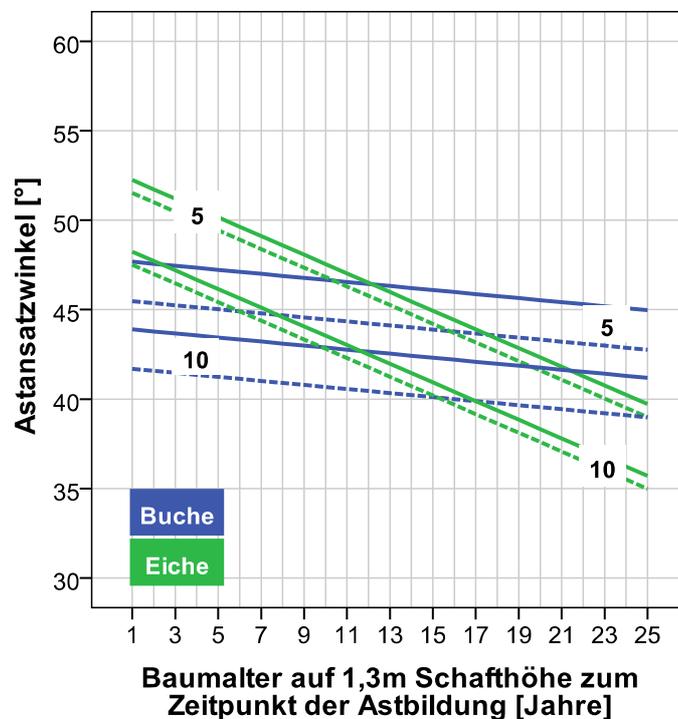


Abbildung 28: Astansatzwinkel in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe zum Zeitpunkt der Astbildung von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für einen durchschnittlichen jährlichen Astradialzuwachs von 2mm bei einem Astalter von 5 bzw. 10 Jahren für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie, 3,5mm: durchgezogene Linie).

4.1.2.4.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Mit zunehmendem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe werden von den Astansatzwinkelmodellen beider Baumarten zunehmend plagiotrop ausgerichtete Äste prognostiziert (vgl. Abbildung 28). Während das Astansatzwinkelmodell der Baumart Eiche mit zunehmendem Radialzuwachs auf 1,3m

Schafthöhe lediglich eine Erhöhung des Astansatzwinkels von etwa $0,7^\circ$ vorhersagt, wird vom Modell für die Baumart Buche ein Astansatzwinkelunterschied von etwa $2,2^\circ$ vorhergesagt, wenn der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe um einen Millimeter erhöht wird.

4.2 ASTMORTALITÄTSPROZESS

4.2.1 EINZELBAUMBEBENE

4.2.1.1 KRONENANSATZHÖHE

Gestützt auf die von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) erstellten Modelle wurde für den vorliegenden empirischen Datensatz das Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe wie folgt formuliert:

$$KaH = a + b * BHD + c * H + d * Alter_{1,3}$$

Formel 25: Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe.

wobei:

KaH	= Kronenansatzhöhe [m]
BHD	= Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]
H	= Baumhöhe [m]
$Alter_{1,3}$	= Alter _{1,3} [Jahre]
a, b, c, d	= empirische Koeffizienten

Im Modell der Baumart Buche erwies sich das Alter_{1,3} als nicht signifikant zur Erklärung der Gesamtstreuung beitragend, bei der Baumart Eiche konnte diese Variable zwar signifikant zur Klärung der unerklärten Streuung der Kronenansatzhöhe beitragen, verursachte aber in Verbindung mit der Variable Baumhöhe überhöhte VIF - Werte mit Beträgen von über 20, was auf starke lineare Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen (Buche: $r^2 = 0,87$, Eiche $r^2 = 0,91$) und damit Beeinträchtigung der Parameterschätzung durch Multikollinearität schließen lässt (vgl. BACKHAUS (1996)). So wurden zusätzlich Alternativmodelle geprüft, in welchen die Variablen Baumhöhe, Alter_{1,3}, Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe, durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Höhe und der H/D - Wert in verschiedenen Kombinationen verwendet wurden. Daneben wurde der Modellansatz von

SPIECKER (1991) zur Vorhersage der relativen Kronenansatzhöhe mit Hilfe der Variablen Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe sowie dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Höhe überprüft. Als das Modell mit den höchsten Anpassungswerten und der besten Regressionsdiagnostik erwies sich die Regressionsgleichung

$$KaH = a + b * BHD + c * H$$

Formel 26: Modifiziertes Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe.

mit den oben aufgeführten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Kronenansatzhöhe [m]	69	1,30	16,30	6,89	4,45
	Baumhöhe [m]	69	4,45	26,23	14,65	5,93
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	69	4,20	24,80	11,60	5,36
<i>Eiche</i>	Kronenansatzhöhe [m]	74	0,31	13,90	5,90	3,79
	Baumhöhe [m]	74	2,83	23,35	12,76	5,89
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	74	1,90	26,6	12,66	6,50

Tabelle 30: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Kronenansatzhöhenmodells.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	-3,158	0,581			ns
	Baumhöhe [m]	0,963	0,087	0,811	5,661	***
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	-0,349	0,097	0,031	5,661	**
<i>Eiche</i>	(Konstante)	-1,761	0,350			ns
	Baumhöhe [m]	1,051	0,070	0,819	8,004	***
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	-0,454	0,064	0,076	8,004	***
<i>Buche</i>	N=69					
	r ² =0,842; r ² adj=0,837					
	Nicht standardisierte Residuen: 212,79 mit 66 FG					

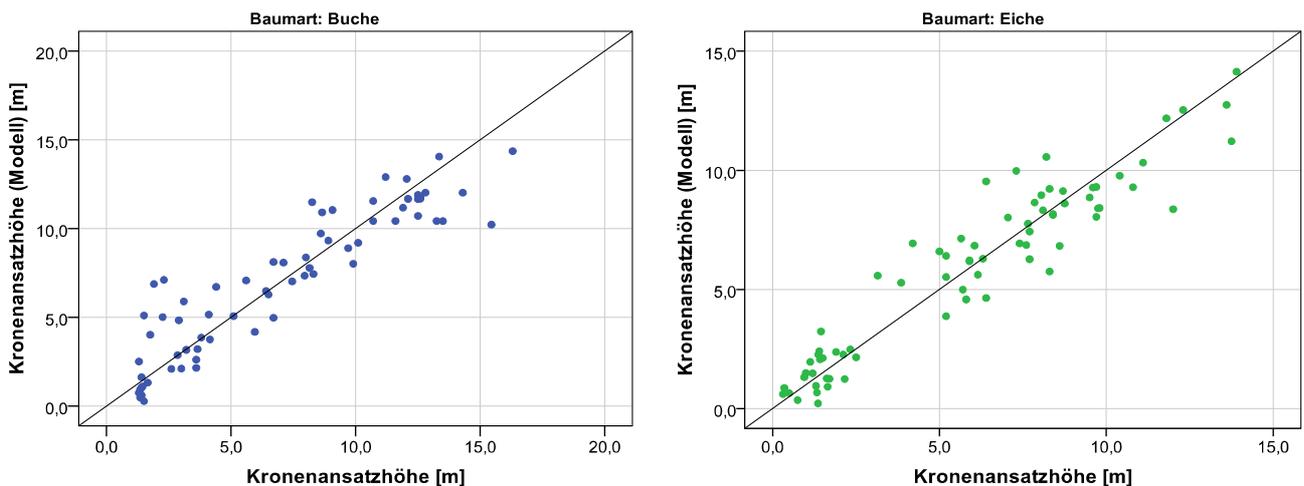
Eiche	N=74
	$r^2=0,895$; $r^2_{adj}=0,892$
	Nicht standardisierte Residuen: 110,82 mit 71 FG

Signifikanz Codes: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 31: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Prognose der Kronenansatzhöhe nach Formel 26.

Das multiple korrigierte Bestimmtheitsmaß des Modells liegt mit $r^2_{adj} = 0,837$ für Buche und $r^2_{adj} = 0,892$ für Eiche recht hoch. Der größte Teil der Streuung (81,1% bei Buche bzw. 81,9% bei Eiche) wird bei beiden Baumarten durch die Variable Baumhöhe erklärt; die Einbeziehung des Schaftdurchmessers auf 1,3m Höhe trägt nur noch zu 3,1% bei Buche beziehungsweise 7,6% bei Eiche bei.

Die VIF - Werte liegen in beiden Fällen unter dem gängigen Grenzwert von 10 (FREUND et al. (2006), SACHS & HEDDERICH (2006)), weswegen nicht von einer die zuverlässige Parameterschätzung beeinträchtigenden Multikollinearität auszugehen ist. Die Durbin - Watson - Statistik für das Kronenansatzhöhenmodell der Baumart Buche liegt mit einem Wert von 1,195 unter dem Tabellenwert von $d_L = 1,40$ (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)), was auf positive Autokorrelation der Residuen hinweist, so dass es dementsprechend zu einer Unterschätzung der Standardfehler kommen kann. Für das Kronenansatzhöhenmodell der Baumart Eiche kann die Nullhypothese, dass keine Autokorrelation der Residuen vorliegt, mit einem Wert von 1,591 (Tabellenwert $d_U = 1,515$ (SAVIN & WHITE (1977))) nicht zurückgewiesen werden.



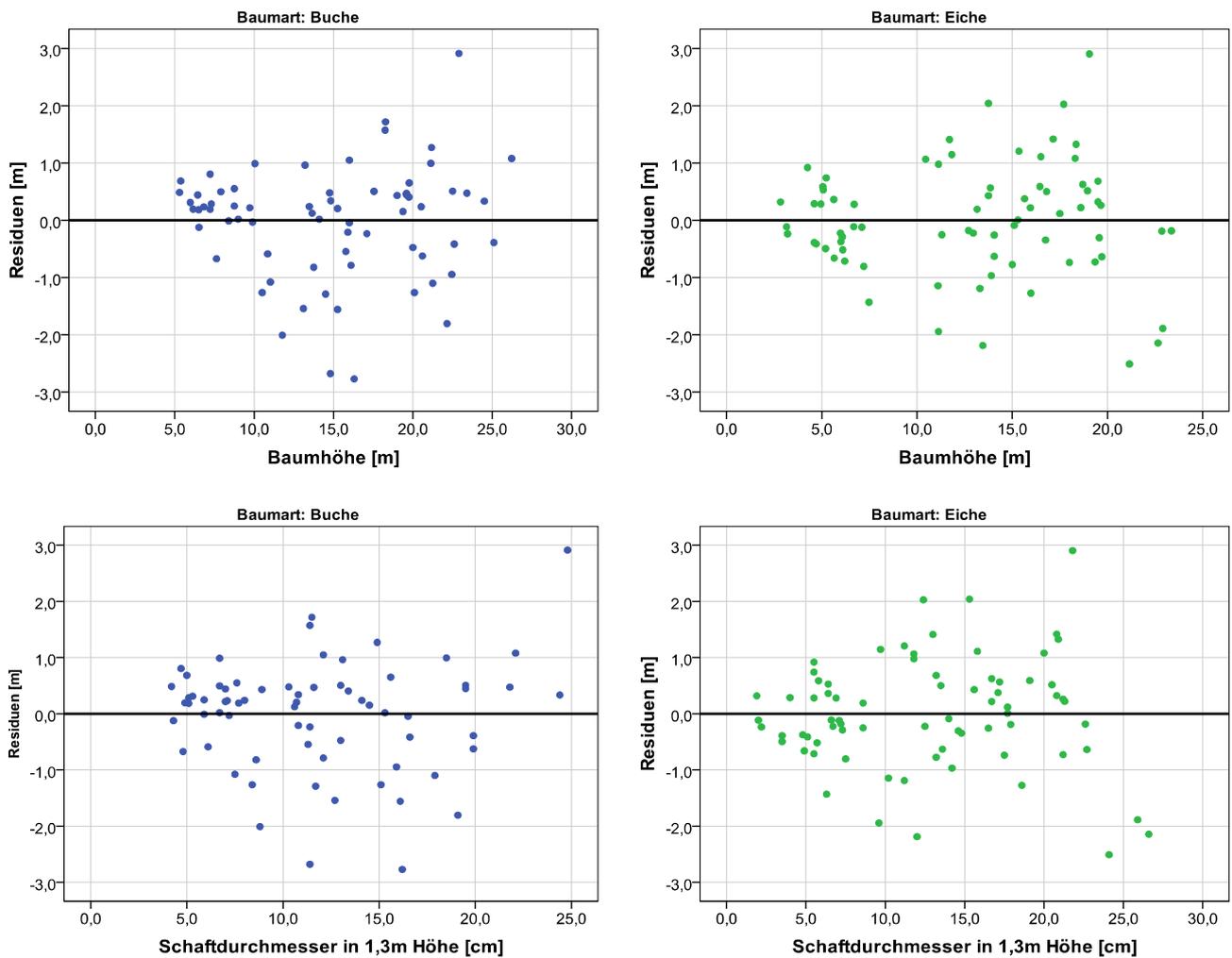


Abbildung 29: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Die Residuen sind für beide Baumarten normalverteilt. Bis auf 3 (Buche) bzw. 4 (Eiche) Werte schätzt das Modell die Kronenansatzhöhe mit einer Genauigkeit von ± 2 m. Diejenigen Werte, die vom Modell mit 2 m und mehr überschätzt wurden, konnten nach genauerer Überprüfung bei beiden Baumarten jeweils einer Pflanzung zugeordnet werden, in der der Abstand zum nächsten Bedränger im Vergleich zu den restlichen Beständen ungewöhnlich weit war. Durch ungenügenden Seitendruck verlief die Astreinigung, deren Produkt die Kronenansatzhöhe ist, in diesen beiden Beständen im Vergleich zu den restlichen Beständen langsamer. Zeugnis davon gibt der ungewöhnlich niedrige Kronenansatz, welcher folglich durch ungenügende empirische Besetzung der Daten von Bäumen aus weiteren Pflanzverbänden vom Modell überschätzt wird.

Das erstellte multiple Regressionsmodell schätzt unter sonst gleichen Bedingungen:

- Zunehmende Kronenansatzhöhen mit zunehmender Baumhöhe (positives Vorzeichen). Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen anderer Autoren (z.B. NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009)) und ist biologisch plausibel. Die Parameterschätzer der Variable Baumhöhe liegen bei beiden Baumarten mit 0,963 (Buche) und 1,051 (Eiche) auf einem ähnlichen Niveau. Wird der Durchmesser auf 1,3m Schafthöhe konstant gehalten, wird der höhere Baum auch die höhere Kronenansatzhöhe besitzen. Unter Annahme gleichen Baumalters auf 1,3m Schafthöhe und gleichen Schaftdurchmessers auf 1,3m Höhe aber unterschiedlicher Baumhöhe, bedingt zum Beispiel durch unterschiedliche Standortsbonität, prognostiziert das Modell einen höheren Kronenansatz für bessere Standorte, ein Ergebnis, welches mit entsprechenden Untersuchungen von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) übereinstimmt.
- Niedrigere Kronenansätze mit zunehmendem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe (negatives Vorzeichen). Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der Parameterschätzung der Kronenansatzmodelle von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) und erweist sich desgleichen als biologisch plausibel, gleichwohl dies nicht losgelöst vom Baumalter und somit implizit vom durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf jeweils 1,3m Schafthöhe betrachtet werden kann. Da das Alter_{1,3} als Variable durch die schrittweise Regression aus den jeweiligen Modellen ausgeschlossen wurde, ist ein direkter Rückschluss auf den durchschnittlichen Radialzuwachs auf 1,3m Höhe über das Modell nicht möglich. Durch die Einsetzung der über die entwickelten Höhenmodelle definierten Höhen- Altersbeziehungen unterschiedlicher Standortsbonitäten in die Kronenansatzmodelle lassen sich Kronenansatzhöhenentwicklungen über dem Alter für verschiedene Standortsbonitäten und unterschiedlichen Radialzuwachsszenarien herleiten (Abbildung 30).

Die Parameterschätzer für die Variable Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe liegen wiederum mit -0,349 (Buche) und -0,454 (Eiche) auf ähnlichem Niveau. Wird die Variable Höhe konstant gehalten, prognostiziert das Modell einen niedrigeren Kronenansatz für Bäume mit größerem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe. Werden zusätzlich gleiche Standortsbedingungen und somit gleiches Alter_{1,3} unterstellt, ergibt sich ein niedrigerer Kronenansatz für Bäume mit höherem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe. Auch dies ist als biologisch plausibel zu beurteilen und steht ebenfalls in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der

entsprechenden Untersuchungen von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009).

4.2.1.1.1 EINFLUSS DER BAUMART

Der Vergleich der beiden Baumarten erfolgte wiederum durch die zusätzliche Verwendung einer Stellvertretervariablen für die Baumart sowie den Einsatz zweier Interaktionsterme, welche aus den Variablen Baumart und Baumhöhe sowie Baumart und Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe gebildet wurden. Weder der Steigungswert der Variable „Baumhöhe“ noch der der Variable „Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe“ unterscheiden sich signifikant. Gleichwohl konnte ein statistisch signifikanter Unterschied der beiden Ordinatenabschnitte (Buche: -3,158; Eiche: -1,761) festgestellt werden, womit ausgesagt wird, dass die Baumart Eiche *ceteris paribus* eine höher ansetzende Krone als die Baumart Buche besitzt, was vor dem Hintergrund der geringeren Schattentoleranz der Eiche ebenfalls biologisch plausibel erscheint.

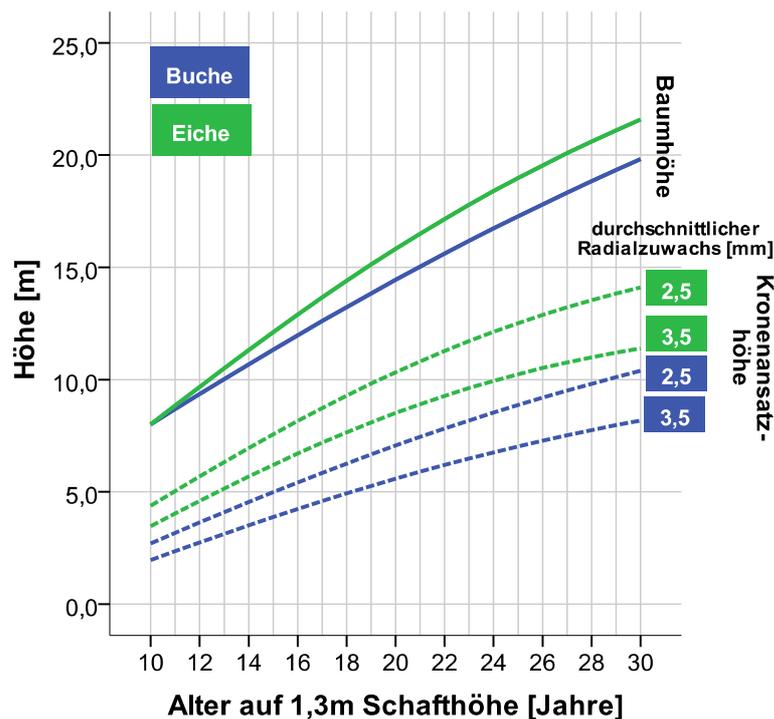


Abbildung 30: Modellierte Baumhöhe (durchgezogene Linie) und Kronenansatzhöhe (gestrichelte Linie) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5 und 3,5mm und einer absoluten Oberhöhenbonität SI_{10} von 8m.

Gemäß den erstellten Kronenansatzhöhenmodellen sowie den Höhenmodellen und unter Voraussetzung gleichen Alters und gleicher SI_{10} – Bonität (in Abbildung 30: $SI_{10} = 8m$) unterscheiden sich die Kronenansatzhöhen beider Baumarten bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm auf 1,3m Schafthöhe statistisch signifikant ($t(44) = -3,172$, $p < 0,05$) und belaufen sich im $Alter_{1,3} 10$ auf 1,6 Meter (Abbildung 30). Durch ein beschleunigtes Aststerben der Baumart Eiche und der damit verbundenen rascheren Anhebung des Kronenansatzes vergrößert sich die Differenz der Kronenansatzhöhen beider Baumarten bis zum $Alter_{1,3} 30$ auf 3,7 Meter. Auch bei der zweiten dargestellten Radialzuwachsvariante von durchschnittlichen jährlichen 3,5mm besteht ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Kronenansatzhöhen beider Baumarten ($t(44) = -3,436$, $p < 0,05$). Der im $Alter_{1,3} 10$ bestehende Unterschied der Kronenansatzhöhen von 1,5 Metern erhöht sich sukzessive auf 3,2 Meter im $Alter_{1,3} = 30$.

Dabei besitzt die Buche über den gesamten abgebildeten Zeitraum und für beide Radialzuwachsszenarien auch immer die längere Krone, welche bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm um im Mittel 1,8 Meter, bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm um im Mittel 1,5 Meter länger als die der Eiche ist.

4.2.1.1.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen niedrigere Kronenansätze für Bäumen mit größerem Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe. Abbildung 30 illustriert die Auswirkungen unterschiedlicher Radialzuwachsszenarien von Buche und Eiche auf gleichem Standort. Im $Alter_{1,3} = 10$ beträgt so die Kronenansatzhöhendifferenz zweier Eichen, welche sich in ihrem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs um einen Millimeter unterscheiden, einen knappen Meter und vergrößert sich bis zum $Alter_{1,3} = 30$ auf einen Wert von 2,7 Metern. Die Radialzuwachsvariante 2,5mm hat zu diesem Zeitpunkt eine Kronenansatzhöhe von über 14 Metern erreicht, die Variante 3,5mm etwas mehr als 11 Meter bei einer Baumhöhe von jeweils 21,5 Metern.

Auch bei der Baumart Buche vergrößert sich *ceteris paribus* die anfängliche Differenz zwischen den beiden Radialzuwachsszenarien von 0,7 Meter über die untersuchte Zeitspanne auf 2,2 Meter. Im $Alter_{1,3} = 30$ besitzen Bäume des Radialzuwachsszenarios von jährlichen durchschnittlichen 2,5mm eine Kronenansatzhöhe von 10,3 Metern, die Radialzuwachsvariante 3,5mm eine Kronenansatzhöhe von 8,1 Metern bei einer jeweiligen Baumhöhe von 19,8 Metern erreicht. Werden die Beträge der Differenzen zwischen den jeweiligen Radialzuwachsszenarien von Eiche und Buche miteinander verglichen, ergibt

sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($t(40) = -2,146$, $p < 0,05$), wobei die Eiche gemäß dem erstellten Modell die jeweils größere Differenz der Kronenansatzhöhe zwischen den dargestellten Radialzuwachsszenarien zu allen untersuchten Zeitpunkten aufweist.

Das für die Baumart Eiche erstellte Kronenansatzmodell legt somit nahe, dass die Eiche offensichtlich empfindlicher auf Beschattung durch konkurrenzierende Bestandesmitglieder als die Baumart Buche reagiert, so dass sich der Kronenansatz bedrängter Bäume signifikant schneller nach oben verschiebt als der Kronenansatz bedrängter Buchen, deren Schattentoleranz ihr offensichtlich dazu verhilft, Äste in tieferen Kronenbereichen über längere Zeit zu erhalten und somit auch eine längere Krone ausbildet.

4.2.2 EINZELASTEBENE

4.2.2.1 ASTSTATUS

Die Aufnahme von toten und lebenden Ästen ermöglicht die Modellierung des Astmortalitätsprozesses mit Hilfe einer binären logistischen Regression. Dafür wurde der Aststatus (lebend/ tot) mit Stellvertretervariablen codiert („tot“, Ereignis tritt nicht ein: „0“ bzw. „lebend“, Ereignis tritt ein: „1“) und als abhängige Variable verwendet. Die binäre logistische Regression ermöglicht es, Vorhersagen über die Eintrittsmöglichkeit des Ereignisses „lebend“ in Abhängigkeit verschiedener Regressoren zu treffen.

In Anlehnung an KINT et al. (2010) sowie der in Kapitel 2.1.2.2.1 beschriebenen Vorgehensweise wurde das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes wie folgt formuliert:

$$p(L) = \frac{1}{1 + e^{-(a+b*Alter_{1,3}+c*H+d*Bab_{1,3}+f*AD+g*ir5_{(mittel)_{1,3}}+h*AW)}}$$

Formel 27: Modell zur Prognose des Aststatus‘.

wobei:

- $p(L)$ = Wahrscheinlichkeit für Aststatus= lebend
 $Alter_{1,3}$ = Alter_{1,3} [Jahre]
 H = Baumhöhe [m]
 $Bab_{1,3}$ = Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
 AD = Astdurchmesser [mm]
 $ir5_{(mittel)1,3}$ = durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm].
 AW = Astansatzwinkel [°]
 a,b,c,d,f,g,h = empirische Koeffizienten

Im Zuge der Analyse erwies sich jedoch der Einfluss des Astansatzwinkels als statistisch nicht signifikant.

Damit lautet die Regressionsgleichung:

$$p(L) = \frac{1}{1 + e^{-(a+b*Alter_{1,3}+c*H+d*Bab_{1,3}+f*AD+g*ir5_{(mittel)1,3})}}$$

Formel 28: Modifiziertes Modell zur Prognose des Aststatus‘.

Mit den oben genannten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung
Buche	Äste [N]	1882	10	52	27,47	10,96
	Davon lebende Äste [N]	1461	8	44	21,38	9,14
	Davon tote Äste [N]	421	0	17	6,1	4,30
	Alter _{1,3} [Jahre]	69	8	51	23,13	11,32
	Baumhöhe [m]	69	4,45	26,23	14,65	5,93
	Baumalter auf 1,3m Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	1882	1	48	15,99	10,10
	Astdurchmesser [mm]	1882	1,7	101,5	21,64	11,1
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm].	69	0,41	5,01	2,31	0,92

<i>Eiche</i>	Äste [N]	2290	5	62	31,16	15,07
	Davon lebende Äste [N]	1365	5	37	18,66	7,54
	Davon tote Äste [N]	925	0	32	12,50	9,96
	Alter _{1,3} [Jahre]	74	4	29	15,84	7,58
	Baumhöhe [m]	74	2,83	23,35	12,76	5,89
	Baumalter auf 1,3m Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	2290	1	27	10,39	6,026
	Astdurchmesser [mm]	2290	1,5	128,7	24,83	15,19
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm].	74	1,09	6,11	3,14	1,08

Tabelle 32: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des binär-logistischen Regressionsmodells zur Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit des Aststatus'="lebend".

Baumart	Variable	Parameter-schätzer	Standardfehler des Schätzers	Wald-Statistik	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	-0,387	0,411	0,887		ns
	Alter _{1,3} [Jahre]	-0,287	0,029	99,95	8,741	***
	Baumhöhe [m]	-0,315	0,050	39,261	7,303	***
	Baumalter auf 1,3m Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	0,566	0,032	314,177	2,515	***
	Astdurchmesser [mm]	0,175	0,015	130,179	1,193	***
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm]	1,154	0,122	89,336	1,038	***

Eiche	(Konstante)	2,581	0,405	40,533		***
	Alter _{1,3} [Jahre]	-0,755	0,055	189,70	10,78	***
	Baumhöhe [m]	-0,383	0,052	53,57	9,152	***
	Baumalter auf 1,3m Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	1,132	0,054	433,87	1,851	***
	Astdurchmesser [mm]	0,178	0,010	291,58	1,182	***
	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm]	0,407	0,089	20,96	1,379	***

Buche	N=1882
	-2LL ²⁶ = 794,51; r ² CS ²⁷ =0,473; r ² N ²⁸ =0,723
	Trennwert=0,81; AUC ²⁹ =0,957; Sensitivität= 87,4; Spezifität= 90,3

Eiche	N=2290
	-2LL= 984,246; r ² CS=0,601; r ² N =0,812
	Trennwert=0,65; AUC=0,970; Sensitivität= 89,9; Spezifität= 91,8

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 33: Ergebnisse des binär-logistischen Regressionsmodells zur Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit des Aststatus'="lebend" nach Formel 28.

Die Hosmer – Lemeshow - Anpassungsstatistik (HL - Test) liegt für die Modelle beider Baumarten mit $\chi^2(8) = 9,143$ (Buche) bzw. $\chi^2(8) = 5,410$ (Eiche) im nicht signifikanten Bereich und weist somit auf eine gute Modellanpassung hin (SCHENDERA (2008)). Die Pseudo - R² - Statistiken nach Cox und Snell (r²CS) sowie Nagelkerke (r²N) (vergleiche Kapitel 2.12.2.3) geben einen Hinweis darauf, dass der durch das Modell erklärte Varianzanteil vergleichsweise hoch liegt. Der Gesamtanteil der durch das Modell korrekt vorhergesagten Gruppenzugehörigkeiten liegt bei 88% (Buche) beziehungsweise 90,7% (Eiche). Die Maße für den Anteil korrekt vorhergesagter positiver und negativer Gruppenzugehörigkeiten, Sensitivität und Spezifität, liegen für die Modelle beider Baumarten in einem

²⁶ -2LL= -2 Log- Likelihood

²⁷ r²CS= Pseudo- R² nach Cox und Snell

²⁸ r²N= Pseudo- R² nach Nagelkerke

²⁹ AUC= Area under Curve (Fläche unter der (ROC)-Kurve)

Bereich von 87 bis 92 Prozent. Der AUC nimmt im Modell der Baumart Buche einen Wert von 0,957, im Modell der Baumart Eiche einen Wert von 0,970 an (vgl. Abbildung 31).

Aufgrund der schon zuvor diskutierten und bei beiden Baumarten auftretenden hohen Korrelation zwischen den Variablen $\text{Alter}_{1,3}$ und Baumhöhe liegen die zugehörigen Toleranzmaße recht hoch und in einem Fall knapp über dem Grenzwert von $\text{VIF} = 10$. Hier ist somit Beeinträchtigung des Modells durch Multikollinearität zu vermuten (SACHS & HEDDERICH (2006)). Eine Überprüfung der Stabilität der Parameterschätzer in Vorzeichen und Betrag an mehreren zufällig ausgewählten Teilstichproben ergab, dass diese jedoch eine hohe Stabilität aufwiesen. Aus diesem Grund wird die Übertretung des Toleranzwerts von $\text{VIF} = 10$ der Variable „ $\text{Alter}_{1,3}$ “ im Modell für die Baumart Eiche akzeptiert.

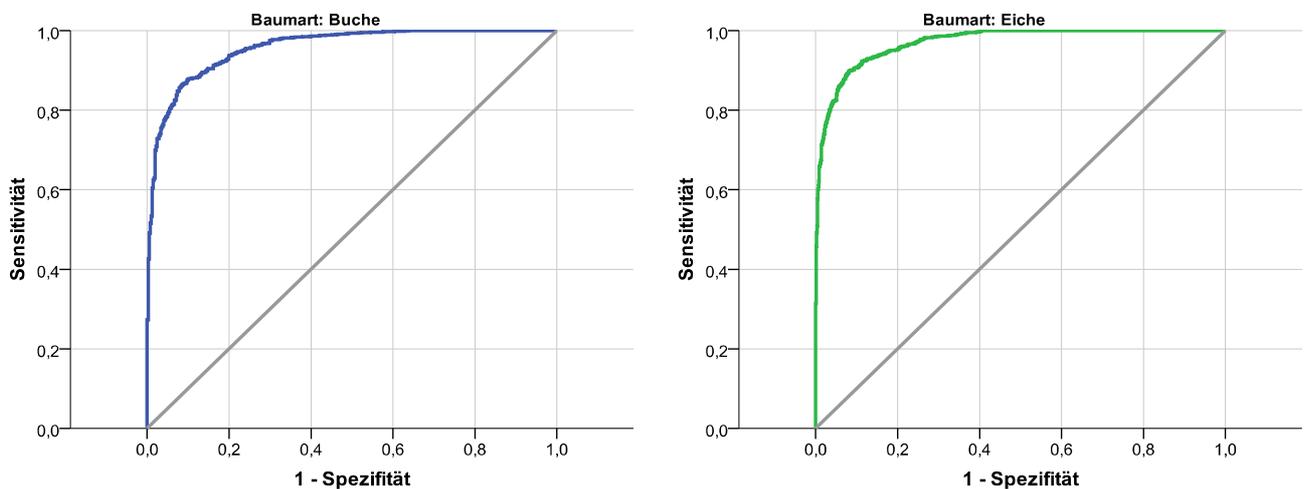


Abbildung 31: ROC- Kurve für das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit des Aststatus‘ „lebend“ für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur) mit einer AUC von 0,975 (Buche) bzw. 0,970 (Eiche). Die diagonale Linie des Diagramms repräsentiert die Situation, in welcher das binäre Ergebnis vollkommen zufällig erraten werden würde.

Im Zuge einer Trennwertanalyse (vgl. HEIN & WEISKITTEL (2010)) wurde derjenige Trennwert ermittelt, bei welchem die Summe der fehlerhaften Gruppenzuweisungen durch das Modell minimal ist. Dieser liegt im Modell der Baumart Buche bei 0,81, im Modell der Baumart Eiche bei 0,65.

Das Modell prognostiziert unter der Annahme gleicher Voraussetzungen:

- Eine abnehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmendem Baumalter. Dieser Befund bezieht sich auf die fortschreitende Astmortalität, welche jedoch primär dem mit dem Alter eng zusammenhängenden Höhenwachstum zuzuordnen ist. In

Verbindung mit der Variable „Höhe“ ergeben sich jedoch unterschiedliche Szenarien für verschiedene Standortsbonitäten. So prognostiziert das Modell eine höhere Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes unter Annahme gleicher Bedingungen bei geringeren Standortsbonitäten. Dies steht in Einklang mit dem erstellten Kronenansatzmodell und ist biologisch plausibel.

- Eine abnehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmender Baumhöhe. Diesem Ergebnis ist unter dem Gesichtspunkt des zuvor Diskutierten biologische Plausibilität zuzusprechen.
- Eine zunehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmendem $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung. Dieser Befund bezieht sich auf die vertikale Verteilung der Äste an der Schaftachse und sagt aus, dass- gleiche Bedingungen vorausgesetzt- höher am Schaft ansetzende Äste eine größere Wahrscheinlichkeit besitzen, bei der Datenaufnahme lebend vorgefunden worden zu sein als Äste aus tieferen Schaftbereichen. Dieses Ergebnis ist schlüssig und biologisch plausibel.
- Eine zunehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmendem Astdurchmesser. Dieser Befund ist unter dem Blickwinkel der Einzelastvitalität als biologisch plausibel zu beurteilen.
- Eine zunehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmendem mittlerem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der letzten 5 Jahre. Mit diesem Ergebnis wird auch die Einzelbaumvitalität abgedeckt und ist desgleichen biologisch plausibel.

Das Modell deckt somit alle hauptsächlichen Einflüsse auf den Astmortalitätsprozess ab. Einzelbaum- und Einzelastvitalität werden ebenso berücksichtigt wie standörtliche Gegebenheiten, die zeitliche Dimension oder Einflüsse der vertikalen Astposition.

4.2.2.1.1 EINFLUSS DER BAUMART

Der Baumartenvergleich ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Baumarten in Interzept als auch eine signifikante Interaktion zwischen den Variablen Baumart und $\text{Alter}_{1,3}$, Baumart und $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung und Baumart und dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der letzten 5 Jahre.

Die Interaktion zwischen der Variable Baumart und $\text{Alter}_{1,3}$ bezieht sich dabei auf die zeitliche Dimension des Astmortalitätsprozesses, welche im Modell der Baumart Eiche eine im Vergleich zum

Modell der Baumart Buche mehr als doppelt so hohe negative Gewichtung erhält. Werden alle Variablen konstant gehalten, ist die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes für die Baumart Eiche signifikant geringer als für die Baumart Buche.

Die signifikante Interaktion zwischen der Variable Baumart und Baumalter auf 1,3m Höhe zum Zeitpunkt der Astbildung bezieht sich auf die vertikale Verteilung der Äste an der Schaftachse. Diese Variable wird im Modell der Baumart Eiche im Vergleich zum Modell der Baumart Buche um wiederum mehr als das Doppelte höher gewichtet und zeigt somit die große Bedeutung der vertikalen Astposition am Schaft für die Baumart Eiche an, während die vertikale Astposition bei der Baumart Buche auf Grundlage dieses Modells für die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Astes signifikant weniger Bedeutung besitzt. Diese Aussage ist inhaltlich konsistent mit dem erstellten Kronenansatzhöhenmodell und ist vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Schatterträgnisses beider Baumarten biologisch plausibel.

Ferner spielt der durchschnittliche Radialzuwachs der letzten fünf Jahre als Proxy für die kurzfristige Vitalitätstendenz eines Baumes eine signifikant größere Rolle im Modell der Baumart Buche im Vergleich zum Modell der Baumart Eiche. Damit wird vom Modell eine empfindlichere Reaktion der Baumart Buche auf Veränderung des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses der letzten fünf Jahre vorausgesagt. Obgleich dieses den Ergebnissen des Kronenansatzhöhenmodells in gewisser Weise widerspricht, kann durchaus auch inhaltliche Konsistenz mit Resultaten anderer Arbeiten festgestellt werden (vgl. z.B. NUTTO (1999)).

4.2.2.1.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Abbildung 32 verdeutlicht den Einfluss des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe. Die Astüberlebenswahrscheinlichkeit der Baumart Buche ist unter gleichen Bedingungen für weniger vitale Bäume zum gleichen Zeitpunkt deutlich geringer als diejenige von Bäumen höherer Vitalität. Dabei prognostiziert das Modell unter sonst gleichen Bedingungen eine um 2 Jahre frühere Eintrittswahrscheinlichkeit des Aststerbens an Bäumen mit einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs der letzten 5 Jahre von 2,5mm im Vergleich zu Bäumen des Radialzuwachsszenarios von 3,5mm (vgl. horizontale Trennwertlinie (blau) in Abbildung 32).

Für die modellierten Radialzuwachsszenarien der Baumart Eiche ist kaum ein Unterschied auszumachen.

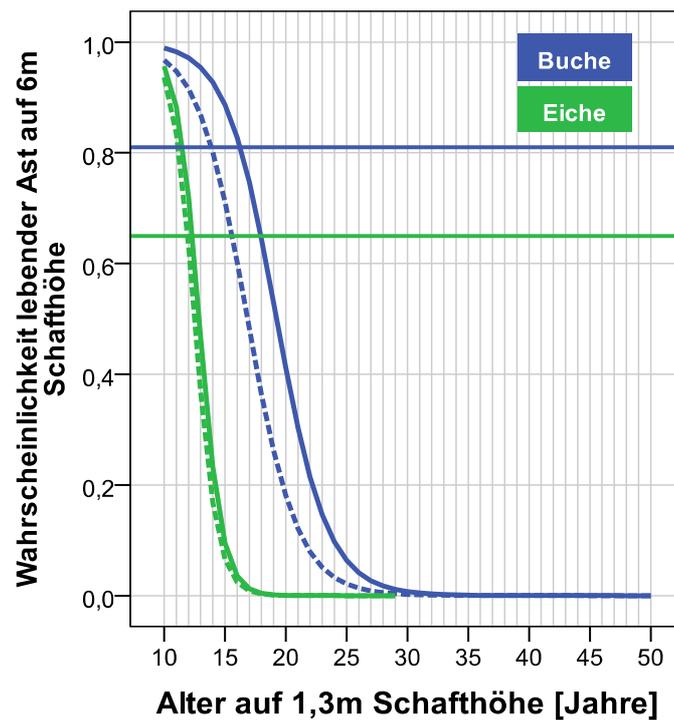


Abbildung 32: Darstellung der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes auf 6m Schafthöhe für einen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe von 2,5mm (Signatur: gepunktete Linie) und 3,5mm (Signatur: durchgezogene Linie) bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=8m$ und einem unterstellten Astdurchmesser von 10mm von Buche (Signatur: blau) und Eiche (Signatur: grün). Trennwert (horizontale Linien): Buche 0,81 (Signatur: blau), Eiche: 0,65 (Signatur: grün).

4.3 ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT

4.3.1 EINZELBAUMBEBENE

4.3.1.1 ASTFREIE SCHAFTLÄNGE

Der Fortschritt der Astüberwallung kann durch die Ansatzhöhe des untersten nicht überwallten Totastes beziehungsweise der astfreien Schaftlänge³⁰ auf Einzelbaumbene quantifiziert werden. Entsprechend dem in dieser Arbeit entwickelten Kronenansatzhöhenmodell und basierend auf den Untersuchungen von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) können hier auch Wachstumsgesetzmäßigkeiten für deren Entwicklung gefunden werden. Die Auswahl der unabhängigen Variablen Baumhöhe [m], $Alter_{1,3}$ [Jahre] sowie Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe [cm] erfolgte auf

³⁰ Die Astfreie Schaftlänge wird in dieser Arbeit als die Ansatzhöhe des ersten nicht überwallten Totastes mit einer Aststummellänge von über einem Zentimeter am Schaft definiert.

Grundlage der von den genannten Autoren entwickelten Modelle zur Prognose der astfreien Schaftlänge und entsprechen der Variablenauswahl des in dieser Arbeit erstellten Kronenansatzhöhenmodells.

Gleichwohl musste aufgrund des in Abbildung 33 illustrierten kurvilinearen Zusammenhangs zwischen der astfreien Schaftlänge und den unabhängigen Variablen (hier beispielhaft dargestellt: astfreie Schaftlänge in Abhängigkeit der Baumhöhe) eine logarithmische Transformation des Regressanden gewählt werden. Aus diesem Grund kann die in dieser Arbeit verwendete Modellformulierung zur Prognose der astfreien Schaftlänge nicht dem in dieser Arbeit erstellten Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe entsprechen.

Die aufgrund dieser Überlegungen formulierte Regressionsgleichung lautet:

$$\ln(ASL) = a + b * H + c * Alter_{1,3} + d * BHD$$

Formel 29: Modell zur Schätzung der astfreien Schaftlänge.

wobei:

ASL = Astfreie Schaftlänge [m]

H = Baumhöhe [m]

*Alter*_{1,3} = Alter_{1,3} [Jahre]

BHD = Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]

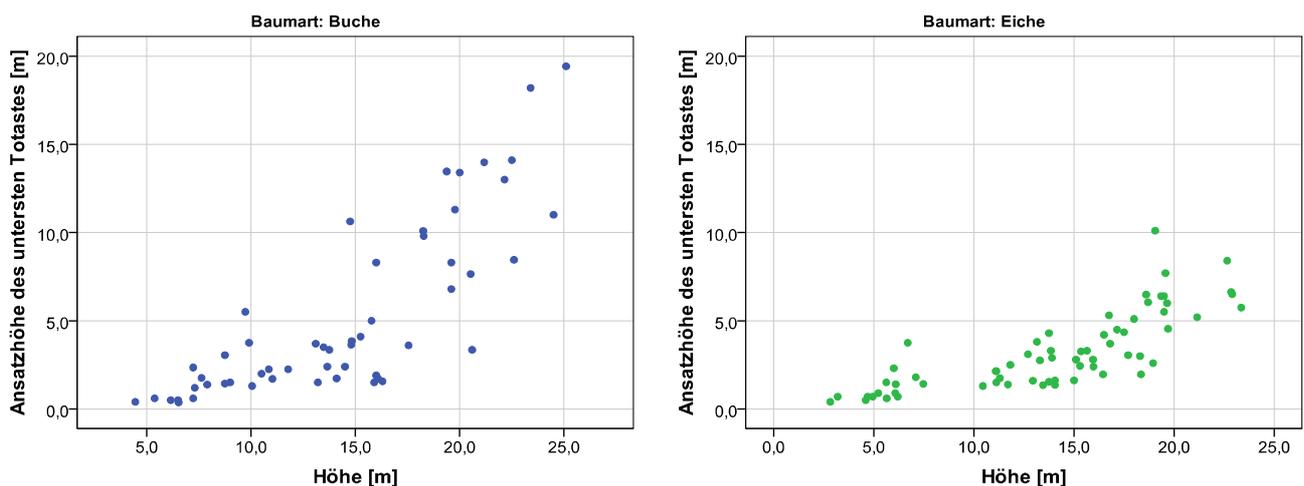


Abbildung 33: Ansatzhöhe des untersten Totastes in Abhängigkeit der Baumhöhe für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Im Modell der Baumart Eiche erwies sich ausschließlich die Baumhöhe als signifikant zur Klärung der Gesamtstreuung beitragend. Bei der Baumart Buche konnte noch die Variable „Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe“ signifikant zur Klärung der Varianz der astfreien Schaftlänge beisteuern. Das Alter_{1,3} trug bei keiner der beiden Baumarten signifikant zur weiteren Klärung der Gesamtstreuung bei. Die Regressionsgleichung wurde somit wie folgt modifiziert:

$$\ln(ASL) = a + b * H + c * BHD$$

Formel 30: Modifiziertes Modell zur Schätzung der astfreien Schaftlänge.

mit den oben genannten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Buche</i>	Astfreie Schaftlänge [m]	54	0,37	19,42	5,25	4,93
	Baumhöhe [m]	54	4,45	25,1	14,31	5,54
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	54	4,3	24,4	11,24	5,04
<i>Eiche</i>	Astfreie Schaftlänge [m]	65	0,4	10,10	3,2	2,17
	Baumhöhe [m]	65	2,83	23,35	13,80	5,51
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	65	1,9	26,6	13,68	6,26

Tabelle 34: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung der astfreien Schaftlänge.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz
<i>Buche</i>	(Konstante)	-1,215	0,192			***
	Baumhöhe [m]	0,256	0,031	0,730	6,162	***
	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]	-0,114	0,034	0,049	6,162	**
<i>Eiche</i>	(Konstante)	-0,702	0,133			***
	Baumhöhe [m]	0,117	0,009	0,730	1,0	***

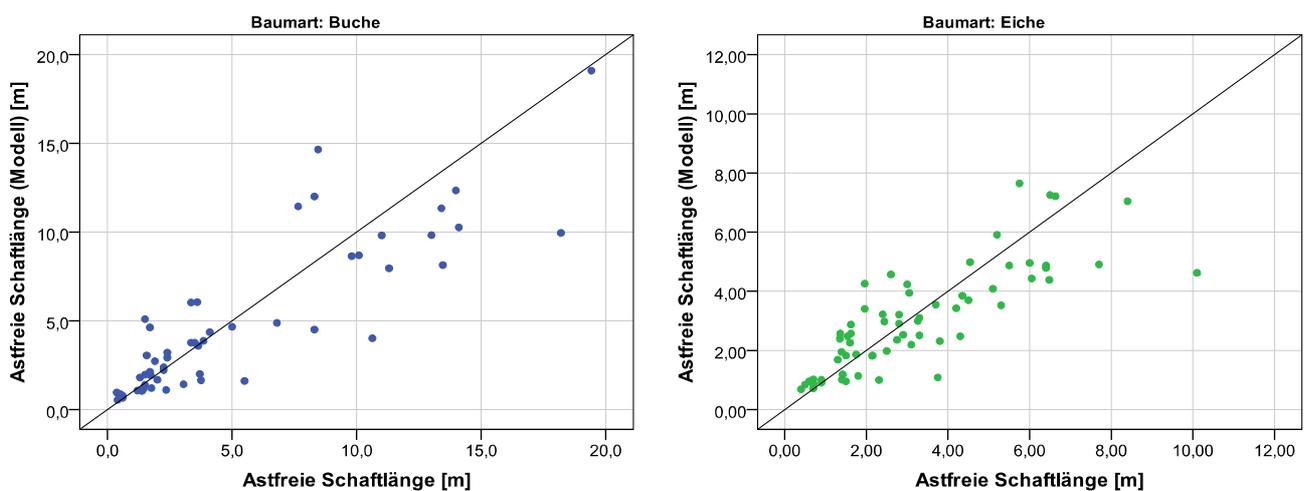
Buche	N=54
	$r^2=0,779$; $r^2_{adj}=0,771$
	Nicht standardisierte Residuen: 12,801 mit 51 FG

Eiche	N=65
	$r^2=0,730$; $r^2_{adj}=0,726$
	Nicht standardisierte Residuen: 9,888 mit 63 FG

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant

Tabelle 35: Ergebnisse des (multiplen) linearen Regressionsmodells für die Prognose der astfreien Schaftlänge nach Formel 30.

Die Gesamtstreuung der Variable „astfreie Schaftlänge“ kann bei beiden Baumarten zu 73% alleine durch die Variable Baumhöhe erklärt werden. Bei der Baumart Buche trägt der Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe noch zu etwa 5% zur Verringerung der Gesamtstreuung bei. Mit einer Durbin - Watson Teststatistik von 1,757 (Buche) bzw. 1,906 (Eiche) kann in beiden Fällen auf Grundlage der tabellierten Werte für $d_U = 1,466$ (Buche) und $d_U = 1,468$ (Eiche) Autokorrelation ausgeschlossen werden (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)). Für beide Modelle sind die Residuen normalverteilt und weisen kaum auffällige Tendenzen auf, wobei jedoch vor allem für das Modell der Baumart Buche leichte heteroskedastische Tendenzen mit zunehmender Baumhöhe erkennbar sind (siehe Abbildung 34). Da diese jedoch hauptsächlich durch einige wenige (4 bei Buche; 3 bei Eiche) Ausreißer verursacht wurden, wurde auf eine Gewichtung bzw. weitere Transformation von Variablen verzichtet. Die VIF - Werte beider Modelle liegen unter dem von SACHS & HEDDERICH (2006) genannten Grenzwert von 10 und weisen somit nicht auf Prämissenverletzung des linearen Regressionsmodells hin.



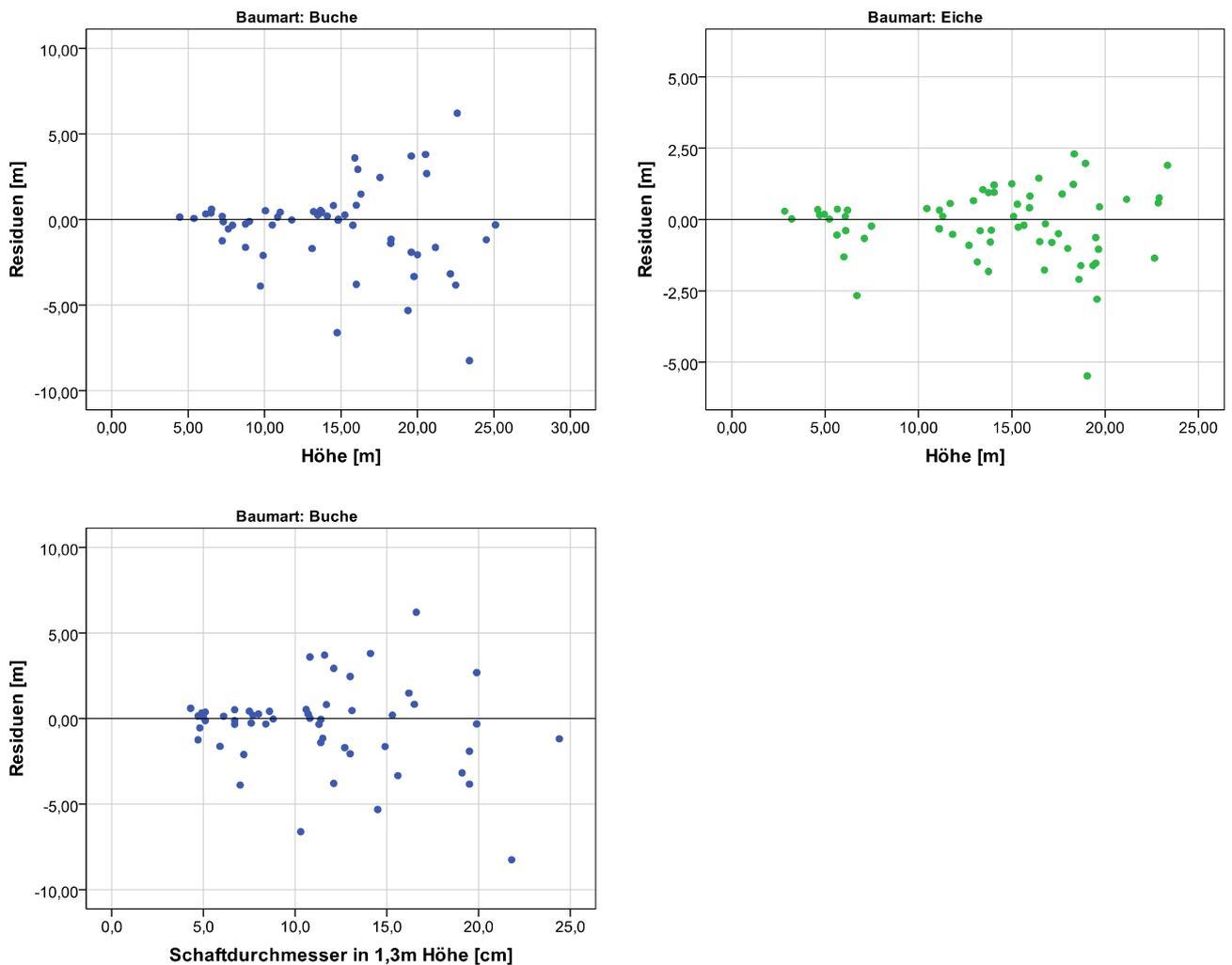


Abbildung 34: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Für die Baumart Buche ergeben sich Schätzwerte mit bis zu 9 Metern Unterschied zu den empirischen Daten. Die meisten der vorhergesagten Schätzwerte prognostizieren die Länge des astfreien Schaftes auf Basis des Modells für die Baumart Buche mit einer Genauigkeit von ± 5 Metern. Die Residuen für das Modell der Baumart Eiche streuen bis auf einen Ausreißer deutlich weniger mit bis zu maximal knappen 4 Metern Unterschied zu den empirisch erhobenen Daten. Dabei wird für den größten Teil der Schätzwerte eine Genauigkeit der Prognose von $\pm 2,5$ Metern erreicht.

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen:

- zunehmende astfreie Schaftlängen mit zunehmender Baumhöhe. Dies steht im Einklang mit den Modellen zur Prognose der astfreien Schaftlänge von z.B. NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) und beschreibt die Entwicklung der astfreien Schaftlänge mit zunehmender Höhe (und somit zunehmendem Alter) (vgl. Abbildung 35). Damit ist die Wirkrichtung des Vorzeichens dieser Variable biologisch plausibel. Wird eine unterschiedliche Standortsgüte unterstellt, prognostiziert das Modell unter sonst gleichen Bedingungen einen vergleichsweise längeren astfreien Schaft für Bäume, welche auf besseren Standorten stocken. Auch diese Aussage steht im Einklang mit den Modellen zur Prognose der astfreien Schaftlänge von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009).
- Abnehmende astfreie Schaftlängen mit zunehmendem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe. Wird gleiche Baumhöhe auf gleichem Standort und somit gleiches Baumalter unterstellt, prognostiziert das Modell implizit geringere astfreie Schaftlängen mit zunehmendem Radialzuwachs (vgl. Abbildung 35). Die Wirkrichtung des Vorzeichens findet sich auch in den Modellen zur Prognose der astfreien Schaftlänge von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) wieder und steht in inhaltlichem Einklang mit den Ergebnissen des in dieser Arbeit erstellten Kronenansatzmodells.

Durch die logarithmische Transformation des Regressanden entsteht der in Abbildung 35 dargestellte Verlauf der Astüberwallung mit zunehmendem Baumalter auf Einzelbaumebene, welcher an dieser Stelle aufgrund waldwachstumskundlicher Gesetzmäßigkeiten (abnehmender Höhenzuwachs mit zunehmendem Baumalter, dadurch verlangsamter Astmortalitäts- sowie Astüberwallungsprozess; damit einhergehend eine Zunahme der relativen Kronenlänge mit zunehmendem Alter) explizit als biologisch unplausibel bewertet werden muss. Weitere Ausführungen hierzu finden sich im Diskussionsteil dieser Arbeit, Kapitel 5.3.3.1.1.

4.3.1.1.1 EINFLUSS DER BAUMART

Abgesehen davon, dass die Variable Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe nur im Modell der Baumart Buche signifikant zur Verringerung der unerklärten Reststreuung beitrug, unterscheiden sich die Regressionsgleichungen beider Baumarten in der Steigung der Variable Baumhöhe signifikant. Im Modell der Baumart Eiche wirkt die Variable Baumhöhe somit signifikant geringer auf die Erhöhung der astfreien Schaftlänge bei Zunahme ein. Trotz der vom Kronenansatzhöhenmodell und dem Modell

zur Prognose des Aststatus‘ prognostizierten rascheren Astmortalität der Baumart Eiche scheint es im Verlauf der Astüberwallung zu Verzögerungen zu kommen.

4.3.1.1.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Ein signifikanter Einfluss des Dickenwachstums konnte nur für die empirischen Daten der Baumart Buche festgestellt werden. Unter Einsatz des in dieser Arbeit erstellten Höhenwachstumsmodells in das Modell zur Prognose der astfreien Schaftlänge können implizit Aussagen über den Einfluss des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses gemacht werden. Dabei berechnet sich unter gleichen Bedingungen ein zunehmender Unterschied in der Länge des astfreien Schaftes mit zunehmendem Alter, welcher auf einem Standort von $SI_{10}=7$ im Alter 25 einen Betrag von knappen zwei Metern und bei gleichem Alter auf einem Standort der Bonität $SI_{10}=8$ einen Betrag von 2,6 Metern aufweist (vgl. Abbildung 35).

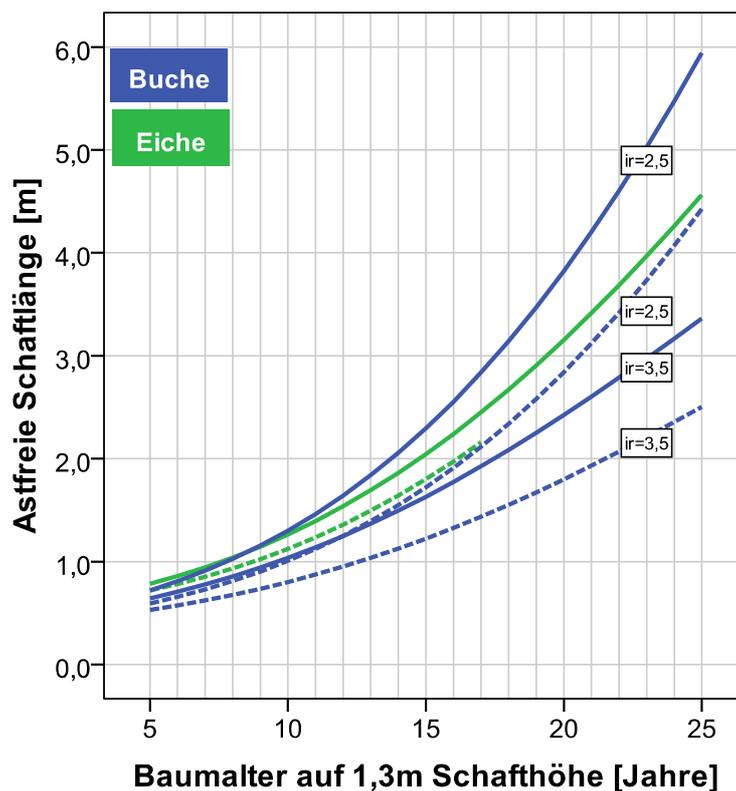


Abbildung 35: Modellierte astfreie Schaftlänge in Abhängigkeit des Alters_{1,3} von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedenen Standortbonitäten ($SI_{10} = 7$: gestrichelte Linie; $SI_{10} = 8$: durchgezogene Linie) für ein Radialzuwachszenario (nur bei Buche) von durchschnittlichen jährlichen 2,5mm und 3,5mm.

4.3.2 EINZELASTEBENE

4.3.2.1 ASTÜBERWALLUNGSDAUER³¹

Es erscheint plausibel, dass die Zeit, die von einem Baum benötigt wird, um einen Ast zu überwallen, zunächst von astspezifischen Dimensionsgrößen wie der Astquerschnittsfläche des Totaststummels aber auch der vertikalen Distanz zwischen der Oberfläche des Stammes und der Abbruchstelle des Totastes abhängt. Diese Dimensionsgrößen könnten beispielsweise durch den Astansatzwinkel beeinflusst werden, was sich unabhängig von dessen Einfluss auf den Astdurchmesser aus trigonometrischen Überlegungen heraus erklärt. Je nach Abbruchverhalten kann sich die zu überwallende Astquerschnittsfläche bei gleichem Astdurchmesser mit steiler werdendem Astansatzwinkel vergrößern und somit die Überwallungszeit verzögern. Jedoch verkürzt sich mit steiler ansetzendem Astansatzwinkel bei gleicher Totaststummellänge aber auch die Distanz zwischen der Oberfläche des Schaftes und der Abbruchstelle des Totastes. Somit ist es also auch möglich, dass die Überwallungszeit mit zunehmendem Astansatzwinkel verlängert wird. Des Weiteren ist ein Einfluss des mittleren jährlichen Radialzuwachses des Baumes in der Überwallungszeit auf die Dauer der Überwallung zu vermuten.

Die beschriebenen Wirkweisen können somit unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen aufgrund ihrer Zwangsläufigkeit nicht von der jeweiligen Baumart abhängig sein. Sehr wohl können sich jedoch Unterschiede hinsichtlich der jeweiligen Voraussetzungen ergeben, die baumartenspezifisch sind. Wird der Buche in der Literatur ein rasches Abfallen der Totäste und eine rasche und „fast problemlose“ Überwallung bescheinigt (siehe z.B. GELINSKY (1933), BUTIN & KOWALSKI (1983b)), so finden sich in der Literatur jedoch Hinweise dafür, dass dieser Prozess bei der Baumart Eiche eher zögerlich vonstatten geht. So empfehlen BUTIN & KOWALSKI (1983a) etwa für die Eiche eine Trockenastung der verbliebenen „Totastruinen“, um den Astüberwallungsprozess zu beschleunigen.

Mit Hilfe des Astüberwallungsmodells sollen die verschiedenen Einflüsse auf die Astüberwallungsdauer bestimmt werden. Für die Untersuchungen standen die Totäste zur Verfügung, welche nach der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Methodik insbesondere an den älteren Bäumen der Höhenstufe 3, gelegentlich auch an den etwas jüngeren Bäumen der Höhenstufe 2 entnommen wurden.

³¹ Die Astüberwallungsdauer wird in dieser Arbeit definiert als die Anzahl der Jahre ab dem Jahr der Astmortalität bis zum Jahr des vollständigen Verschließens der Astabbruchstelle.

Wie schon zuvor diskutiert und des Weiteren gestützt auf den von HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) formulierten Modellen zur Prognose der Astüberwallungsdauer bei Esche, Bergahorn und Buche, wurde der Einfluss des Astdurchmessers, des mittleren jährlichen Radialzuwachses während der Überwallungszeit sowie des Radius des totasthaltigen Kerns (Vgl. Kapitel 2.7, Abbildung 2) auf die Überwallungsdauer überprüft. Zusätzlich wurde der Astansatzwinkel als weitere Einflussvariable auf die Astüberwallungsdauer in die Untersuchung mit einbezogen.

Die Regressionsgleichung wurde somit wie folgt formuliert:

$$\ddot{U}D = a + b * AD + c * ir_{(mittel)1,3\ddot{U}D} + d * TA + e * AW$$

Formel 31: Modell zur Schätzung der Astüberwallungsdauer.

wobei:

$\ddot{U}D$ = Astüberwallungsdauer [Jahre]

AD = Astdurchmesser [mm]

$ir_{(mittel)1,3\ddot{U}D}$ = mittlerer jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]

TA = Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]

AW = Astansatzwinkel [°]

a, b, c, d, e = empirische Koeffizienten

Jedoch erwies sich der Astansatzwinkel in den Modellen beider Baumarten als nicht signifikant zur Verringerung der Reststreuung beitragend. Um die Voraussetzung der Normalverteilung der Residualwerte zu erfüllen, wurden die Werte des Regressanden logarithmisch transformiert. Um die Voraussetzung der Linearitätsbedingung zu erfüllen, wurde die Variable „Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns“ ebenfalls logarithmiert. Somit ergibt sich unter Berücksichtigung der vorgenommenen Transformationen sowie unter Entfernung der Variable Astansatzwinkel folgende modifizierte Regressionsgleichung:

$$\ln(\ddot{U}D) = a + b * AD + c * ir_{(mittel)1,3\ddot{U}D} + d * \ln(TA)$$

Formel 32: Modifiziertes Modell zur Schätzung der Astüberwallungsdauer.

Es gelten die oben genannten Variablenbezeichnungen.

Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Buche	Überwallungsdauer [Jahre]	112	4	13	7,63	2,148
	Astdurchmesser [mm]	112	3,8	41,9	17,28	7,17
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]	112	0,92	3,72	2,17	0,561
	Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]	112	0,3	5,4	1,61	0,84
Eiche	Überwallungsdauer [Jahre]	150	2	17	8,03	3,25
	Astdurchmesser [mm]	150	3,6	37,7	17,11	7,00
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]	150	1,6	6,51	3,64	1,11
	Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]	150	0,3	6,8	2,16	1,33

Tabelle 36: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung der Astüberwallungsdauer.

Baumart	Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	partielles r^2	Variance Inflation Factor	Signifikanz
Buche	(Konstante)	2,120	0,123			***
	Astdurchmesser [mm]	0,014	0,003	0,167	1,045	***
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]	-0,169	0,043	0,102	1,045	***
	Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]	ns				
Eiche	(Konstante)	2,218	0,120			***
	Astdurchmesser [mm]	0,017	0,005	0,178	1,325	***
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]	-0,174	0,026	0,162	1,001	***
	Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]	0,188	0,054	0,051	1,326	***

Buche	N=112
	$r^2=0,269$; $r^2_{adj}=0,255$
	Nicht standardisierte Residuen: 6,855 mit 109 FG

Eiche	N=150
	$r^2=0,390$; $r^2_{adj}=0,378$
	Nicht standardisierte Residuen: 17,931 mit 146 FG

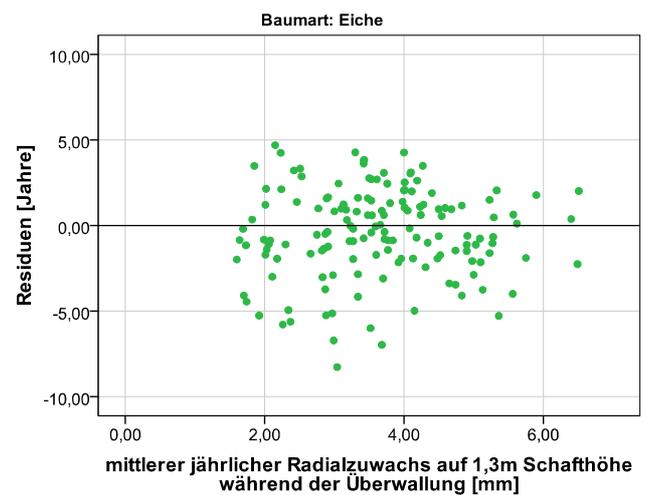
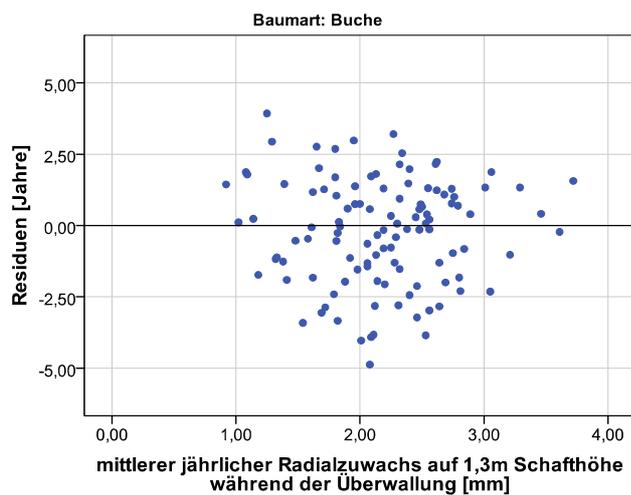
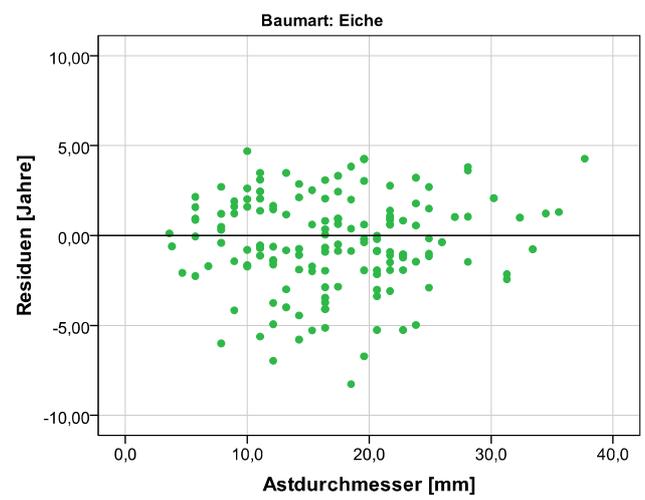
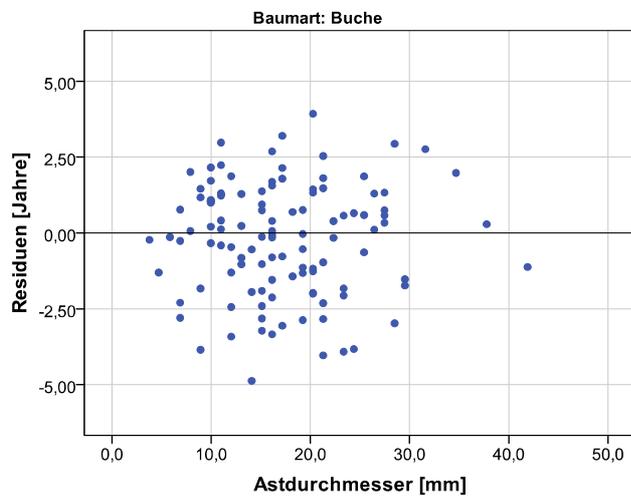
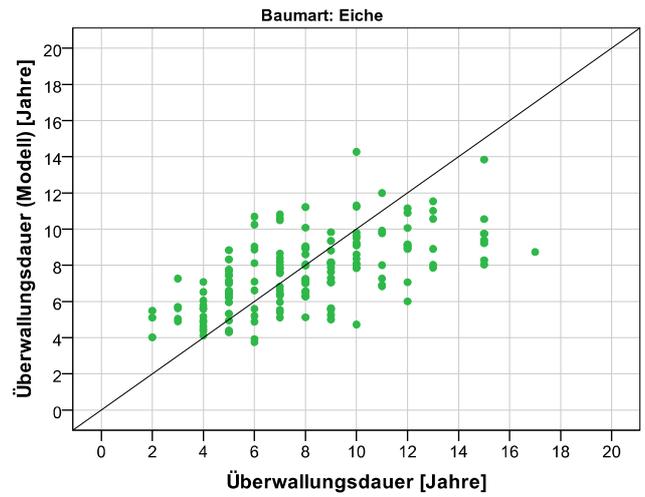
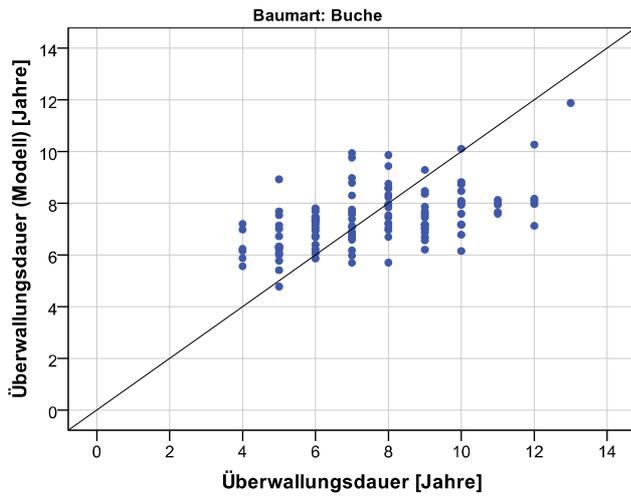
*Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, ns= nicht signifikant*

Tabelle 37: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung der Astüberwallungsdauer nach Formel 32.

Die an den beprobten Ästen erhobene Überwallungsdauer wies eine sehr starke Streuung auf. Dementsprechend konnten nur 25,5% (Buche), beziehungsweise 37,8% (Eiche) der Gesamtstreuung erklärt werden. Bedeutendster Regressor ist bei beiden Modellen der Astdurchmesser, welcher bei der Baumart Buche 16,7%, bei der Baumart Eiche 17,8% der Gesamtstreuung erklärt. Wie zu erwarten, spielt auch der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit eine wichtige Rolle bei der Prognose der Astüberwallungsdauer. Dieser erklärt bei der Baumart Buche weitere 10,2%, bei der Baumart Eiche weitere 16,2% der Gesamtstreuung. Der totasthaltige Teil des asthaltigen Kerns trägt bei Eiche nur noch zu 5,1% zur Klärung der Gesamtstreuung bei; diese Variable leistet für das auf den vorliegenden empirischen Daten basierende Überwallungsdauermodell der Buche jedoch keinen signifikanten Beitrag zur weiteren Klärung der Gesamtstreuung. Die Vorzeichen der Parameterschätzer sind bei beiden Baumarten gleich gerichtet.

Die Überprüfung der unabhängigen Variablen auf Multikollinearität ergab keinen Hinweis auf gegenseitige Abhängigkeiten ($VIF < 10$). Autokorrelation kann bei Buche auf Grundlage des Durbin – Watson - Wertes von 1,968 ausgeschlossen werden, bei Eiche liegt dieser innerhalb des Indifferenzbereichs, innerhalb dessen die H_0 - Hypothese weder verworfen noch bestätigt werden kann (Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977)).

Bei der Überprüfung der Residuen konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Das Modell beider Baumarten prognostiziert die Astüberwallungsdauer lediglich mit einer Genauigkeit von +/- 5 Jahren. Für das Modell der Baumart Eiche ist eine etwas größere Streuung der Residuen zu erkennen.



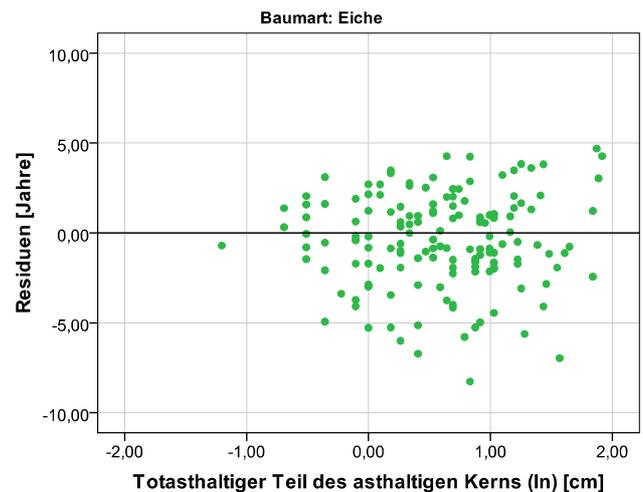


Abbildung 36: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Das Modell schätzt unter Annahme gleicher Voraussetzungen:

- Eine zunehmende Überwallungszeit mit zunehmendem Astdurchmesser. Dies ist biologisch plausibel, denn mit zunehmendem Astdurchmesser muss eine größere Astquerschnittsfläche überwält werden.
- Eine Abnahme der Überwallungszeit mit zunehmendem mittlerem jährlichem Radialzuwachs in 1,3m Höhe. Da eine definierte Distanz mit zunehmender Wachstumsgeschwindigkeit schneller überwält werden kann, ist dieses Ergebnis ebenfalls biologisch plausibel.
- Eine Zunahme der Überwallungszeit mit zunehmendem totasthaltigem Teil des asthaltigen Kerns für die Baumart Eiche. Auch dies ist biologisch plausibel, da diese Variable die horizontale Distanz beschreibt, welche vom Baum überwält werden muss.

4.3.2.1.1 EINFLUSS DER BAUMART

Die Astüberwallungsdauermodelle für die Baumarten Buche und Eiche unterscheiden sich zum einen darin, dass der totasthaltige Teil des asthaltigen Kerns als Einflussvariable im Astüberwallungsdauermodell der Baumart Eiche berücksichtigt wird, welche keinen Eingang in das Astüberwallungsdauermodell der Baumart Buche findet. Zum anderen konnte ein signifikanter Unterschied des Interzepts zum Niveau von $p < 0,05$ beider Modelle nachgewiesen werden. Der Einfluss des Astdurchmessers und des Radialzuwachses in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit unterscheidet sich nicht im Vergleich der beiden Baumarten. Dies erscheint, wie oben diskutiert,

aufgrund des funktionalen Zusammenhangs zwischen Überwallungsdistanz und Überwallungsgeschwindigkeit plausibel. Auf Grundlage der vorliegenden Modelle und unter Annahme eines gleichen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit benötigt die Eiche zur Überwallung eines gleich starken Astes tendenziell längere Zeit als die Buche (vgl. Abbildung 37).

So kann ausweislich des erstellten Modells für die Baumart Eiche bei einem totasthaltigen Teil des asthaltigen Kerns von einem Zentimeter und unter sonst gleichen Bedingungen bei beiden Radialzuwachsszenarien von einer Verlängerung der Überwallungsdauer um etwa ein Jahr ausgegangen werden. Beträgt der totasthaltige Anteil des asthaltigen Kerns 5 Zentimeter, verursacht dies bei einem Radialzuwachsszenario von 3,5mm eine Astüberwallungsverzögerung von etwa 5 Jahren gegenüber der für die Baumart Buche prognostizierten Überwallungsdauer; bei einem Radialzuwachsszenario von 2,5mm ist jedoch schon eine Verzögerung von knappen 6 Jahren gegenüber der Überwallungsdauer von Buchenästen zu erwarten.

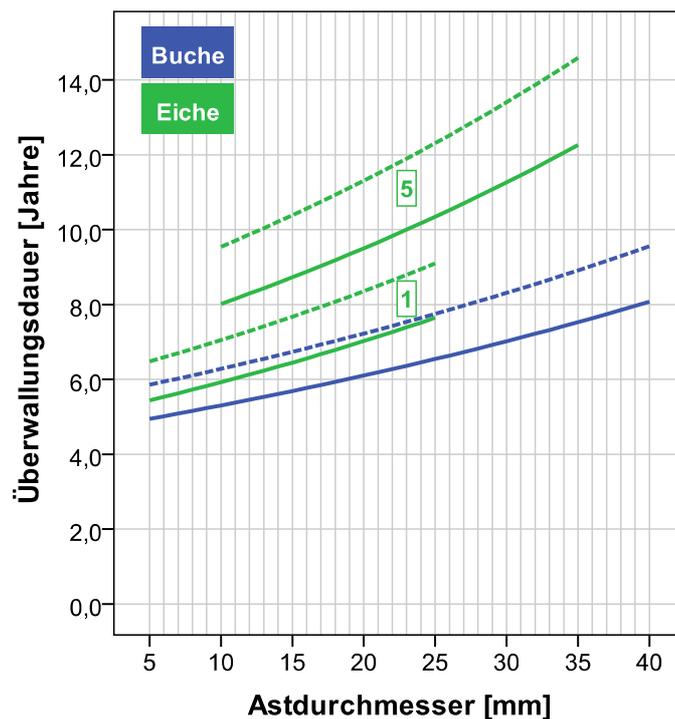


Abbildung 37: Modellierte Überwallungsdauer in Abhängigkeit des Astdurchmessers von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) und zwei verschiedenen Längen des totasthaltigen Kerns (nur Eiche) von 1cm und 5cm.

4.3.2.1.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Ausweislich der in Abbildung 37 beispielhaft dargestellten Überwallungsdauer für Äste der Baumart Buche nimmt der Unterschied der Überwallungsdauer der beiden Radialzuwachsszenarien mit zunehmendem Astdurchmesser allmählich zu und beträgt bei einem Astdurchmesser von 40mm etwa 1,5 Jahre. Dies ist auch für die Baumart Eiche zu beobachten, jedoch ist hier der Unterschied in der Überwallungsdauer beider Radialzuwachsszenarien etwas größer und beträgt für einen totasthaltigen Teil des Asthaltigen Kerns von 5cm und einem Astdurchmesser von 35mm etwa 2 Jahre.

Eine Steuerung der Astüberwallungsdauer mit Hilfe des Dickenwachstums ist also auf Grundlage des in dieser Arbeit erstellten Modells möglich; dabei wirkt es jedoch auf zwei gegensätzliche Weisen auf die Astüberwallungsdauer ein. Während, wie in Kapitel 0 und Kapitel 4.1.2.3 beschrieben, ein positiver Zusammenhang zwischen Astdurchmesser bzw. Astradialzuwachs und dem Radialzuwachs des Schaftes auf 1,3m Höhe besteht, was die Überwallungsdauer verlängert, kann eine Verkürzung der Astüberwallungsdauer mit zunehmendem Radialzuwachs auf 1,3m Höhe erwartet werden (vgl. auch HEIN (2008)). Dies fügt der Bedeutung des zweifachen Pflegekonzepts (vgl. z.B. SPIECKER et al. (2009)) vor allem für die Produktion von qualitativ hochwertigem Holz, welches zunächst dichtständige Bestände zur Förderung der Astreinigung und nach deren Abschluss eine Förderung des Dickenwachstums durch Durchforstungsmaßnahmen empfiehlt, eine weitere Facette hinzu, welche es ebenfalls zu beachten gilt.

4.3.2.2 WAHRSCHEINLICHKEIT DER ASTÜBERWALLUNG

Mit Hilfe des Astüberwallungsdauermodells konnte der mit positivem Vorzeichen versehene und somit die Überwallungszeit verlängernde signifikante Einfluss des Astdurchmessers dargestellt werden. Des Weiteren konnte ein signifikanter Einfluss des mittleren jährlichen Radialzuwachses auf 1,3m Schafthöhe auf die Astüberwallungsdauer festgestellt werden. Der totasthaltige Teil des asthaltigen Kern besitzt nur im Astüberwallungsdauermodell für die Baumart Eiche signifikante Relevanz. Zwar kann dies ein Hinweis darauf sein, dass sich abgestorbenes Buchenholz schneller zersetzt und somit weniger totes Material zurücklässt, welches es zu überwallen gilt. Dennoch ist diese Aussage aufgrund der großen Streuung des vorliegenden Materials und des recht geringen Stichprobenumfangs mit Unsicherheiten behaftet.

Einflüsse auf die Astüberwallung können auch dargestellt werden, indem Merkmale toter, nicht überwallter Äste mit denen von toten, überwallten Ästen verglichen werden. Gleichzeitig ist es durch

die Einteilung der aufgenommenen Daten in dichotome Kategorien („überwallt“ (Ereignis tritt ein; „1“) und „nicht überwallt“ (Ereignis tritt nicht ein, „0“)) möglich, mit Hilfe einer binären logistischen Regression Vorhersagen über die Eintrittsmöglichkeit des Ereignisses „Überwallung³²“ in Abhängigkeit verschiedener Prädiktoren zu treffen.

Mit der folgenden Untersuchung wird der Fokus also von einer intervallskalierten Skala („Überwallungsdauer“) hin zu einer nominalskalierten Skala („Überwallung tritt ein“/ „Überwallung tritt nicht ein“) verschoben. Es soll die These überprüft werden, dass ein Buchenast unter gleichen Voraussetzungen eine höhere Wahrscheinlichkeit besitzt, überwallt zu werden.

Als mögliche Einflussvariablen auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ast bei der Datenaufnahme überwallt vorgefunden wurde, wurden

- der Astdurchmesser
- die Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis und
- der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe nach dem Mortalitätsereignis
 - bis zum Zeitpunkt der Datenaufnahmen und somit der Fällung im Winter 2008/ 2009 bei nicht überwallten Ästen
 - bis zur vollständigen Überwallung des Astes bei überwallten Ästen

identifiziert.

Da mit Hilfe des Astüberwallungsdauermodells die unterschiedlichen Einflussgrößen auf die Astüberwallungsdauer der beiden Baumarten schon angegeben werden konnten, wurde im Gegensatz zum bisherigen Vorgehen die Regression nicht getrennt für Buche und Eiche berechnet. Dafür wurde

- die Baumart

als weitere, kategorial skalierte Variable mit in die Analyse aufgenommen. Zusätzlich sollte der Einfluss des Astansatzwinkels auf die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung überprüft werden.

Somit lautet die Gleichung zur Abschätzung der Überwallungswahrscheinlichkeit:

³² Ein Ast wird in dieser Arbeit als überwallt angesehen, sobald seine Abbruchstelle vollständig mit dem ersten Jahrring verschlossen ist.

$$p(\ddot{U}) = \frac{1}{1 + e^{-(a+b*AD+c*ir(mittel)1,3\ddot{U}_D + d*T_M + f*BA + g*AW)}}$$

Formel 33: Modell zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit.

wobei:

$p(\ddot{U})$ = Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung [-]

AD = Astdurchmesser [mm]

$ir(mittel)1,3\ddot{U}_D$ = mittlerer jährlicher Radialzuwachs während der (bisherigen) Überwallungszeit [mm]

T_M = Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis

BA = Baumart (0= Buche; 1= Eiche) [-]

AW = Astansatzwinkel [°]

a,b,c,d,f,g = empirische Koeffizienten

Der Astansatzwinkel besaß zwar signifikanten Einfluss auf die Überwallungswahrscheinlichkeit, jedoch erwies sich das Vorzeichen als instabil, weswegen diese Variable wieder aus der Analyse ausgeschlossen wurde.

Somit lautet die Regressionsgleichung unter Ausschluss der Variable Astansatzwinkel:

$$p(\ddot{U}) = \frac{1}{1 + e^{-(a+b*AD+c*ir(mittel)1,3\ddot{U}_D + d*T_M + f*BA)}}$$

Formel 34: Modifiziertes Modell zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit.

Es gelten die oben genannten Variablenbezeichnungen.

Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Totäste [N]	715				
Davon nicht überwallte Äste [N]	445				
Davon überwallte Äste [N]	270				
Astdurchmesser [mm]	715	2,0	71,8	21,3	10,01
mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der (bisherigen) Überwallungszeit [mm]	715	0,28	6,51	2,69	1,13
Jahre seit Mortalitätsereignis [N]	715	1	35	8,1	6,09
Bäume [N]	112				
Davon Buchen [N]	59				
Davon Eichen [N]	53				

Tabelle 38: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit.

Variable	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	Wald-Statistik	Variance Inflation Factor	Signifikanz
(Konstante)	-4,509	0,588	58,71		***
Astdurchmesser [mm]	-0,109	0,017	39,45	1,059	***
Jahre seit Mortalitätsereignis [N]	0,572	0,046	155,14	1,091	***
mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der (bisherigen) Überwallungszeit [mm]	0,759	0,157	23,39	1,330	***
Baumart [kodierte: 0=Buche; 1=Eiche]	-0,933	0,332	7,92	1,349	**

N=715
-2LL= 358,6; r ² CS=.561; r ² N =.764
Trennwert=0,29; AUC= 0,961; Sensitivität= 92,6; Spezifität= 85,6
<i>Signifikanz Codes: *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001, ns= nicht signifikant</i>

Tabelle 39: Ergebnisse des binären logistischen Regressionsmodells zur Abschätzung der Astüberwallungswahrscheinlichkeit nach Formel 34.

Die Prüfung der gesamten Modellanpassung erfolgte unter anderem durch den Hosmer – Lemeshow - Anpassungstest (HL - Test). Das ermittelte Testergebnis $\chi^2(8) = 12,348$, $p > 0,05$ gibt an, dass das parametrisierte Modell den empirischen Daten adäquat angepasst ist. Zusätzlich liefern die deskriptiven Maße der Pseudo - R^2 nach Cox und Snell sowie nach Nagelkerke (vgl. Kapitel 2.12.2.3 sowie SCHENDERA (2008)) einen Hinweis darauf, dass der durch das Modell erklärte Varianzanteil vergleichsweise hoch liegt. Der Anteil der durch das Modell korrekt vorhergesagten Gruppenzugehörigkeiten liegt bei 88,3%. Die Spezifität, welche das Maß der korrekt vorhergesagten negativen Gruppenzugehörigkeiten ausdrückt, liegt bei 85,6%. Weiterhin werden 92,6% der überwallten Äste vom Modell korrekt prognostiziert (Sensitivität). Mittels einer Trennwertanalyse nach der von HEIN & WEISKITTEL (2010) vorgeschlagenen Vorgehensweise wurde ein Trennwert von 0,29 ermittelt. Die AUC nimmt für das vorliegende Modell einen Wert von 0,961 an. Bei der Überprüfung auf Multikollinearität konnte kein Hinweis auf starke lineare Abhängigkeiten der Regressoren festgestellt werden (VIF- Werte < 10).

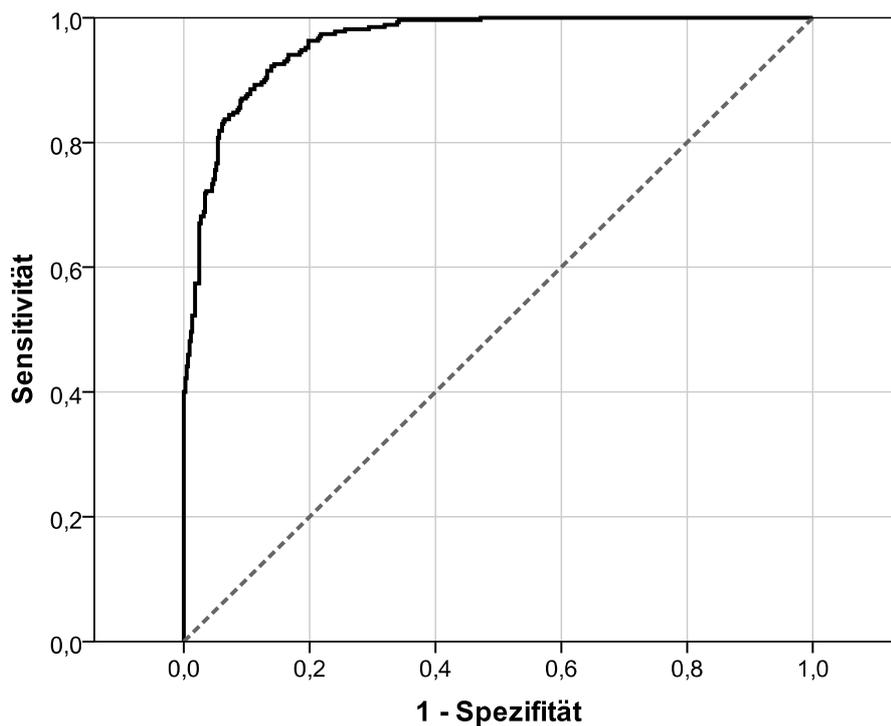


Abbildung 38: ROC- Kurve für das Modell zur Prognose der Astüberwallung, AUC= 0,961.

Positive Koeffizienten bedeuten bei Zunahme der Prädiktorwerte eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Ereignisses, in diesem Fall der Überwallung, während negative Koeffizienten bei

Zunahme der Prädiktorwerte eine abnehmende Wahrscheinlichkeit des Eintreffens dieses Ereignisses anzeigen.

Der Parameterschätzer für die Variable „Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis“ ist positiv gerichtet und besagt somit, dass die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung mit zunehmender Zeit seit dem Absterben des Astes ansteigt. Dieses Ergebnis bezieht sich auf den fortschreitenden Zersetzungsprozess des toten Astmaterials und ist somit biologisch plausibel.

Das Modell zur Prognose der Astüberwallungsdauer (siehe Kapitel 4.3.2.1) sagt aus, dass die Überwallungszeit unter sonst gleichen Voraussetzungen mit zunehmendem Astdurchmesser zu- und mit zunehmendem mittlerem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit abnimmt. Das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung gibt an, dass die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung unter gleichen Voraussetzungen mit zunehmendem Astdurchmesser sinkt und sich mit zunehmendem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs während der (bisherigen) Überwallungszeit erhöht. Beide Modelle sind somit in ihrer Aussage konsistent. Biologische Plausibilität ist gegeben.

4.3.2.2.1 EINFLUSS DER BAUMART

Des Weiteren besitzt die Variable „Baumart“ einen signifikanten Einfluss auf die Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit. Da die Baumart Buche mit 0 kodiert wurde, entfällt hier bei Berechnung der Astüberwallungswahrscheinlichkeit der mindernde Einfluss der Variable „Baumart“, die anhand der Regressionsgleichung errechneten Werte fallen somit für die Buche größer aus als für die Baumart Eiche und resultieren so in einer höheren Astüberwallungswahrscheinlichkeit unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen.

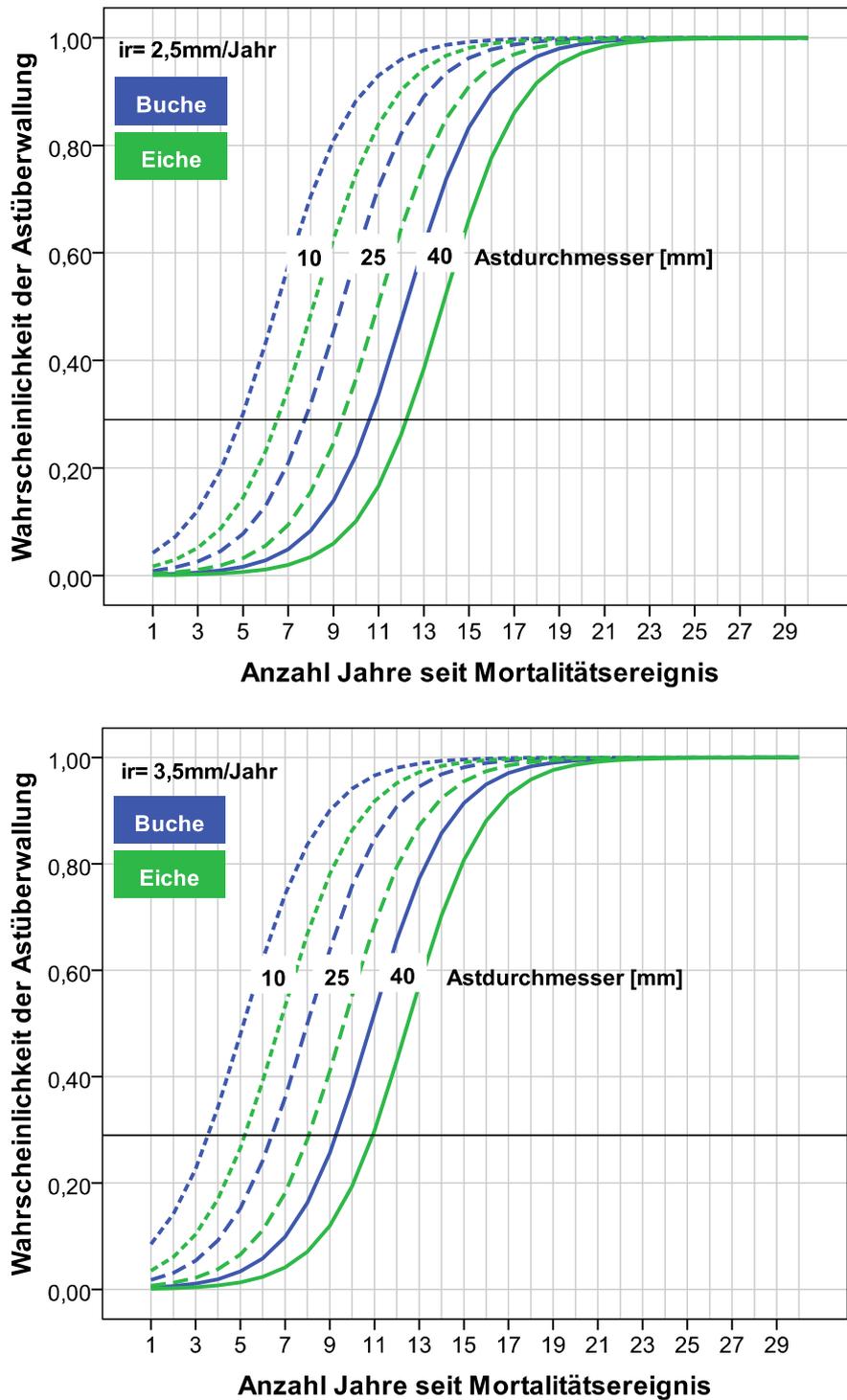


Abbildung 39: Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung in Abhängigkeit der Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis des Astes für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem Astdurchmesser von 10, 25 und 40mm und einem mittleren jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe von 2,5mm (oben) bzw. 3,5mm (unten) während der bisherigen Überwallungszeit. Der Trennwert liegt bei 0,29 (horizontale Linie).

4.3.2.3 RADIUS DES ASTHALTIGEN KERNS

Aus waldbaulichen aber insbesondere holzverwertungstechnischen Gesichtspunkten ist die Schätzung des Radius des asthaltigen Kerns innerhalb des Holzkörpers von großer Bedeutung. In Anlehnung an Untersuchungen von HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) wurde der Astdurchmesser des überwallten Astes, der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des überwallten Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und dem letzten lebenden Jahr des betreffenden Astes, sowie der Astansatzwinkel als mögliche Einflussvariablen auf den Radius des asthaltigen Kerns identifiziert. Da der lebendasthaltige Teil des asthaltigen Kerns davon abhängt, über welchen Zeitraum der betreffende Ast als lebender Ast von dem ihn umgebenden Holz umschossen wird, wurde des Weiteren überprüft, inwiefern das Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens den Radius des asthaltigen Kerns beeinflussen kann. Da sich die Variable Astansatzwinkel im Modell der Baumart Buche nur noch als zu einem knappen Prozent zur Verringerung der Gesamtstreuung beitragend erwies, wurde deren Beitrag zum Gesamtmodell mit Hilfe des AIC- Kriteriums untersucht.

Baumart	Modellvariablen	K	RSS	N	AIC
<i>Buche</i>	AD, $ir_{(mittel)_{leb}}$, $Alter_{Ast}$	5	55,76	117	-76,15
	AD, $ir_{(mittel)_{leb}}$, $Alter_{Ast}$, AW	6	53,42	117	-78,94

Tabelle 40: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Modell zur Prognose des asthaltigen Kerns der Baumart Buche.

Aufgrund der Ergebnisse der AIC- Auswertung wurde der Astansatzwinkel als weitere maßgeblich zur Erklärung der Streuung des Radius des asthaltigen Kerns beitragende Variable bei der Baumart Buche gewählt.

Die Regressionsgleichung stellt sich somit wie folgt dar:

$$R_{aK} = a + b * AD + c * ir_{(mittel)_{leb}} + d * AW + e * Alter_{Ast}$$

Formel 35: Modell zur Prognose des Radius' des asthaltigen Kerns.

wobei:

R_{aK} = Radius des asthaltigen Kerns [cm]

AD = Astdurchmesser (ohne Rinde) [mm]

$ir(mittel)_{leb}$ = mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr des betreffenden Astes [mm]

AW = Astansatzwinkel in Bezug auf die Vertikale [°]

$Alter_{Ast}$ = Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens [Jahre]

a,b,c,d,e = empirische Koeffizienten

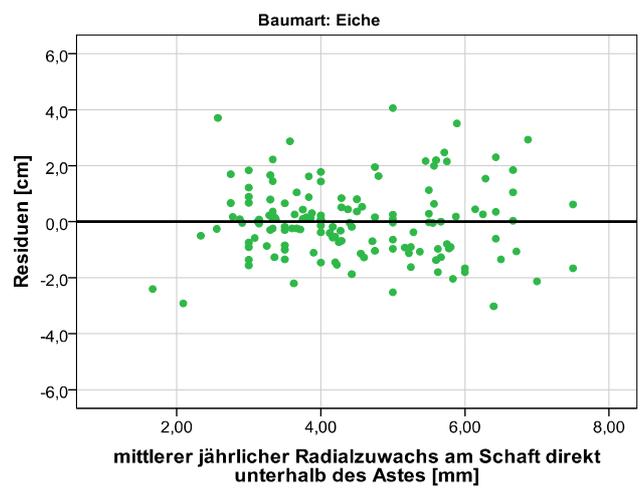
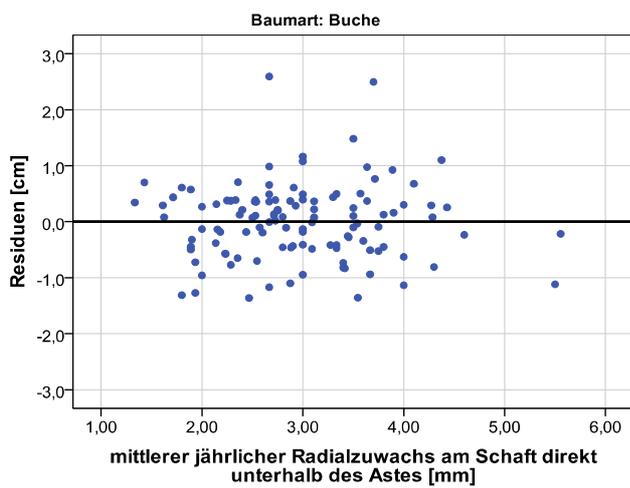
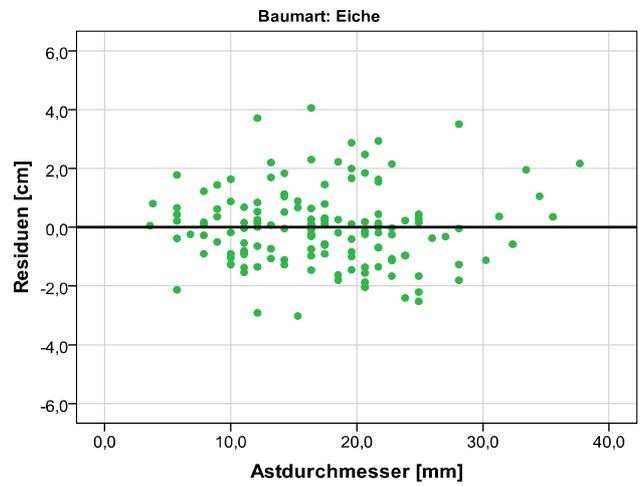
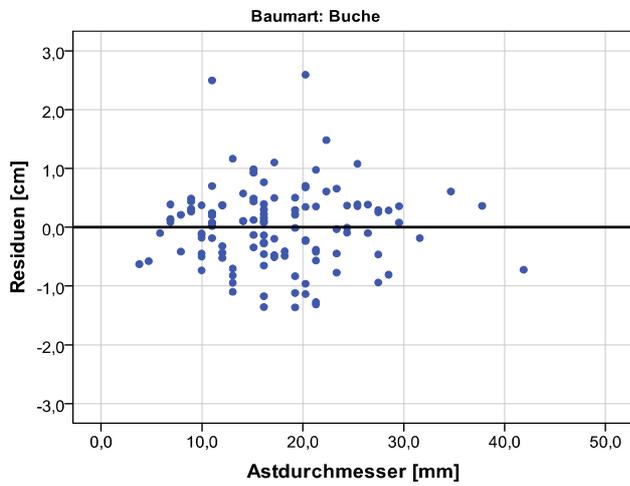
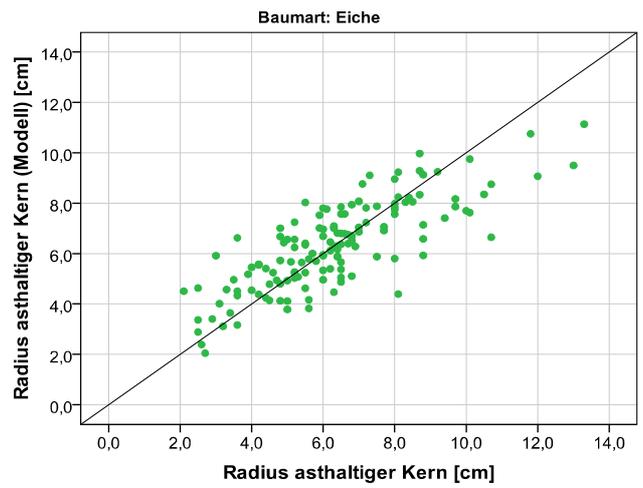
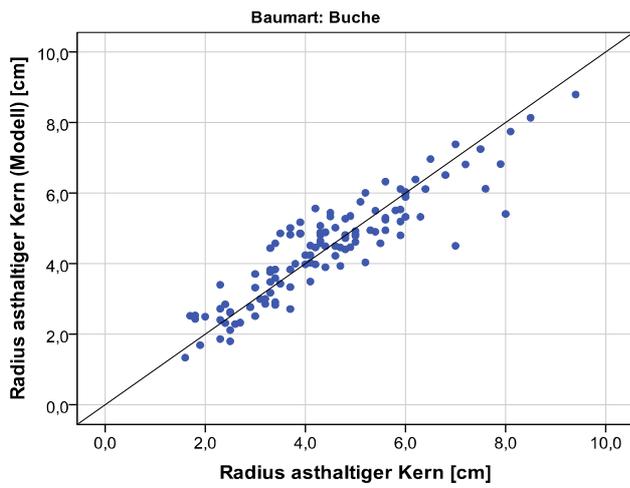
Baumart	Variable	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
<i>Buche</i>	Radius des asthaltigen Kerns [cm]	117	1,6	9,4	4,43	1,6
	Astdurchmesser [mm]	117	3,8	41,9	17,35	7,06
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr [mm]	117	1,33	5,56	2,96	0,79
	Astansatzwinkel [°]	117	13	75	41,43	13,69
	Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens [Jahre]	117	4	22	10,63	3,83
<i>Eiche</i>	Radius des asthaltigen Kerns [cm]	142	2,1	13,3	6,33	2,16
	Astdurchmesser [mm]	142	3,6	37,7	17,25	6,59
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr [mm]	142	1,67	7,5	4,44	1,24
	Astansatzwinkel [°]	142	15	90	50,56	14,84
	Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens [Jahre]	142	2	14	7,00	2,13

Tabelle 41: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung des Radius' des asthaltigen Kerns.

Baumart	Variable	Parameter- schätzer	Standardfehler des Schätzers	partiell ^{es} r ²	Variance Inflation Factor	Signifikanz	
<i>Buche</i>	(Konstante)	-2,638	0,426			***	
	Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens [Jahre]	0,296	0,024	0,558	1,994	***	
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr [mm]	0,785	0,091	0,214	1,261	***	
	Astdurchmesser [mm]	0,066	0,012	0,041	1,879	***	
	Astansatzwinkel [°]	0,011	0,005	0,008	1,103	*	
<i>Eiche</i>	(Konstante)	-2,098	0,627			**	
	Astalter zum Zeitpunkt des Absterbens [Jahre]	0,470	0,063	0,067	1,462	***	
	mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr [mm]	0,739	0,100	0,145	1,242	***	
	Astdurchmesser [mm]	0,107	0,200	0,423	1,477	***	
	Astansatzwinkel [°]	<i>ns</i>					
<i>Buche</i>	N=117						
	r ² =0,820; r ² adj=0,814						
	Nicht standardisierte Residuen: 53,426 mit 112 FG						
<i>Eiche</i>	N=142						
	r ² =0,634; r ² adj=0,626						
	Nicht standardisierte Residuen: 242,3 mit 138 FG						

Signifikanz Codes: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, *ns* = nicht signifikant

Tabelle 42: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Radius' des asthaltigen Kerns nach Formel 35.



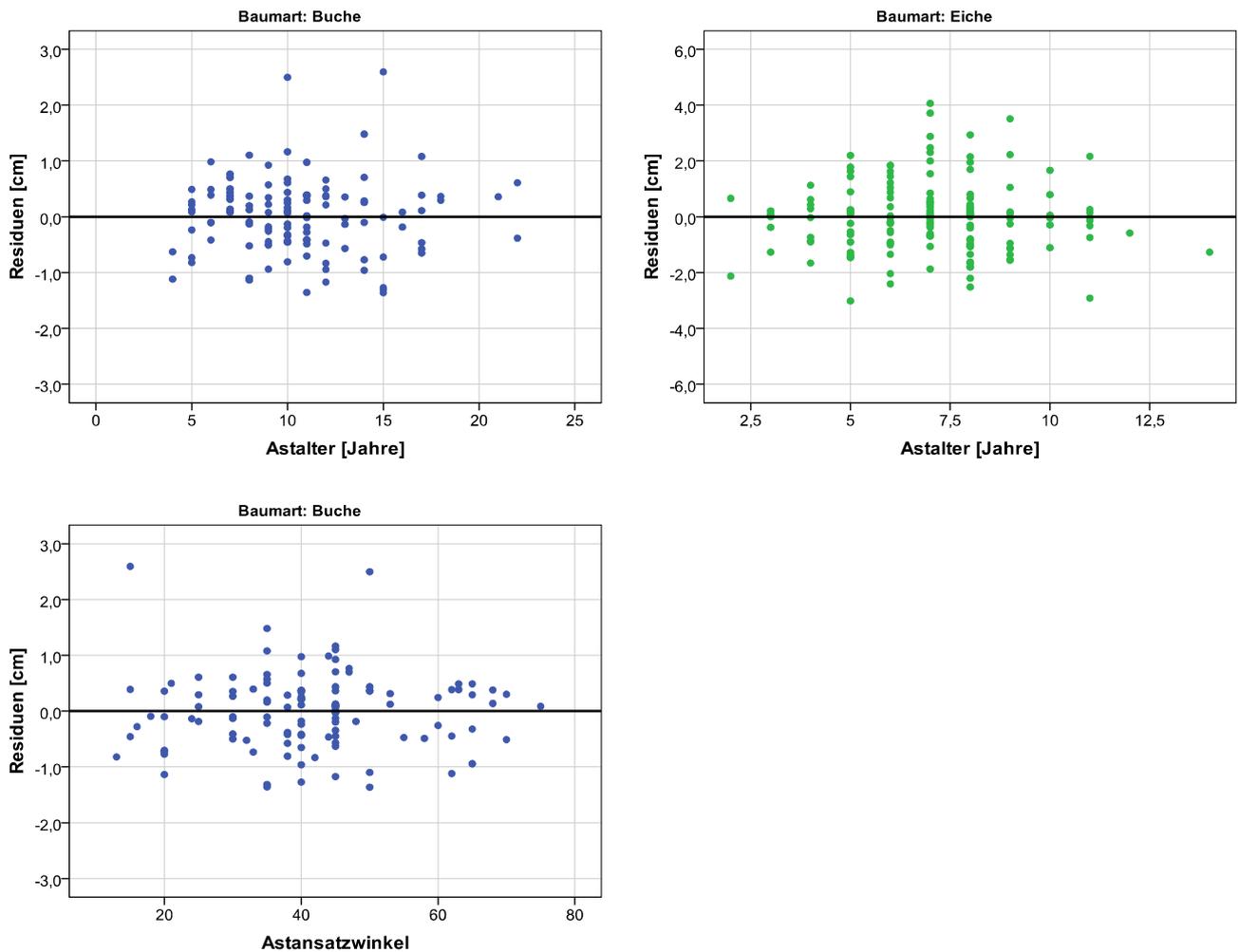


Abbildung 40: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werte in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).

Die Residuen der Modelle beider Baumarten streuen normalverteilt und tendenzfrei, wobei eine geringere Streuung der Störterme bei der Baumart Buche auffällt. Bis auf wenige Ausreißer schätzt das multiple lineare Regressionsmodell den Radius des asthaltigen Kerns mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\text{cm}$ (Buche) bzw. $\pm 2,5\text{cm}$ (Eiche). Die berechneten VIF - Werte weisen nicht auf problematische Multikollinearität hin (VIF - Werte < 10). Auf Grundlage der Tabellenwerke nach SAVIN & WHITE (1977) kann für Buche Autokorrelation ausgeschlossen werden (Durbin – Watson - Statistik: 2,276); die Durbin - Watson - Statistik für das Regressionsmodell der Baumart Eiche liegt mit einer Durbin – Watson - Statistik von 1,606 innerhalb des Indifferenzbereichs.

Auffällig ist der unterschiedliche Einfluss des Astdurchmessers bzw. des Astalters in den Regressionsgleichungen beider Baumarten. Während die Variable Astdurchmesser bei der Baumart

Eiche mit 42,3% den größten Anteil an der Gesamtstreuung des Radius des asthaltigen Kerns erklärt, steuert sie in der Regressionsgleichung für die Baumart Buche nur noch zu 4,1% zur Erklärung der Gesamtstreuung bei. Demgegenüber kann die Variable Astalter in der Regressionsgleichung der Baumart Buche knappe 56% der Gesamtstreuung erklären, wohingegen diese Variable in der Regressionsgleichung für die Baumart Eiche nur noch zu knappen 7% zur Erklärung der Gesamtstreuung beiträgt. Mit einem partiellen r^2 von 0,214 steuert die Variable „mittlerer jährlicher Radialzuwachs“ in der Regressionsgleichung der Baumart Buche mehr zur Klärung der Gesamtstreuung bei als in der Regressionsgleichung der Baumart Eiche (partiell $r^2 = 0,145$). Der Astansatzwinkel trug nur in der Regressionsgleichung der Baumart Buche signifikant mit einem knappen Prozent (0,8%) zur Klärung der Gesamtstreuung bei.

Das Modell schätzt unter Annahme gleicher Voraussetzungen:

- Einen größeren Radius des asthaltigen Kerns mit zunehmendem Astalter um Zeitpunkt des Absterbens. Mit jedem zusätzlichen Astlebensjahr schätzt das erstellte Modell eine Vergrößerung des asthaltigen Radius um etwa 0,3 Zentimeter (Buche) bzw. knappen 0,5 Zentimetern (Eiche) ausschließlich aufgrund des zunehmenden Einwachsens des lebenden Astes in den ihn umschließenden Holzkörper unabhängig vom jeweiligen Radialzuwachs des Schaftes.
- Einen größeren asthaltigen Radius mit zunehmendem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs des Schaftes. Mit erhöhtem Radialzuwachs während der Lebenszeit des Astes verwächst eine zunehmende Distanz des Grünastes mit dem ihn umgebenden Holzkörper. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Zusammenhänge ist dieses Ergebnis biologisch plausibel.
- Einen größeren asthaltigen Radius mit zunehmendem Astdurchmesser. Da durch die Variable Astalter und die Variable „durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs“ die funktionalen Beziehungen während der Lebenszeit des Astes schon abgedeckt sind, muss sich das Ergebnis auf den totasthaltigen Teil des asthaltigen Kerns beziehen. Dies konnte mit Hilfe zweier separat durchgeführter Regressionsanalysen bewiesen werden. Während sich der Astdurchmesser bei keiner der beiden Baumarten als signifikant zur Erklärung der Streuung des Radius‘ des lebendasthaltigen Kerns beiträgend erwies, konnte dieselbe Variable den größten Anteil der Streuung des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns erklären. Dieses Resultat steht im Einklang mit den Ergebnissen von z.B. HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) oder HEIN (2008) und ist für die Baumart Eiche auch vor dem Hintergrund der Ergebnisse zur

Untersuchung der Verkernungs- und Holzzersetzungsprozesse in Abhängigkeit des Astdurchmessers von BUTIN & KOWALSKI (1983a) als biologisch plausibel zu beurteilen.

- Einen größeren Radius des asthaltigen Kerns mit zunehmendem und somit flacher verlaufendem Astansatzwinkel bei der Baumart Buche. Dies ist des Weiteren ein funktionaler Zusammenhang, der vor dem Hintergrund trigonometrischer Zusammenhänge plausibel scheint.

4.3.2.3.1 EINFLUSS DER BAUMART

Abgesehen vom unterschiedlichen Einfluss der Variable Astansatzwinkel auf den Radius des asthaltigen Kerns ergab sich im Baumartenvergleich eine signifikante Interaktion der Variable Baumart mit der Variable Astdurchmesser. Unter sonst gleichen Voraussetzungen besitzt die Baumart Eiche bei gleichem Astdurchmesser einen signifikant größeren Radius asthaltigen Holzes. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.2.7.10 erläuterten unterschiedlichen Holzzersetzungseigenschaften beider Baumarten und den im Rahmen der Modelle zur Schätzung der Astüberwallungsdauer und der Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung erzielten Ergebnissen ist dies vor allem als Hinweis auf langsamer ablaufende Zersetzungsprozesse toten Astmaterials bei der Baumart Eiche zu verstehen. So besitzt die Baumart Eiche ausweislich des erstellten Modells bei einem Astdurchmesser von 40 Millimetern und einem Astalter von 10 Jahren für ein Radialzuwachsszenario von durchschnittlichen jährlichen 2,5mm mit 4,87cm einen um etwa 1,8 Zentimeter größeren asthaltigen Kern als die Baumart Buche (Vgl. Abbildung 41), wobei sich der Unterschied zwischen beiden Baumarten mit zunehmendem Astalter und bei kontinuierlicher Jahrringbildung somit auch zunehmendem Astdurchmesser weiter vergrößert.

4.3.2.3.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS

Wird der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs des Schaftes um einen Millimeter erhöht, so vergrößert sich der Radius des asthaltigen Kerns bei der Baumart Buche um 0,78 Zentimeter, bei der Baumart Eiche um etwa 0,73 Zentimeter (Vgl. Abbildung 41). Dabei besitzt der Radius des asthaltigen Kerns für die Baumart Eiche aufgrund von Verkernungsprozessen und deren Auswirkungen auf die Holzzersetzung unter sonst gleichen Bedingungen tendenziell größere Ausmaße.

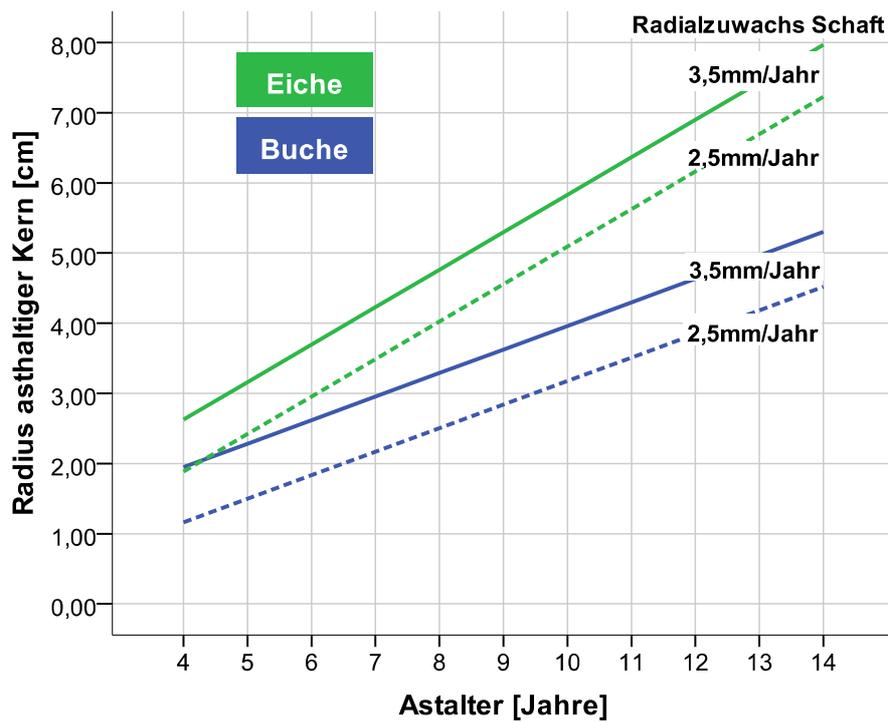


Abbildung 41: Modellierter Radius des asphaltigen Kerns in Abhängigkeit des Astalters zum Zeitpunkt des Absterbens bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs des Schaftes während der Lebenszeit des Astes von 2,5 und 3,5 Millimetern von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur). Es wurde ein durchschnittlicher jährlicher Astradialzuwachs von 2mm und bei der Buche ein Astansatzwinkel von 45° angenommen.

5 DISKUSSION

Die vorangegangenen Abschnitte umfassen die Darstellung von Material und Methodik der vorliegenden Arbeit sowie die Ergebnisse zur Baumgestalt und Astarchitektur, zur Astmortalität sowie zur Astüberwallung und inneren Ästigkeit. Der Aufbau der Diskussion folgt dem bisher verwendeten Gliederungssystem. Dabei sollen zunächst sowohl die in dieser Arbeit verwendeten Methoden sowie das den Untersuchungen zugrunde liegende Material kritisch beleuchtet werden. Der dritte, zentrale Abschnitt der Diskussion ist der Erörterung der vorgestellten Ergebnisse gewidmet.

5.1 DISKUSSION DER METHODIK

Um die Astreinigungphase in gleichmäßiger Weise abzudecken, erwies sich die Auswahl der unterschiedlichen Entwicklungsstufen als zweckmäßig. Zusätzlich wurden durch diese Vorgehensweise prinzipiell auch direkte Vergleiche zwischen den beiden Baumarten einer Entwicklungsstufe möglich gemacht.

In jedem Untersuchungsbestand wurden jeweils 5 Bäume der Kraft'schen Klassen 1 bis 4 untersucht. Mit diesem Vorgehen konnte eine angemessene Spreitung unterschiedlich möglicher Radialzuwachsszenarien von Buchen und Eichen erreicht werden. Die verwendeten Feld- und Labormethoden orientierten sich weitestgehend an bisherigen bewährten Verfahren, wie sie zum Beispiel von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) vor allem bezüglich der Kronenablotung aber auch der Baum- und Kronenansatzhöhenmessungen sowie der Aufnahme des untersten lebenden Totastes verwendet wurden. Obgleich alle Aufnahmen mit größter Sorgfalt durchgeführt wurden, muss allerdings insbesondere bei der Kronenablotung mit personenspezifischen Verzerrungen der Messwerte gerechnet werden (vgl. LANGSHAUSEN (2009)). Die Tatsache, dass alle Feldaufnahmen in unbelaubtem Zustand stattfanden, erleichterte indes die Identifizierung des jeweiligen Kronenrandes.

Die Methodik der Astmessungen orientierte sich zum Teil am Vorgehen von NUTTO (1999), HEIN (2004) oder LANGSHAUSEN (2009) sowie an den Methoden, welche von MÄKINEN (2002) mit Erfolg angewandt wurden.

Wie auch schon von HEIN (2004) bemerkt, muss bei den Messungen der Astansatzwinkel am liegenden Baum mit gewissen Abweichungen zu den Astansatzwinkeln des stehenden Baumes gerechnet werden.

Da Äste am stehenden Baum durch ihr Eigengewicht nach unten gezogen werden, sind hier etwas größere Astansatzwinkel zu erwarten (vgl. HEIN (2004)).

Da sich die Baumart Eiche hinsichtlich des Radialzuwachses als um einiges wüchsiger als die Baumart Buche erwies, musste sich der direkte Vergleich der Baumarten hinsichtlich ihres Modellverhaltens auf den Überschneidungsbereich der Radialzuwachsszenarien von 2,5mm und 3,5mm beschränken. Dabei muss jedoch dezidiert betont werden, dass sich diese zwei Radialzuwachsszenarien für die Baumart Buche im mittleren bis oberen Bereich der im aufgenommenen Material enthaltenen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachsgänge befinden, während sie für die Baumart Eiche lediglich den unteren und mittleren Bereich der untersuchten durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachsszenarien repräsentieren. Weiterhin muss betont werden, dass auch bei gleichem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs nicht selbstverständlich von einer vergleichbaren Beschattungs- oder Konkurrenzsituation der beiden Baumarten ausgegangen werden kann.

Die Auswertung der empirischen Daten erfolgte mit Hilfe multipler linearer, nicht linearer oder binärer logistischer Regressionen. Aufgrund der hierarchischen Datenstruktur der empirischen Daten (Äste geschachtelt in Bäumen, Bäume geschachtelt in Beständen (vgl. HEIN (2007))) wäre der Einsatz multipler linearer gemischter Modelle mit den selektierten Regressoren als festen Effekten und normalverteilten zufälligen Effekten auf Bestandes-, Baum- und Astebene ebenso möglich gewesen. Die genannten Effekte spielen dabei eine unterschiedliche Rolle bei der Interpretation der Modelle: während die festen Effekte Anteile der Gesamtstreuung erklären, gliedern die zufälligen Effekte die nicht erklärte Reststreuung auf die ausgeschiedenen hierarchischen Ebenen auf (ROBINSON (2010)). Unter Umständen kann so zusätzliche Information gewonnen werden; zusätzliche Anteile der Gesamtstreuung können durch den Einsatz zufälliger Effekte jedoch nicht erklärt werden (ebenda). Da die vorliegende Arbeit jedoch zum Ziel hatte, baumartenspezifische Modelle zu erstellen, um relevante Einflussvariablen auf Baumgestalt und Astarchitektur, Astmortalitätsprozess und Astüberwallung und innere Ästigkeit zu identifizieren, welche hernach kontrastiert werden sollten, wurde auf den Einsatz dieses Modelltypus zugunsten von möglichst einfachen und leicht zu interpretierenden multiplen und größtenteils linearen Modellen verzichtet.

5.2 DISKUSSION DES MATERIALS

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Material wurde ausschließlich in Baden – Württemberg und hier vor allem mit Schwerpunkt auf an den Oberrhein angrenzende Gebiete gewonnen. Da die Bestände bestimmte Voraussetzungen bezüglich des Baumalters, der Baumhöhe und der Standortbonität erfüllen mussten, gestaltete sich die Suche und Auswahl geeigneter Flächen als zeitintensiv. Die räumliche Verteilung der ausgewählten Bestände richtete sich somit primär nach der jeweiligen Verfügbarkeit geeigneter Flächen.

Das den Analysen zugrunde liegende Material wurde von Standorten entnommen, welche eine Bonität von mindestens $dGz_{100} = 7$ Vfm/a/ha aufwiesen und besitzt daher eingeschränkte Repräsentativität. Besonders hinsichtlich der zeitintensiven Astmessungen wurde darauf verzichtet, Bestände schlechterer Standortsgütern in die Untersuchungen mit einzubeziehen.

Die Bestandesauswahl erforderte größtmögliche Sorgfalt. Gepflanzte Bestände wurden aufgrund des exakt bestimmbar Bestandesalters, welches durch das in den Einrichtungswerken vermerkte Pflanzjahr in Erfahrung gebracht werden konnte, bei der Auswahl präferiert. Durch die traditionell unterschiedlichen Naturverjüngungsverfahren bei Buche und Eiche (vgl. BURSCHEL & HUSS (1997)) musste bei der Bestandesauswahl in Kauf genommen werden, dass zwar alle untersuchten Eichenbestände ausschließlich aus Pflanzungen hervorgingen, für die Baumart Buche indes lediglich 4 Bestände untersucht werden konnten, die eindeutig gepflanzt wurden. Alle restlichen untersuchten Buchenbestände stammen aus Naturverjüngung, welche herkömmlicherweise über Schirm – oder Femelhiebe mit eher langsamer Räumung (vgl. BURSCHEL & HUSS (1997)) herbeigeführt wird. Überschirmungssituationen über gewisse Zeiträume sind daher keine Seltenheit für naturverjüngte Buchen. Dennoch wurde größte Sorgfalt darauf verwendet, nicht - überschirmte Exemplare für die Untersuchung auszuwählen. So wurde etwa eine bestandesweise Altersspreitung von maximal 10 Jahren festgelegt (vgl. Kapitel 2.2.2), welche aus den Forsteinrichtungswerken entnommen wurde. Dennoch war es bei den Feldaufnahmen unmöglich, allein aufgrund der phänotypischen Charakteristik der älteren untersuchten Bäume eine zumindest zeitweise Überschirmung durch einen etwaigen Vorgängerbestand von vorn herein auszuschließen. Erst mit Hilfe der Radialzuwachsmessungen konnten Rückschlüsse über die „Biografie“ der Einzelbäume gezogen werden. Drei der untersuchten Buchen wiesen eine Vielzahl extrem enger Jahrringe im Schaftzentrum auf, so dass diese als mit hoher Wahrscheinlichkeit über längere Zeit überschirmte Exemplare identifiziert werden mussten. Gerade bei

der Modellierung des Höhenwachstums mit Hilfe der Variablen Baumalter auf Stockhöhe erwies sich dieser Umstand als problematisch, so dass hier schlussendlich das Alter_{1,3} als unabhängige Variable verwendet wurde. Bei der Baumauswahl wurde ferner versucht, weitere mögliche unerwünschte Einflüsse wie konkurrenzkräftige Mischbaumarten oder Bestandeslücken generell zu vermeiden. Im Zuge der Vorauswahl der Bestände wurde so ein jeweiliger Baumartenanteil von mindestens 80% festgelegt.

Die während der Feld- sowie der Laboraufnahmen erfassten Einzelbaum- und Einzelastmerkmale erwiesen sich als zur Beantwortung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen angemessen. Im Rahmen der Datenaufnahme wurde die Aufnahmeschwelle auf einen Zentimeter Astdurchmesser bei lebenden Ästen beziehungsweise einen Zentimeter Aststummellänge bei Totästen gesetzt, was die Aussagekraft der Einzelastbasierten Modelle auf Äste, welche die genannten Forderungen erfüllten, beschränkt. Aussagen, welche auf Grundlage der stichprobenartig entnommenen und während der Laborarbeiten weitergehend untersuchten toten und lebenden Äste gemacht werden konnten, beziehen sich aufgrund der Aufnahmemethodik auf die jeweils stärksten Äste jeder Metersektion.

Der hierarchische Aufbau der Thematik dieser Arbeit resultierte in einem sehr hohen Stichprobenumfang ($N > 4000$) auf Einzelastebene, jedoch nur in einem moderaten Stichprobenumfang auf Einzelbaumebene. Alle in dieser Arbeit enthaltenen Modelle beziehen sich daher nur auf eine Stichprobenanzahl von 69 Buchen und 74 Eichen der Kraft'schen Klassen 1 bis 4. Dies wurde vor allem bei der Modellierung des Höhenwachstums als problematisch identifiziert; bei der Modellierung der astfreien Schaftlänge wäre es von Vorteil gewesen, wenn zusätzlich noch Daten älterer Bestände aufgenommen worden wären. Jedoch wäre eine Erhöhung des Stichprobenumfangs aufgrund der aufwändigen Astmessungen während der Feldarbeit aber insbesondere wegen der sehr zeitintensiven Probenpräparationen und –Messungen in der vorgesehenen Zeit nicht realisierbar gewesen.

Da überwallte Totäste meist nur an Bäumen der ältesten Entwicklungsstufe vorgefunden wurden, empfiehlt es sich jedoch für künftige ähnliche Untersuchungen, den Stichprobenumfang für ältere Bäume zu erhöhen, um eine stabilere Datengrundlage für die Modellierung der Astüberwallungsdauer sowie des Radius' des asthaltigen Kerns zu erstellen.

Alle Aufnahmen wurden im Winter durchgeführt, was die einwandfreie Bestimmung der Eichengattung erschwerte. Zwar beschreibt ROLOFF (1993), dass sich Stiel- und Traubeneiche hinsichtlich ihrer

Kronenentwicklung sehr ähnlich sind. In zukünftigen ähnlichen Arbeiten würde jedoch eine Unterscheidung zwischen den beiden Eichengattungen, wie sie beispielsweise in den Arbeiten von SPIECKER (1991) oder NUTTO (1999) zu finden ist, möglicherweise zu wertvollen zusätzlichen Erkenntnissen führen.

Diese Arbeit zeichnet sich dadurch aus, Modelle zur Baumgestalt und Astarchitektur, Astmortalität und Astüberwallung sowie innerer Ästigkeit auf Einzelbaum – aber vor Allem auf Einzelastebene darzustellen. Da sich eine Untersuchung auf Einzelastebene aufgrund der Astmessungen am liegenden Baum und der anschließenden Probenentnahme, -präparation und -vermessung als zeitintensiv gestaltete, musste der Stichprobenumfang der entnommenen Bäume zugunsten des Stichprobenumfangs der untersuchten Äste möglichst gering gehalten werden. Obgleich dies zur Folge hatte, dass die Reststreuung bei manchen Modellen auf einem recht hohem Niveau lag, konnten die meisten der entwickelten Modelle Zusammenhänge in befriedigender bis guter Weise darstellen. An dieser Stelle sei nochmals auf die Arbeiten von SPIECKER (1991), NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) verwiesen, welche in erster Linie *einzelbaumbasierte* Wachstumsmodelle für Buche und Eiche auf einer breiten Datengrundlage entwickelten, die zur waldwirtschaftlichen Entscheidungshilfe herangezogen werden können, wohingegen die in dieser Arbeit entwickelten Wachstumsmodelle auf Einzelbaumebene eher orientierenden Charakter besitzen sollten. Im Rückblick kann das gewonnene Material als für die Fragestellungen dieser Arbeit generell geeignet beurteilt werden.

5.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

5.3.1 BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR

5.3.1.1 EINZELBAUMBEBENE

5.3.1.1.1 HÖHENWACHSTUM Die Höhenentwicklung beider Baumarten konnte mit dem von SLOBODA (1971) vorgeschlagenem Differenzialgleichungsmodell, welches auch von HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) zur Modellierung der Baumhöhe verwendet wurde, an die empirisch aufgenommenen Daten angepasst werden. Es ergab sich eine Prognosegenauigkeit von +/- 2 Metern für die im Rahmen der Stammscheibenanalyse retrospektiv ermittelten Daten, was in Anbetracht der Ergebnisse von HEIN (2004) jedoch nur eine mäßige Genauigkeit darstellt. Die berechneten sehr frühen Höhenzuwachskulminationen beider Baumarten müssen kritisch betrachtet werden.

Anhand des erstellten Höhenwachstumsmodells lassen sich die unterschiedlichen Höhenwachstumsdynamiken von Buche und Eiche in einem Altersrahmen von 14 bis 29 Jahren auf 1,3m Schafthöhe gut erkennen. Die Eiche als lichtbedürftige Baumart mit starker apikaler Kontrolle (WEINREICH (2000)) weist hier im selben Alter für die meisten der ausgeschiedenen Höhenbonitäten eine größere Baumhöhe als die schattentolerante Buche auf (vgl. z.B. SCHWAPPACH (1916), ASSMANN (1961), MARKS (1975), von LÜPKE (1987), KRAMER (1988), BURSCHEL & HUSS (1997)). Dieses Ergebnis steht ebenso im Einklang mit den Werten der vom MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993) veröffentlichten Ertragstafeln.

Abbildung 42 zeigt den direkten Vergleich der in den Ertragstafeln (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993)) tabellierten Werte mit denen des in dieser Arbeit erstellten Höhenwachstumsmodells. Die jeweiligen Bonitätsfächer wurden dabei der Übersichtlichkeit wegen zu einer Fläche zusammengefasst. Zunächst fallen die unterschiedlichen Niveaus der Bonitätsfächer der Ertragstafel und der Bonitätsfächer der in dieser Arbeit erstellten Höhenwachstumsmodelle auf. Ob diese Beobachtung jedoch auf eine in neuerer Zeit vor allem durch vermehrte Stickstoffeinträge verbesserte Standortsproduktivität im Sinne von UNTHEIM (1996), SPIECKER (1999), KAHLE et al. (2008) oder TOJIC (2010) zurückzuführen ist, oder insbesondere darin gründet, dass zur Erstellung des Höhenmodells in dieser Arbeit nur Wachstumsdaten weniger Bäume geringer Standorts- und Altersspreitung verwendet werden konnten, bleibt unklar. Überdies wurden in diese Untersuchung vergleichsweise sehr wüchsige Standorte ($dGz_{100} \geq 7$ Vfm/a/ha) mit einbezogen, was fernerhin zu beschriebenen Ergebnis führen kann.

Im Überschneidungsbereich liegen die Höhenwachstumskurven der jeweils besten Bonitäten etwa 3 (Buche) bis 4 (Eiche) Meter auseinander. Zusätzlich werden auch die unterschiedlichen Wachstumsverhältnisse sichtbar: so wird der Überschneidungsbereich der auf Grundlage der Ertragstafelwerte dargestellten Bonitätsfächer beider Baumarten mit zunehmendem Alter immer größer, während die Flächen der Bonitätsfächer der in dieser Arbeit erstellten Modelle mit zunehmendem Alter auseinander streben.

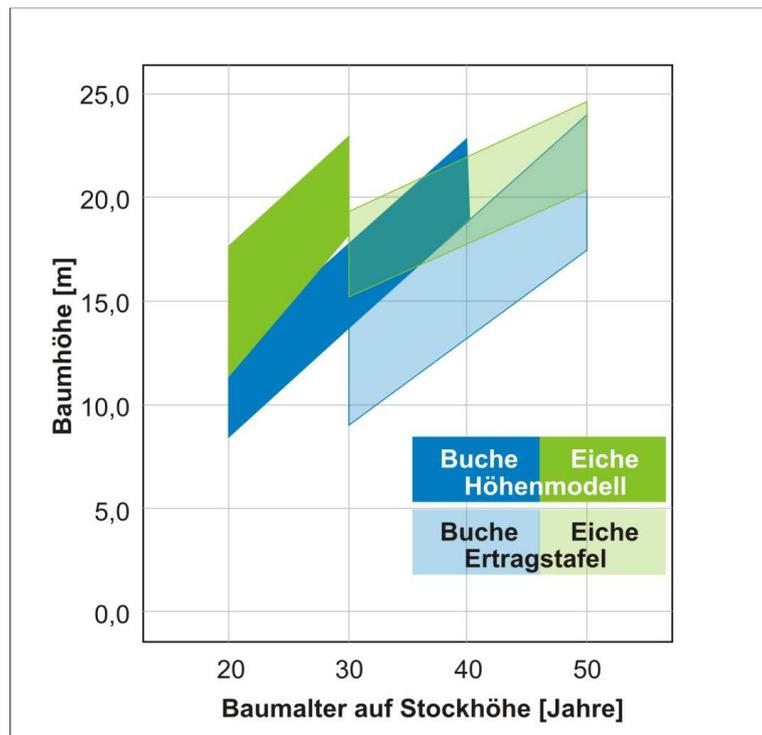


Abbildung 42: Alters- Höhenbeziehung für die vom Modell vorhergesagten Werte (dunkle Farbe) im Vergleich zu denen der Ertragstafeln (helle Farbe)³³. Die Bonitätsfächer der Ertragstafel ($dGz_{100}=7$ bis $dGz_{100}=9$ [Eiche] bzw. 10 [Buche]) sowie des in dieser Arbeit erstellten Höhenmodells ($SI_{10}=5\text{m}$ bis $SI_{10}=8,5\text{m}$ [Buche]; $SI_{10}=6\text{m}$ bis $SI_{10}=12\text{m}$ [Eiche]) sind als Fläche dargestellt.

Da keine tabellierte Alters- Höhenrelationen für den Großteil des in dieser Arbeit untersuchten Altersrahmens existieren, welche jedoch zur Veranschaulichung einiger Modellverhalten benötigt wurden, wurde das Höhenwachstumsmodell vor allem aus dieser Notwendigkeit heraus erstellt. Die an es gestellten Forderungen werden zwar erfüllt, jedoch ist es hinsichtlich des aufgezeigten Modellverhaltens (sehr frühe Höhenwachskulmination der Werte des Höhenmodells der Baumart Buche, leichtes Abflachen der Höhenkurve der Baumart Buche mit zunehmendem Alter) als auch der Datengrundlage was sowohl die Anzahl der untersuchten Bäume als auch die Standorts- und Altersspreitung anbelangt, verbesserungswürdig.

³³ Um einen Vergleich der in dieser Arbeit vorgestellten Wachstumsmodelle mit denen anderen Autoren durchführen zu können, muss zunächst eine Konsistenz der Variablen hergestellt werden. Um das in den meisten Modellen verwendete Baumalter auf Stockhöhe zu berechnen, musste die mittlere Differenz zwischen dem Alter auf Stock- und dem Alter auf 1,3m Schafthöhe dem Baumalter auf 1,3m Schafthöhe hinzuaddiert werden. Für die Baumart Buche ergab sich eine mittlere Differenz zwischen dem Baumalter auf 1,3m Schafthöhe und dem Baumalter auf Stockhöhe von 4, für die Baumart Eiche von 3 Jahren.

5.3.1.1.2 KRONENDURCHMESSER

Mit Hilfe eines multiplen linearen Modells lies sich in dieser Arbeit der Kronendurchmesser in Abhängigkeit des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe und des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe prognostizieren. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Resultaten von z.B. SPIECKER (1983), SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009). Den größten Einfluss auf den Kronendurchmesser zeigte dabei die Variable Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe, während das $Alter_{1,3}$ bei beiden Baumarten nur noch zu etwa 2% zur Verringerung der Gesamtstreuung beitrug; ein Befund, der in ähnlichem Ausmaß auch für die von HEIN (2004) aufgestellten Kronendurchmessermodelle für Esche und Bergahorn zutrifft. Wie schon von HEIN (2004) für Esche und Bergahorn herausgestellt, ist der Einfluss der Wachstumsgeschwindigkeit auf den Kronendurchmesser bei Buche und Eiche beträchtlich und kann bei einem Radialzuwachsszenario von 2,5mm gegenüber 3,5mm pro Jahr schon im Alter von 29 Jahren zu einem Kronendurchmesserunterschied von etwa 1,5m führen.

Abbildung 43 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den in dieser Arbeit erstellten Kronendurchmessermodellen und den Modellen, die von NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) für Eiche bzw. Buche parametrisiert wurden. Während sich das prognostizierte Kronendurchmesserwachstum für die Baumart Eiche recht gut mit dem von NUTTO (1999) erstellten Modell in Einklang bringen lässt, ergeben sich zunächst Diskrepanzen des Kronendurchmessers von bis zu einem Meter im Vergleich zwischen dem von LANGSHAUSEN (2009) und dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Kronendurchmessermodell. Nichts desto trotz kann konstatiert werden, dass sich auch im direkten Vergleich zwischen den Kronendurchmessermodellen von LANGSHAUSEN (2009) und NUTTO (1999) unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen die Eiche als die Baumart mit der geringeren Kronenbreite erweist.

Im Baumartenvergleich konnte ein signifikanter Einfluss der Interaktion zwischen der Dummy-kodierten Variablen Baumart und der Variable $Alter_{1,3}$ festgestellt werden. Damit unterscheidet sich der Parameterschätzer für die Variable $Alter_{1,3}$ signifikant zwischen den beiden Baumarten, wobei es sich unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen mindernd auf die Kronenbreite der Baumart Eiche auswirkt. Als möglicher Grund wurde ein Datenartefakt, resultierend aus dichtständigerer Erziehung der Eiche diskutiert. Da jedoch bei keiner der beiden Baumarten eine signifikante Korrelation zwischen

dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe und dem Baumalter gefunden werden konnte, wurde diese Erklärung verworfen.

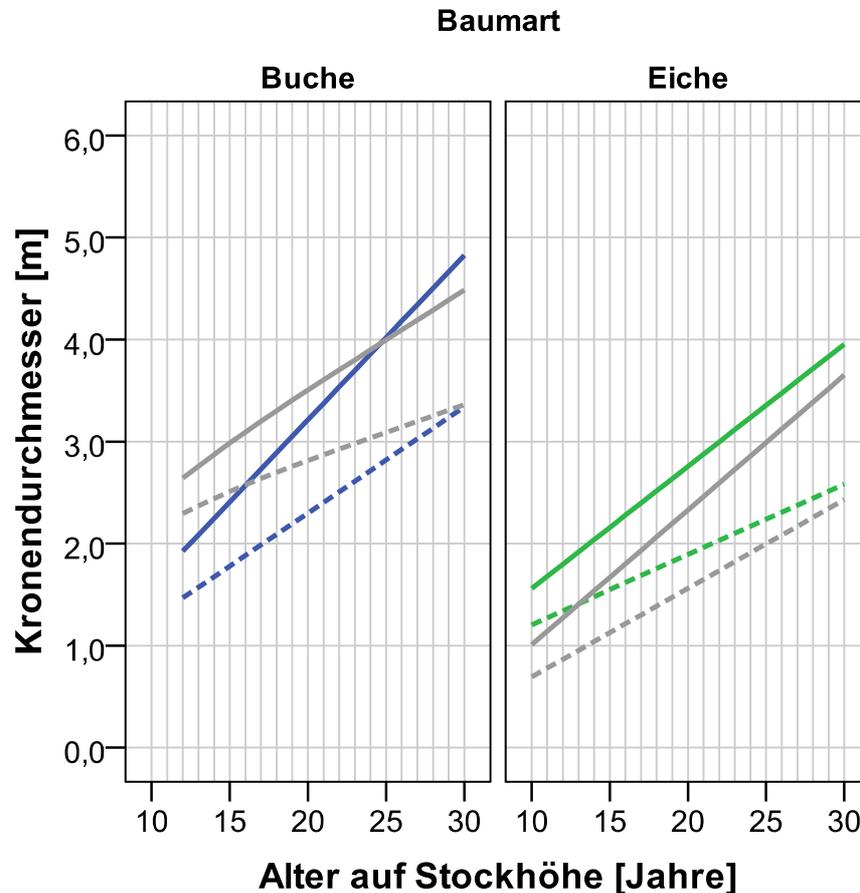


Abbildung 43: Darstellung des Kronendurchmessers in Abhängigkeit des Alters auf Stockhöhe von Buche und Eiche auf Grundlage des in dieser Arbeit erstellten Modells (Buche: blaue Signatur; Eiche: grüne Signatur) sowie auf Grundlage der von LANGSHAUSEN (2009) (Buche: graue Signatur) und NUTTO (1999) (Eiche: graue Signatur) erstellten Modelle für Radialzuwachsszenarien von 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linie) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linie). Für die Berechnung des Kronendurchmessers nach LANGSHAUSEN (2009) wurde eine Höhenbonität von $SI_{120}=35m$ (vgl. ebenda) angenommen.

Eine sensiblere Reaktion der Eichenkrone auf zunehmende seitliche Konkurrenz wurde als weitere Erklärung diskutiert. Diese Hypothese würde zum Beispiel durch die Ergebnisse von ROLOFF (2001) zur maximalen Lebensdauer von Kurztriebketten der Baumarten Buche und Eiche (vgl. Kapitel 1.2.7.5) gestützt werden. Auch die Untersuchungsergebnisse von CHEN et al. (1996), MESSIER et al. (1999), MOURELLE et al. (2001), BONOSI (2006) oder PETRIȚAN et al. (2009), wonach schattentolerante Baumarten eine äußerst ausgeprägte laterale Plastizität besitzen und damit die Fähigkeit, unter Konkurrenzdruck von einer vertikalen zu einer horizontalen Wuchsform zu wechseln, könnten diese

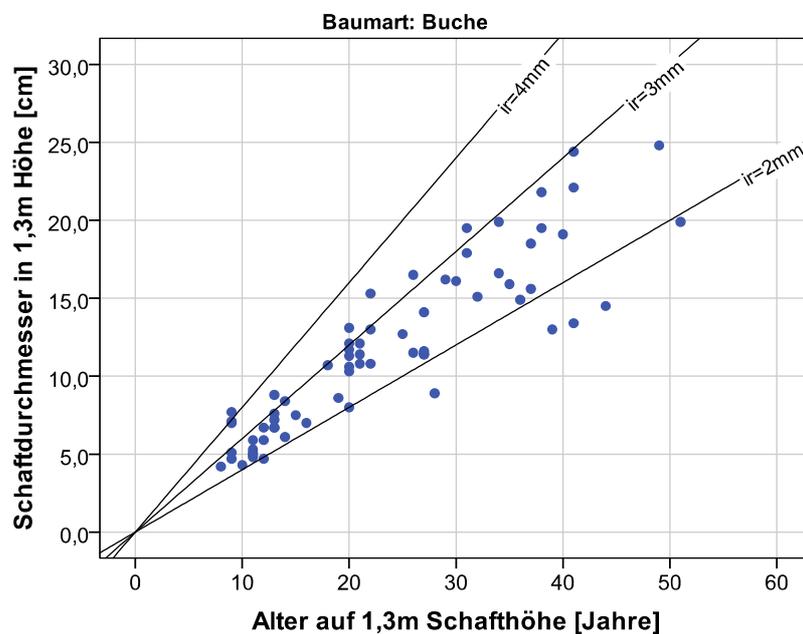
Hypothese stützen und zur Erklärung beitragen, weswegen das Baumalter als unabhängige Variable im Kronendurchmessermodell der Buche signifikant weniger mindernd auf den Kronendurchmesser einwirkt. Dieses Ergebnis wird auch durch die Resultate von BONOSI (2006) untermauert: hier erweist sich die in Relation zur Baumhöhe ausgedrückte Astlänge der Buche im Vergleich zu Esche bzw. Bergahorn desgleichen als höher. Nach BONOSI (2006) unterstreicht dies die Tendenz der Buche, durch eine Monolayer- Architektur (vgl. HORN (1976)) der Äste ein Minimum an Selbstbeschattung zu erreichen und damit die Lichtausnutzung im Schatten zu maximieren (vgl. LINNERT (2009)), wohingegen lichtbedürftigere Baumarten oft die Tendenz zeigen, schmalere Kronen auszubilden, um die Investitionskosten in blattragende Achsen einzusparen (AIBA & KOHYAMA (1997)). Die vergleichsweise höheren Investitionen in das laterale Wachstum der Buchenäste können nach BONOSI (2006) auch als Hinweis auf ihren sukzessionalen Status gewertet werden, wobei die Äste unter Einsatz minimaler „Kosten“ so positioniert werden, dass sie möglichst vollständig laterale Lücken im Kronenbereich ausfüllen und somit ihre Lichtabsorption optimieren. Die Tatsache, dass zumindest zeitweise Überschirmungssituationen der weitgehend naturverjüngten Buchenbestände durch den Vorgängerbestand nicht auszuschließen war, könnte dazu beigetragen haben, diesen baumartenspezifischen Unterschied noch stärker zu betonen.

Auf Grundlage der in dieser Arbeit erstellten Kronendurchmessermodelle und gestützt durch den zusätzlichen Vergleich der von NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) erstellten Kronendurchmessermodelle kann festgehalten werden, dass die beprobten Eichen unter gleichen Voraussetzungen einen etwas geringeren Kronendurchmesser als die im Rahmen dieser Arbeit vermessenen Buchen aufwiesen. Dieses Ergebnis führt zu folgenden Implikationen:

- Das Kronenausladungsverhältnis der Baumart Eiche ist *ceteris paribus* etwas geringer als das der Baumart Buche. In der Tat unterscheiden sich die Kronenausladungsverhältnisse beider Baumarten signifikant voneinander ($U = 2026,5$; $z = -2,127$; $p < 0,05$; $r = -0,177$). Dieses Ergebnis widerspricht jedoch den zum Beispiel von DAWKINS (1963) und später von HEMERY et al. (2005) postulierten Hypothesen, wonach schattentolerante Baumarten wie zum Beispiel die Buche im Vergleich zu lichtbedürftigen Baumarten bei gleichem Schaftdurchmesser einen geringeren Kronendurchmesser aufweisen. Auch die Ergebnisse von HEIN (2004), der ein größeres Ausladungsverhältnis der lichtbedürftigeren Esche im Vergleich zum eher schattentoleranten Bergahorn fand, widersprechen den vorliegenden Resultaten.

- Die Kroneneffizienz, welche gemäß der Definition von UHL et al. (2006) den durchschnittlichen jährlichen Grundflächenzuwachs in Quadratzentimetern pro Quadratmeter Kronenschirmfläche ausdrückt, liegt bei der Baumart Eiche auf einem höheren Niveau. So unterscheidet sich die Kroneneffizienz beider Baumarten über das gesamte Datenmaterial hinweg gesehen signifikant ($U = 1066,0$; $z = -6,007$; $p < 0,001$; $r = -0,5$). Dies entspricht den Ergebnissen von CHAPMAN & GOWER (1991), welche eine niedrigere Kroneneffizienz des schattentoleranten *Acer saccharum* im Vergleich zur intermediär lichtbedürftigen *Quercus rubra* feststellten und UHL et al. (2006), welche die Kroneneffizienz von solitären Buchen und Eichen kontrastierten und desgleichen eine größere Kroneneffizienz bei der lichtbedürftigen Baumart Eiche fanden. Demnach kann die Baumart Eiche mit gleicher Kronenbreite einen höheren durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe produzieren (siehe auch Abbildung 44.)

Ob sich dieses Ergebnis vor dem Hintergrund unterschiedlicher Bewirtschaftungsarten (Buche: naturverjüngt über längere Zeiträume, Überschirmung durch Altbestand nicht ausgeschlossen; Eiche: häufig Pflanzung auf Freiflächen) erklären lässt, oder tatsächlich artspezifische Unterschiede widerspiegelt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden.



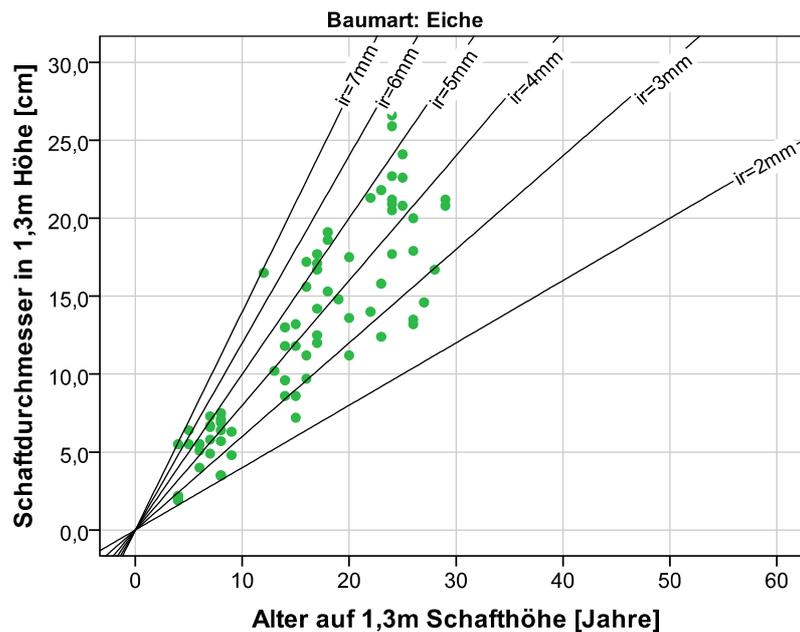


Abbildung 44: Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe in Abhängigkeit des Alters auf 1,3m Schafthöhe für Buche (oben, blaue Signatur) und Eiche (unten, grüne Signatur) aller empirisch aufgenommenen Bäume. Zur besseren Vergleichbarkeit sind verschiedene durchschnittliche jährliche Radialzuwächsgänge dargestellt.

5.3.1.1.3 ANZAHL LEBENDER ÄSTE

Die Anzahl lebender Äste konnte mit befriedigendem Resultat in Anlehnung an das von DORUSKA & BURKHART (1994) vorgeschlagene Modell für *Pinus taeda* über die Kronenlänge sowie den durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe geschätzt werden. Bei beiden Baumarten erklärt die Kronenlänge den größten Anteil der Gesamtstreuung (Buche: 50,7%; Eiche: 36%), der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs spielt hingegen nur noch eine kleine Rolle und erklärt weitere 3,5% (Buche) bzw. 6,9% (Eiche) der Gesamtstreuung. Beide Parameterschätzer sind dabei jeweils mit positivem Vorzeichen versehen. Auch von COLIN & HOULLIER (1992) konnte ein hoher Anteil unerklärter Reststreuung bei der Modellierung der jährlich gebildeten Anzahl an Ästen beobachtet werden. Dies wird vor allem durch klimatische Einflüsse erklärt, welche nicht nur über die Anzahl der jährlich gebildeten Knospen, sondern auch über das Ausmaß der Organogenese im folgenden Frühjahr bestimmt und die vom Modell nicht abgedeckt werden konnten (COLIN & HOULLIER (1992)). Auch im vorliegenden Fall kann ein Einfluss der klimatischen Verhältnisse auf die Anzahl der jährlich gebildeten Äste nicht ausgeschlossen werden.

Die für beide Baumarten erstellten Modelle schätzen eine Zunahme der Astanzahl mit zunehmendem durchschnittlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe. Zunächst wurde überprüft, ob diese

Beobachtung aus einer schnelleren Astreinigung von Bäumen mit niedrigerem durchschnittlichem Radialzuwachs resultiert. Jedoch konnte bei beiden Baumarten kein negativer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Totäste in der Krone und dem durchschnittlichen Radialzuwachs festgestellt werden. Da indes insbesondere bei der Baumart Buche während der Fällung viele nicht überwallte Totäste sehr leicht abbrechen, wird die tatsächlich vorhandene Anzahl nicht überwallter Totäste folglich unterschätzt. Die eingangs formulierte Hypothese konnte damit weder akzeptiert noch abgelehnt werden.

Als weitere Möglichkeit wurde diskutiert, ob Bäume mit einem höheren durchschnittlichen Radialzuwachs eine *per se* höhere Anzahl an lebenden Ästen besitzen. Dies würde im Einklang mit den Ergebnissen von MAGUIRE et al. (1994), SIPE & BAZZAZ (1994), BONSER & AARSSSEN (1994), WEINREICH (2000) und DUCHESNEAU et al. (2001) stehen, welche zeigten, dass abnehmende Lichtintensität einen negativen Einfluss auf die Astanzahl besitzt. Der positive Einfluss des in dieser Arbeit als Proxy für die Einzelbaumvitalität und damit als Weiser für den verfügbaren Standraum (vgl. ASSMANN (1961)) verwendeten durchschnittlichen Radialzuwachses auf 1,3m Schafthöhe auf die Anzahl der lebenden Äste lässt sich somit im Sinne der zuvor genannten Studien als positiver Einfluss zunehmender Lichtintensität und eventuell zunehmender Ressourcenverfügbarkeit auf die Anzahl der Äste deuten.

Die Variable Kronenlänge fügt dem Modell nicht nur ein vertikales Maß hinzu, sie kennzeichnet auch indirekt die verschiedenen Baumentwicklungsstufen der empirisch erhobenen Daten. Sie dient in diesem Modell durch den Einschluss unterschiedlichster Baumentwicklungsstufen nicht als kennzeichnend für den Vitalitätsstatus des Einzelbaums, sondern als kennzeichnend für das Baumalter. Des Weiteren sind durch den Einsatz dieser Variable auch Aussagen über die durchschnittliche Astanzahl je Laufmeter Kronenlänge möglich. So werden auf jeden Meter Kronenlänge unabhängig vom durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe für die Baumart Buche 2,18 Äste, für die Baumart Eiche 1,095 Äste geschätzt.

Im Baumartenvergleich erwies sich der Parameterschätzer für die Variable Kronenlänge als signifikant unterschiedlich, wobei die geschätzte Anzahl der lebenden Äste mit zunehmender Kronenlänge im Modell der Baumart Buche stärker ansteigt. Die für diesen Befund in Frage kommenden Erklärungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beide Baumarten weisen zunächst dieselbe Anzahl an gebildeten Ästen auf. Durch die niedrigere Schattentoleranz der Baumart Eiche kommt es jedoch zu einem schneller fortschreitenden Mortalitätsprozess im Kronenbereich. Damit dezimiert sich die Anzahl der lebenden Äste im Vergleich zur Baumart Buche auch schneller. Da der Beweis dieser Hypothese jedoch mit Unsicherheiten behaftet war, konnte diese weder bestätigt noch abgelehnt werden.
- Die Buche als schattentolerante Baumart besitzt *per se* eine höhere Astanzahl. Diese Erklärung würde mit den Ergebnissen von SIPE & BAZZAZ (1994) übereinstimmen, welcher bei Untersuchungen an drei unterschiedlich schattentoleranten Ahornarten immer die höchste Astanzahl bei der schattentolerantesten Art fand. Auch die Ergebnisse von MOURELLE et al. (2001), welche in Untersuchungen an *Acer saccharum*, *Prunus serotina*, *Fagus grandifolia*, *Quercus rubra*, *Juglans nigra* und *Populus grandidentata* feststellten, dass die schattentoleranteren Baumarten auch immer die höhere Astdichte je definierter Längeneinheit besaßen, sprechen für diese Interpretation.

5.3.1.2 EINZELASTEBENE

5.3.1.2.1 ASTLÄNGE

Die Astlänge konnte mit Hilfe eines univariaten Regressionsmodells über den Astdurchmesser mit gutem Resultat geschätzt werden. Auf den Einschluss weiterer Erklärungsvariablen wurde aufgrund biologischer Unplausibilität (Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung) bzw. Marginalität (Astansatzwinkel) verzichtet. Alleine der Astdurchmesser konnte knappe 80% der Gesamtstreuung der Astlängen der Baumart Buche und 90% der Gesamtstreuung der Astlängen der Baumart Eiche erklären. Auch LANGSHAUSEN (2009) konnte bei der Anpassung eines univariaten Astlängenmodells für die Baumart Buche einen Streuungsanteil von 74% erklären, wohingegen das Astlängenmodell, welches von NUTTO (1999) für die Baumart Eiche angepasst wurde, 95% der Gesamtstreuung erklärte. Auch bei KINT et al. (2010) erwies sich das Astdurchmesser- Astlängenverhältnis für die Baumart Eiche etwas straffer als das der Baumart Buche. Beide Modelle prognostizieren eine Zunahme der Astlänge mit zunehmendem Astdurchmesser, was zunächst vor dem Hintergrund der „Pipe – Model - Theory“ (SHINOZAKI et al. (1964)) biologisch plausibel erscheint (vgl. KINT et al. (2010)).

SHINOZAKI et al. (1964) konnten in ihren Untersuchungen einen engen Zusammenhang zwischen Querschnittsflächensumme des Splintbereichs von Stamm und Ästen und der von ihnen getragenen Blattmenge feststellen, was später von zahlreichen Autoren, u.a. von WHITE (1993), SUMIDA & KOMIYAMA (1997) oder SONE et al. (2005) ebenfalls beobachtet werden konnte. Die Baumgestalt wurde infolgedessen von SHINOZAKI et al. (1964) als Ansammlung einzelner Rohrleitungen interpretiert, welche jeweils eine bestimmte Menge photosynthetischer Organe ernähren. KINT et al. (2010) vermuten, dass längere Äste, welche eine größere Anzahl an Assimilationsorganen aufweisen, einen höheren Wasserbedarf besitzen und daher eine größere Menge wasserleitender Gefäße benötigen; beschränken diese Erklärung aufgrund von Verkernungsprozessen in den Ästen und der damit einhergehenden Einschränkung der wasserleitenden Querschnittsfläche jedoch nur auf junge Äste.

Weiterhin werden von KINT et al. (2010) mechanische Erfordernisse als Erklärung für den beobachteten Zusammenhang aufgeführt. Nach MCMAHON (1973), BERTRAM (1989) und CASTÉRA & MORLIER (1991) müssen Äste bestimmte Proportionen von Durchmesser und Länge aufweisen, um der Biegekraft ihres Eigengewichts standzuhalten, wobei sich die Astlänge idealerweise proportional zur Potenz Astdurchmesser^{2/3} verhält (MCMAHON (1973)).

Der Baumartenvergleich ergab einen signifikanten Unterschied beider Modelle hinsichtlich ihrer Steigung. Mit zunehmendem Astdurchmesser nimmt die Astlänge der Baumart Buche schneller als die der Eiche zu. Hieraus ergeben sich Astdurchmesser- Astlängenverhältnisse von 1:100 für die Baumart Eiche und 1:125 für die Baumart Buche. Die von NUTTO (1999) für das Astdurchmesser- Astlängenverhältnis der Baumart Eiche formulierte Faustregel für von 1:100 kann somit für das vorliegende Datenmaterial bestätigt werden. LANGSHAUSEN (2009) findet mit 1:105 desgleichen ein etwas höheres Astdurchmesser- Astlängenverhältnis für die Baumart Buche. KINT et al. (2010), welche den Astdurchmesser in Abhängigkeit der Astlänge prognostizieren, erzielen ähnliche Resultate. Auch hier ist das Astdurchmesser- Astlängenverhältnis der Baumart Buche höher als das der Eiche. HEIN (2004) hingegen findet keinen signifikanten Unterschied im Astdurchmesser- Astlängenverhältnis des eher schattentoleranteren Bergahorns und der lichtbedürftigeren Esche.

5.3.1.2.2 *ASTDURCHMESSER*

Ein Astdurchmessermodell konnte für beide Baumarten mit mittlerem bis gutem Erfolg an die empirischen Datensätze angepasst werden. Das Modell erklärt für die Baumart Buche etwa 45%, für die Baumart Eiche 66% der Gesamtstreuung. Bei beiden Baumarten kann die Variable Schaftdurchmesser

in 1,3m Höhe den größten Anteil der Gesamtvariation erklären. In Verbindung mit der Variable $Alter_{1,3}$ werden vom vorliegenden Modell stärkere Äste für Bäume gleichen Alters aber größerem Schaftdurchmesser vorhergesagt. Dies kann mit einem weiteren Aspekt der „Pipe – Model - Theory“ in Einklang gebracht werden (SHINOZAKI et al. (1964)): die Grundflächensumme aller Äste über einem Verzweigungspunkt entspricht der Grundfläche des Stamms direkt am Verzweigungspunkt (ILOMÄKI et al. (2003), SONE et al. (2005)). Hinzu kommt die Vergrößerung des Schaftdurchmessers mit zunehmender Distanz von der Kronenbasis nach der „Pipe – Model - Theory of tree form“, da der schon astgereinigte Schaftteil „stillgelegte Rohrleitungen“ (SHINOZAKI et al. (1964)) in Form abgestorbener Äste enthält.

Diese Aussage ist auch mit den Ergebnissen des Kronendurchmessermodells und des Astlängenmodells kompatibel: Unter gleichen Voraussetzungen nimmt der Kronendurchmesser mit zunehmendem Schaftdurchmesser zu, damit nimmt die Astlänge der kronenformenden Äste zu, was wiederum einen größeren Astdurchmesser voraussetzt. Somit impliziert das Modell unter sonst gleichen Voraussetzungen höhere Astradialzuwächse für Äste von Bäumen, welche ebenfalls einen höheren Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe aufweisen. Der Einfluss des Radialzuwachses (bzw. des Schaftdurchmessers in gleichaltrigen Beständen) auf den Astdurchmesser wurde in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen (z.B. MAGUIRE et al. (1991), DORUSKA & BURKHART (1994), PERSSON (1994), NIEMISTÖ (1995), MÄKINEN (1996), MÄKINEN & COLIN (1998), MAGUIRE et al. (1999), NEILSEN & GERRAND (1999), SCHMIDT (2001), MÄKINEN et al. (2003a), MÄKINEN et al. (2003b), FAHLVIK et al. (2005), GARBER SEAN M. & MAGUIRE DOUGLAS A. (2005), ALCORN et al. (2007), HEIN et al. (2007a), HEIN et al. (2007b)). Großes Interesse galt dabei vor allem der Frage, inwieweit sich der mittlere bzw. maximale Astdurchmesser durch Erhöhung der Bestandesdichte vor allem in der Phase der Astreinigung verringern lässt. Dabei lässt sich der Astdurchmesser nach MEDHURST & BEADLE (2001) aufgrund seiner starken Abhängigkeit von Ressourcenverfügbarkeiten (vgl. SHINOZAKI et al. (1964)) sehr einfach über die Bestandesdichte regulieren. MÄKINEN (1996) stellte heraus, dass die Ergänzung von Astdurchmessermodellen durch Konkurrenzindizes bei gleichzeitiger Einbeziehung des Astalters und des Schaftdurchmessers auf 1,3m Höhe nur noch in geringem Maße zur zusätzlichen Erklärung des Regressanden beitragen.

Werden jedoch zwei gleichstarke Bäume unterschiedlichen Alters kontrastiert, ergeben sich unter sonst gleichen Voraussetzungen geringere Astdurchmesser für den jüngeren Baum, da beide Parameterschätzer ein positives Vorzeichen aufweisen. GARBER & MAGUIRE (2005) heben in ihren

Untersuchungen hervor, dass der Astdurchmesser das Produkt des Zusammenspiels von Astdurchmesserzuwachs und der Dauer des Astwachstums ist. Basierend auf den vom vorliegenden Modell geschätzten Werten kann zwar für schnellwachsende Bäume auch ein erhöhter Astradialzuwachs beobachtet werden, welcher jedoch den Effekt des geringeren Astalters nicht aufwiegen kann. Modelle anderer Autoren (z.B. COLIN & HOULLIER (1991), PUKKALA et al. (1992)), mit denen der Astdurchmesser neben anderen Variablen ebenfalls mit Hilfe der unabhängigen Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe und $Alter_{1,3}$ prognostiziert wurde, weisen desgleichen positive Vorzeichen sowohl für den Schaftdurchmesser wie auch für das Baumalter auf. Da das vorliegende Ergebnis durch die Resultate anderer Analysen noch untermauert werden kann, ist ihm somit biologische Plausibilität zuzusprechen.

Durch die Variable „ $Alter_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung“ wird dem Modell eine vertikale Komponente hinzugefügt. Dabei kann diese Variable im Unterschied zur absoluten oder relativen Astansatzhöhe als vollständig unabhängig von standörtlichen Gegebenheiten verstanden werden. Höhere Werte bilden unter sonst gleichen Bedingungen eine höhere vertikale Position des Astes in der Krone ab. In Verbindung mit dem $Alter_{1,3}$ gibt diese Variable das Astalter wieder und beschreibt so für Äste höheren Alters einen größeren Astdurchmesser. Dies steht im Einklang mit den zuvor ausgeführten Überlegungen.

Des Weiteren werden vom Modell zunehmende Astdurchmesser mit abnehmenden Astansatzwinkeln (Bezug: Vertikale) beschrieben. Unter gleichen Voraussetzungen sind starke Äste oft mit einem steilen Astansatzwinkel assoziiert (vgl. BOZZUTO & WILSON (1988)). MÄKINEN et al. (2003a) und MÄKINEN et al. (2003b) schließen so sogar den Astdurchmesser in ihr Modell zur Vorhersage des Astansatzwinkels ein. KINT et al. (2010) fanden einen signifikanten negativen Zusammenhang zwischen Astlänge und Astansatzwinkel und folgerten daraus, dass steilere Äste leichter das Kronendach erreichen und sich somit eine effizientere Lichtabsorption ermöglichen können. Vor diesem Hintergrund und auf der Basis der zuvor diskutierten „Pipe – Model - Theory“ (SHINOZAKI et al. (1964)) lässt sich somit auch dieser Zusammenhang biologisch plausibel erklären.

Der Baumartenvergleich ergab einen signifikanten Unterschied der Parameterschätzer aller Variablen und inklusive der Konstante mit Ausnahme des Astansatzwinkels, welcher als einzige Variable in ähnlicher Weise auf den Astdurchmesser beider Baumarten einwirkt. Die Vorzeichen der Parameterschätzer sind in den Modellen beider Baumarten jedoch gleich gerichtet. Das Modell schätzt

unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen tendenziell höhere Astdurchmesser für die Baumart Eiche und setzt damit einen höheren Astradialzuwachs voraus (vgl. Abbildung 45).

Der Parameterschätzer der Variable $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung für das Astdurchmessermodell der Baumart Eiche beträgt mehr als das Dreifache dessen der Baumart Buche und zeigt somit ein stärkeres Astdurchmessergefälle in der Krone der Baumart Eiche an. Diese Beobachtung erklärt sich vor dem Hintergrund der hohen implizit prognostizierten Astdurchmesserzuwächse der Eichenäste, was zu stärkeren Astdurchmesserkontrasten von jungen gegenüber alten Ästen führt (vgl. Abbildung 45).

Auch die Variable Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe besitzt im Astdurchmessermodell der Baumart Eiche einen signifikant größeren Einfluss auf den Astdurchmesser. Eine Erhöhung des mittleren jährlichen Radialzuwachses um einen Millimeter wirkt sich ausweislich des erstellten Astdurchmessermodells für die Baumart Buche bei Ästen, welche im $\text{Alter}_{1,3}$ von 15 Jahren gebildet wurden, in einem Astdurchmesserunterschied im $\text{Alter}_{1,3}$ von 20 Jahren von 2mm aus; für die Baumart Eiche berechnet sich jedoch unter gleichen Bedingungen ein Astdurchmesserunterschied von 4mm. Da jedoch im Vergleich der Astradialzuwachsmodele beider Baumarten kein signifikanter Unterschied der Wirkung des Schafradialzuwachses auf den Astradialzuwachs festgestellt werden konnte, muss davon ausgegangen werden, dass der hier beobachtete Effekt mit einer stärkeren Erhöhung der Astlebensdauer durch eine im Vergleich zur Baumart Buche stärker verlangsamte Kronenansatzhöhenverschiebung der Baumart Eiche zusammenhängt. In der Tat zeigte das in dieser Arbeit erstellte Kronenansatzhöhenmodell für die Baumart Eiche einen etwas größeren Unterschied in Bezug auf die Kronenansatzhöhen von Bäumen zweier unterschiedlicher Radialzuwachsszenarien. Diese Erklärung kann jedoch nur auf die Äste zutreffen, welche sich in dem Bereich der Krone befinden, der durch Beschattungseffekte beeinflusst wird.

Dabei ist hervorzuheben, dass die modellierten Astdurchmesser der Baumart Buche unabhängig von den hier aufgeführten Radialzuwachsszenarien ab einem Astalter von über 5 Jahren und unter sonst gleichen Bedingungen immer hinter den modellierten Astdurchmessern der Baumart Eiche zurück bleiben, wobei vom Modell zur Vorhersage der Astanzahl ebenfalls unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen für die Baumart Buche eine höhere Astanzahl im Vergleich zur Baumart Eiche prognostiziert wird. Abbildung 46 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

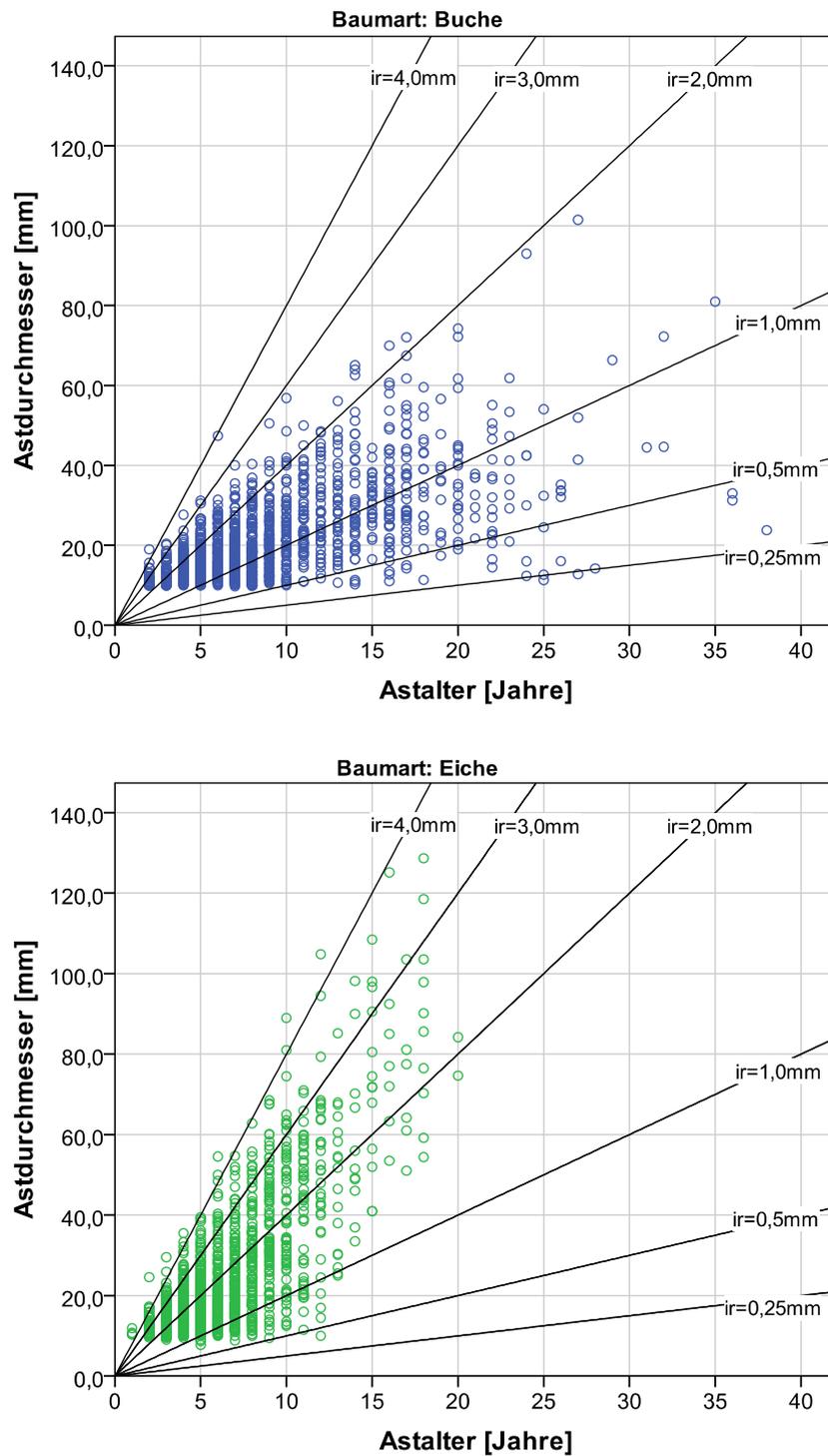


Abbildung 45 Darstellung des Astdurchmessers in Abhängigkeit des Astalters von Buche (oben, blaue Signatur) und Eiche (unten, grüne Signatur) aller aufgenommenen lebenden Äste. Zur besseren Vergleichbarkeit sind verschiedene durchschnittliche jährliche Astradialzuwächsgänge dargestellt.

Auf der linken Seite (Abbildung 46) ist zunächst die Grundflächensumme aller lebenden Äste über einem Zentimeter Durchmesser des empirisch aufgenommenen Datenmaterials in Abhängigkeit der Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe dargestellt. Der zuvor diskutierte, durch die „Pipe – Model - Theory“ (SHINOZAKI et al. (1964)) implizierte Zusammenhang zwischen der Astgrundflächensumme aller lebenden Äste über einem Verzweigungspunkt mit der Grundfläche des Stammes direkt unterhalb des Verzweigungspunktes kann auch für das empirische Datenmaterial nachgewiesen werden. Da nur die Astgrundfläche *lebender* Äste über einem Zentimeter Astdurchmesser erfasst wurde und zur besseren Vergleichbarkeit über der Grundfläche des Schaftes auf 1,3m Höhe statt über dessen Grundfläche direkt an der Kronenbasis aufgetragen wurde, weisen Schaftgrundfläche und Astgrundflächensumme mit fortschreitender Astreinigung nichtmehr, wie von der „Pipe – Model - Theory“ definiert, denselben Betrag auf. Beide Baumarten zeigen hier einen ähnlichen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Wird die Astgrundflächensumme durch die Anzahl der lebenden Äste dividiert, erhält man die durchschnittliche Grundfläche aller Äste über einem Zentimeter Durchmesser (Abbildung 46, rechts). Hier weist die Baumart Eiche eine vergleichsweise größere durchschnittliche Astgrundfläche mit zunehmender Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe und somit in der Tendenz vergleichsweise weniger, aber dafür dickere Äste auf.

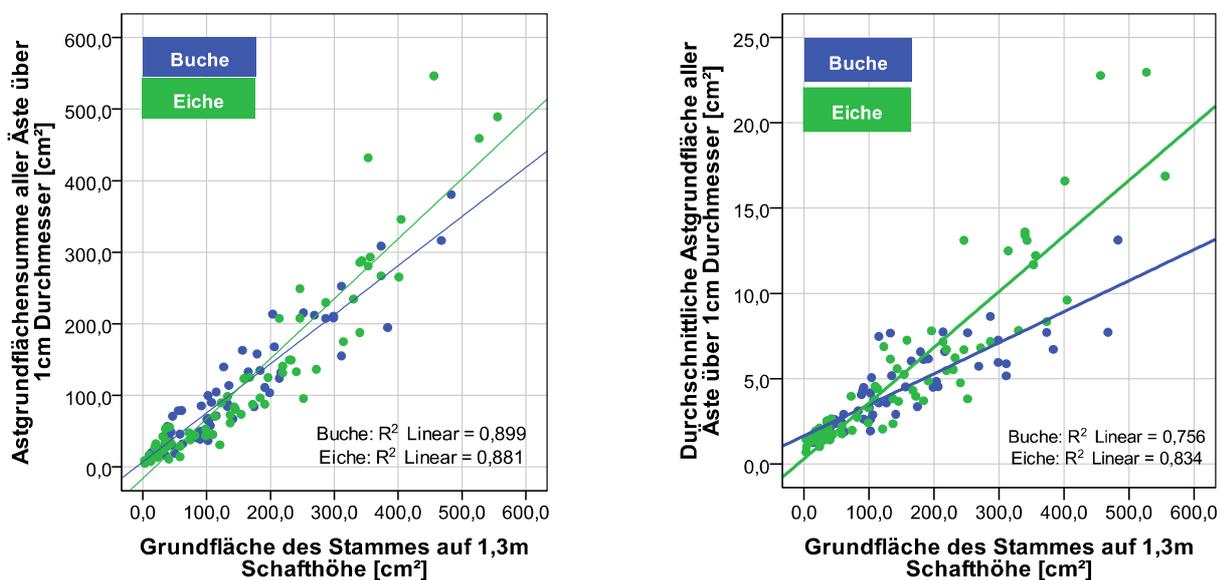


Abbildung 46: Rechts: Astgrundflächensumme aller Äste über 1cm Astdurchmesser in Abhängigkeit der Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur). Rechts: Durchschnittliche Astgrundfläche aller Äste über 1cm Durchmesser in Abhängigkeit der Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur).

Ausdrücklich am erstellten Astdurchmessermodell zu kritisieren ist, dass der prognostizierte Astdurchmesser einjähriger Äste der Baumart Buche mit 12 bis 14mm zu hoch eingeschätzt wird, wie Abbildung 47 veranschaulicht.

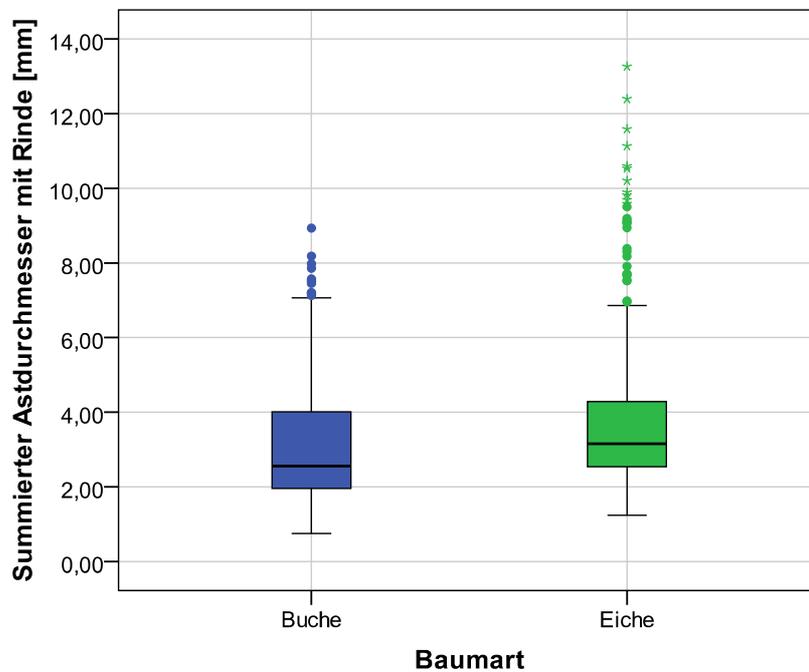


Abbildung 47: Median, Interquartilbereich, Ausreißer und Extremfälle der Astdurchmesser einjähriger Äste (mit Rinde) von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechte, grüne Signatur). Anzahl der Beobachtungen= Buche: 411 Äste; Eiche: 383 Äste. Die Ermittlung der Astdurchmesser erfolgte retrospektiv aus den Astradialzuwachsungen und dem Einsatz des Rindenmodells für Äste.

5.3.1.2.3 ASTRADIALZUWACHS

Der Astradialzuwachs beider Baumarten stellte sich vor allem in den ersten Astlebensjahren als außerordentlich variabel heraus. Die Modellanpassung konnte erhöht werden, indem das Astradialzuwachsmodell nur für ein Astalter von 4 bis einschließlich 20 Jahren parametrisiert wurde.

Das erstellte Astdurchmessermodell konnte für die Baumart Buche 46,5%, für die Baumart Eiche lediglich 25,5% der Gesamtvariation erklären. Als einflussreichster Regressor wurde für beide Modelle die Variable „laufendes Astalter“ identifiziert, welche 35,5% der Gesamtvariation im Modell der Baumart Buche und 10,5% der Gesamtvariation im Modell der Baumart Eiche erklärte. Weitere Variablen wie der jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe, der Astansatzwinkel oder das Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung trugen nur noch zu unter 10% zur weiteren Klärung der Gesamtstreuung

bei. Die Durbin- Watson Statistiken beider Modelle weisen auf positive Autokorrelation hin. Auf den Einschluss einer Lagvariable wurde jedoch trotz der erheblichen Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes verzichtet, da Autokorrelation nicht vollständig entfernt werden konnte oder dadurch weitere Probleme verursacht wurden. Trotz der statistischen Mängel eignen sich die Modelle dazu, Einflüsse auf den Astradialzuwachs zu identifizieren und Unterschiede zwischen den beiden Baumarten herauszufiltern.

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen abnehmende Astradialzuwächse mit zunehmendem Astalter. Damit ergibt sich für die lebenden Äste eines Baumes zu einem gegebenen Zeitpunkt eine von der Baumspitze zur Kronenbasis verlaufende sukzessive Abnahme des jährlichen Astradialzuwachses. Diese Abnahme wird hauptsächlich durch zunehmende Beschattung verursacht (vgl. z.B. ILONEN et al. (1979), KELLOMÄKI & OKER-BLOM (1983), MÄKINEN (2002)). Entsprechend den Annahmen der Astautonomie (SPRUGEL et al. (1991)) beziehen ältere Äste, deren Verbrauch angelegter Energiespeicher im Zuge der Respiration der Photosyntheseleistung die Waage hält oder diese sogar übersteigt, keinerlei zusätzlichen Kohlenstoff aus anderen Teilen des Baumes und sind somit vollständig isoliert. Der Astradialzuwachs nimmt somit mit zunehmender Beschattung ab und kann sogar bei entsprechender Holz Anatomie ausfallen. Dieses Resultat steht im Einklang mit den Ergebnissen von z.B. GELINSKY (1933), REUKEMA (1959), KERSHAW et al. (1990), FUJIMORI (1993), MÄKINEN (1999a) und MÄKINEN (2002). Dem Ergebnis kann somit auch vor dem Hintergrund bisheriger Untersuchungen biologische Plausibilität zugesprochen werden.

Des Weiteren prognostiziert das Modell unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen abnehmende Astradialzuwächse mit zunehmendem Astansatzwinkel (Bezug: Vertikale). Diese Aussage ist konsistent mit dem beobachteten negativen Effekt des Astansatzwinkels auf den Astdurchmesser und steht auch im Einklang mit den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen, in welchen der signifikante negative Einfluss des Astansatzwinkels (Bezug: Vertikale) auf den Astdurchmesser unter sonst gleichen Bedingungen betont wird (vgl. z.B. BOZZUTO & WILSON (1988), GOCKEL (1994), MÄKINEN et al. (2003a) und MÄKINEN et al. (2003b)). Das Ergebnis stellt des Weiteren die Tatsache heraus, dass Äste keineswegs nur von zeitlichen beziehungsweise baumspezifischen Faktoren abhängig sind, sondern auch durch ihre eigene Charakteristik zu einer Art Einzelastvitalität beitragen können.

Daneben prognostiziert das erstellte Modell zunehmende Astradialzuwächse mit zunehmendem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung. Somit werden für Äste, die sich in höheren Kronenbereichen befinden im Vergleich zu niedriger ansetzenden Ästen unter sonst gleichen Bedingungen höhere Radialzuwächse

prognostiziert. Dieses Resultat steht im Einklang mit den Ergebnissen von UMEKI & KIKUZAWA (2000), welche desgleichen ein schnelleres Astdickenwachstum in vergleichsweise höheren Kronenbereichen fanden. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung findet sich im Verlauf der Höhenwachstumsdynamik. In dynamischen Wachstumsphasen kommt es sehr rasch zu Beschattungseffekten durch Äste von Nachbarbäumen oder neu gebildeten Ästen derselben Krone. Der hohe Astradialzuwachs der ersten Lebensjahre, in denen sich der Ast in optimaler Kronenposition befindet, kann recht schnell nicht mehr aufrecht erhalten werden. Der Ast kann seinen Energiebedarf durch verminderte Photosyntheseleistung nur noch knapp decken, wird vom restlichen Organismus isoliert (SPRUGEL et al. (1991)) und stirbt ab oder verbleibt am Baum, ohne weitere Jahrringe zu bilden (Buche). Äste, welche nach der dynamischsten Wachstumsphase gebildet werden, vermögen länger in vorteilhafter Kronenposition zu verbleiben, denn Beschattungseffekte treten später ein.

Der Baumartenvergleich ergab zunächst einen signifikanten Unterschied im Interzept sowie einen signifikanten Einfluss der Interaktionsterme der Variablen „Baumart“ und „Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung“ sowie „Baumart“ und „laufendes Astalter“. Diese Resultate können zwar einzeln biologisch sinnvoll erklärt werden, ergeben jedoch in ihrer Kombination Widersprüche. So könnte der stärkere positive Einfluss der vertikalen Astposition auf den Astradialzuwachs der Baumart Eiche mit ihrer geringeren Schattentoleranz erklärt werden. In hochdynamischen Entwicklungsphasen kommt es sehr schnell zu Beschattungseffekten der unteren Seitenäste, die nur noch einen geringen Radialzuwachs zu leisten vermögen, wohingegen Äste in höheren Kronenpositionen, die zum Ende der dynamischsten Wachstumsphase gebildet werden, vorteilhafte Wuchsbedingungen besitzen. Demgegenüber wäre es denkbar, dass die Baumart Buche zumindest bezüglich ihres Astradialzuwachses weniger stark auf optimale beziehungsweise pessimale Wachstumsbedingungen reagiert. Unter Bedingungen, bei denen die Eichenäste schon abgestorben sind, können Äste der Baumart Buche noch lange Zeit unter Bildung eines sehr geringen Astradialzuwachses am Stamm persistieren (vgl. Abbildung 45). Eine denkbare Erklärung, über die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur spekuliert werden kann, wäre, dass unter Bedingungen, bei denen der Astradialzuwachs der Baumart Eiche schon stark vermindert wird, nur ein geringer Effekt auf den Astradialzuwachs der Baumart Buche zu erkennen ist. Dementsprechend groß würde somit der Unterschied zwischen Eichenästen des unteren Kronenraums und höher ansetzenden Eichenästen ausfallen.

Demgegenüber weist die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche eine weniger starke Reduktion des Astradialzuwachses mit zunehmendem Astalter auf. Abbildung 45 zeigt, dass

Buchenäste mit einem sehr geringen Radialzuwachs von durchschnittlich 0,25mm über eine Zeit von über 30 Jahren existieren können, wohingegen für lebende Äste der Eiche ein minimaler durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs von 0,5mm und nur bis zu einem Astalter von etwa 12 Jahren zu beobachten war. Dieser Befund bescheinigt den untersuchten Ästen der Baumart Buche zwar hohe Plastizität (vgl. z.B. CANHAM (1988), CANHAM (1989) oder DELAGRANGE et al. (2004)), steht aber in gewissem Widerspruch zur vorangegangenen Interpretation.

Ob Äste der Baumart Eiche aufgrund baumartenspezifischer Eigenheiten einfach nicht in der Lage sind, ihren Radialzuwachs nach dem Muster der Äste der Baumart Buche substantiell zu reduzieren, oder ob dieser Befund ein Resultat der Aufnahmemethodik darstellt, bei der nur die stärksten (oder im unteren Kronenraum die einzigen) Äste je Metersektion untersucht wurden, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen könnten Schattierexperimente unter kontrollierten Bedingungen in Verbindung mit Astradialzuwachsmessungen durchgeführt werden, um zur Klärung dieser Frage beizutragen.

Des Weiteren werden vom Modell zunehmende Astradialzuwächse mit zunehmendem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe prognostiziert. PUKKALA et al. (1992), MÄKINEN (1999b) und HEIN et al. (2007b) weisen in ihren Untersuchungen darauf hin, dass Faktoren, welche den Radialzuwachs eines Baumes fördern, auch den Radialzuwachs der Äste positiv beeinflussen. Hinsichtlich dieser Aussage ist das erstellte Astradialzuwachsmodell inhaltlich konsistent mit der Aussage des Astdurchmessermodells, dass unter gleichen Bedingungen Bäume größeren Durchmessers auch stärkere Äste besitzen. Bemerkenswerterweise konnte jedoch kein signifikanter Unterschied der Wirkung des Schafradialzuwachses auf den Astradialzuwachs zwischen den Modellen beider Baumarten festgestellt werden, wohingegen im Rahmen des Astdurchmessermodells für die Baumart Eiche ein signifikant stärkerer positiver Einfluss des Schaftdurchmessers auf den Astdurchmesser festgestellt wurde (vgl. Kapitel 5.3.1.2.2).

5.3.1.2.4 *ASTANSATZWINKEL*

Das erstellte Astansatzwinkelmodell weist für die empirischen Daten beider Baumarten eine sehr geringe Anpassung auf. So konnten nur 9% der Gesamtstreuung vom Modell für die Baumart Buche und 17,4% der Gesamtstreuung vom Modell für die Baumart Eiche erklärt werden. Jedoch war es auch Autoren anderer Astansatzwinkelmodelle (z.B. HEIN & SPIECKER (2007), HEIN (2008) oder KINT et al. (2010)) nicht möglich, maßgeblich höhere Anteile der Gesamtstreuung zu erklären. Beispielsweise

weisen auch BOZZUTO & WILSON (1988) oder LANGSHAUSEN (2009) auf eine hohe Variabilität der von ihnen im Rahmen ihrer Studien aufgenommenen Astansatzwinkel hin. Als mögliche Erklärung hierfür führt HEIN (2008) genetische Einflüsse (vgl. auch PÖYKKÖ (1982), HAAPANEN et al. (1997) oder CEULEMANS et al. (1990)) an.

Die Variable Astdurchmesser erklärt in beiden Modellen den größten Anteil der Gesamtstreuung. Mit zunehmendem Astdurchmesser wird vom Modell ein abnehmender Astansatzwinkel prognostiziert (vgl. Abbildung 48). Diese Aussage steht zunächst in Übereinstimmung sowohl mit dem Astdurchmesser- als auch mit dem Astradialzuwachsmodell sowie zu Ergebnissen früherer Untersuchungen (vgl. z.B. MÄKINEN et al. (2003b), HEIN & SPIECKER (2007) oder HEIN (2008)). Steil ansetzende Äste haben eine größere Chance, das Kronendach zu erreichen und verschaffen sich so einen Vorteil gegenüber Ästen mit größerem Astansatzwinkel, was sich in einem erhöhten Astradialzuwachs äußert. Umgekehrt beeinflusst der Astdurchmesser jedoch auch den Astansatzwinkel, da mit zunehmendem Astdurchmesser die Biegefestigkeit des Astes gegenüber seinem Eigengewicht erhöht wird (BOZZUTO & WILSON (1988)). Des Weiteren kann der Astdurchmesser auch als integrierendes Maß fungieren, welches Auskunft über die im Ast enthaltene Menge an Zugholz erteilt (BOZZUTO & WILSON (1988)).

Der Astansatzwinkel wird weiterhin beeinflusst durch den durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Lebenszeit des Astes. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit Beobachtungen anderer Autoren (vgl. z.B. HASHIMOTO (1990), HASHIMOTO (1991), MÄKINEN (1996), ALCORN et al. (2007)), welche ergaben, dass der Astansatzwinkel mit zunehmender Bestockungsdichte abnimmt. Nach HENSKENS et al. (2001) kann dies durch eine intensiviertere Konkurrenz der Einzeläste um Licht erklärt werden. Auch Ergebnisse von Astansatzwinkelmodellen weiterer Autoren MÄKINEN et al. (2003b) oder HEIN & SPIECKER (2007) stimmen mit diesem Resultat überein. Jedoch widerspricht dieses Resultat den Analysen von KURTH (1946) und WEINREICH (2000), die signifikant größere Astansatzwinkel an unterdrückten Bäumen feststellten.

Mit zunehmendem Astalter prognostiziert das Modell abnehmende Astansatzwinkel, was vor dem Hintergrund der von JANKIEWICZ & STECKI (1976) formulierten Theorie ebenfalls biologisch plausibel erscheint (vgl. Abbildung 49). Demnach wird der Ast im Laufe seines Lebens primär durch sein Eigengewicht aber auch zum Teil durch Belastungen, welche von externen Faktoren hervorgerufen werden (z.B. Schneeaufgaben) nach unten gebogen. So könnte auch gefolgert werden, dass sich Äste bei

beschleunigtem Radialzuwachs des Baumes und somit auch erhöhtem Astradialzuwachs durch die bloße Erhöhung ihres Eigengewichts schneller absenken als Äste von Bäumen mit gebremstem Dickenzuwachs. Aber auch die an der Oberseite des Astes durch neu gebildetes Holzgewebe von Stamm und Ast entstehende Druckspannung sowie die Bildung von Reaktionsholz am Schnittpunkt zwischen Ast- und Stammachse können den Astansatzwinkel vergrößern (ebenda). Während BOZZUTO & WILSON (1988) keinen Zusammenhang zwischen dem Astalter und dem Astansatzwinkel bei *Acer rubrum* feststellen konnten, spielt das Astalter jedoch in den Astansatzwinkelmodellen anderer Autoren (vgl. z.B. HASHIMOTO (1990), HASHIMOTO (1991), COLIN & HOULLIER (1992), MÄKINEN (1996) oder ACHIM et al. (2006)) eine signifikante Rolle.

Des Weiteren werden vom Modell abnehmende Astansatzwinkel mit zunehmendem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung prognostiziert. Mit zunehmender Astansatzhöhe wird also unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen ein steilerer Astansatzwinkel vom Modell vorhergesagt (vgl. Abbildung 48). MAYER-WEGELIN (1929), KURTH (1946), MEDHURST & BEADLE (2001), MÄKINEN et al. (2003b), SONE et al. (2006) oder KINT et al. (2010) kamen ebenfalls zu diesem Ergebnis, welches von SONE et al. (2006) damit begründet wird, dass die Blattfläche durch horizontaler ausgerichtete Äste in den unteren Kronenbereichen so arrangiert werden kann, dass Lichtinterzeption maximiert wird. In kleinräumiger Auflösung bestätigt dieses Resultat des Weiteren auch die von GIVNISH (1988) und CORNELISSEN (1993) beschriebenen Extremformen der Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse.

Im Baumartenvergleich konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Astansatzwinkelmodellen für Buche und Eiche festgestellt werden. HEIN & SPIECKER (2007) konnten desgleichen keinen signifikanten Unterschied zwischen den von ihm parametrisierten Astansatzwinkelmodellen überwallter Äste von Esche und Bergahorn feststellen.

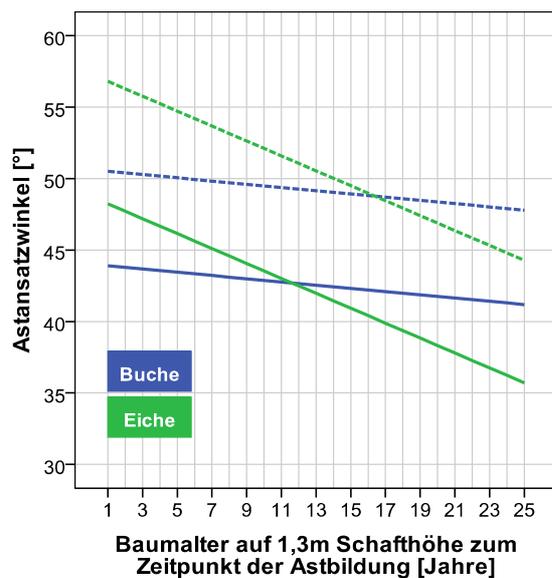


Abbildung 48: Darstellung des Astansatzwinkels in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe zum Zeitpunkt der Astbildung von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für einen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe von 3,5mm und ein Astalger von 10 Jahren für zwei verschiedene Astdurchmesser (20mm: gestrichelte Linie, 40mm: durchgezogene Linie).

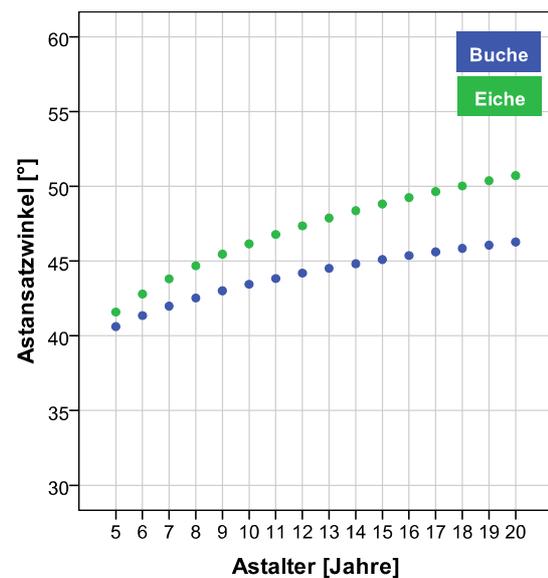


Abbildung 49: Astansatzwinkel in Abhängigkeit vom Astalger vom Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm auf 1,3m Schafthöhe und einem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung von 5 Jahren, sowie einem Astdurchmesser von 40mm.

5.3.2 ASTMORTALITÄTSPROZESS

5.3.2.1 EINZELBAUMBENE

5.3.2.1.1 KRONENANSATZHÖHE

An die vorliegenden empirischen Daten konnte ein Kronenansatzhöhenmodell mit den unabhängigen Variablen Baumhöhe sowie Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe angepasst werden. Das erstellte Modell erklärt 83,7% der Streuung der empirischen Daten der Baumart Buche und 89,2% der Streuung der empirischen Daten der Baumart Eiche und prognostiziert die Kronenansatzhöhe bei beiden Baumarten bis auf wenige Ausreißer mit einer Genauigkeit von +/-2 Metern. Der größte Teil der Streuung konnte in den Modellen beider Baumarten mit 81% (Buche) bzw. 82% (Eiche) durch die Variable Baumhöhe erklärt werden.

Das vorliegende Modell schätzt zunehmende Kronenansatzhöhen mit zunehmender Baumhöhe, ein Ergebnis, welches zunächst den Prozess der Astmortalität mit zunehmender Bestandesentwicklung beschreibt (KINT et al. (2010)) und welches mit Resultaten aus weiteren

Kronenansatzhöhenmodellierungen, z.B. von NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009), in Einklang steht. Äste in den unteren Kronenbereichen werden durch die sich über ihnen entwickelnden Äste zunehmend beschattet, es entsteht eine asymmetrische Konkurrenzsituation zwischen den Ästen der Krone, bei welcher Äste der oberen Kronenbereiche vom Baum bevorzugt mit Ressourcen versorgt werden (HENRIKSSON (2001)). Dabei übersteigt der respiratorische Verbrauch von Ästen der unteren Kronenbereiche bald die eigene Leistungsfähigkeit (WITOWSKI (1997), vgl. auch MITSCHERLICH & GADOW (1968)), was ihre vollständige Isolation von der Kohlenstoffversorgung des Baumes und somit ihr baldiges Absterben bewirkt („Astautonomie-Theorie“: (SPRUGEL et al. (1991)). Dabei weist die Entwicklung der Kronenansatzhöhe einen sigmoidalen Verlauf auf, was in Einklang mit den Ergebnissen etwa von OKER-BLOM et al. (1988), NUTTO (1999), HEIN (2004) oder LANGSHAUSEN (2009) steht.

Des Weiteren wird eine abnehmende Kronenansatzhöhe mit zunehmendem Schaftdurchmesser prognostiziert, was desgleichen von eben genannten Autoren sowie z.B. auch SPIECKER (1991) beobachtet wurde. Damit ergeben sich unter gleichen Bedingungen (vgl. Abbildung 50):

- höhere Kronenansätze für Bäume, welche auf besseren Standorten stocken. Treibende Kraft ist hier die schnellere Höhenentwicklung auf besseren Standorten, womit der diskutierte Prozess des Aststerbens mit zunehmender Höhenentwicklung beschleunigt wird (vgl. z.B. auch MAHALL & WILSON (1986), SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004), HEIN (2009), LANGSHAUSEN (2009), KINT et al. (2010)).
- niedrigere Kronenansätze für Bäume mit höheren durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachsen auf 1,3m Schafthöhe. Wird der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs als Proxy für die Verfügbarkeit an Standraum betrachtet, tritt die eben beschriebene Beschattungssituation, welche ein Absterben der Äste in den unteren Kronenbereichen bewirkt, bei Bäumen mit höherem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs später ein. Die Differenzen zwischen den errechneten Kronenansatzhöhen verschiedener Radialzuwachsszenarien unterscheiden sich im Vergleich zwischen Buche und Eiche statistisch signifikant (vgl. Kapitel 4.2.1.1.2). Dies könnte als Hinweis darauf gewertet werden, dass die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche empfindlicher auf eine sich verschärfende Konkurrenzsituation reagiert, was mit ihrer Lichtbedürftigkeit zu begründen wäre. Durch ihre im Vergleich zur Baumart Buche weniger effiziente

Strahlungsabsorption der Schattenblätter (HAGEMEIER (2002)) tritt der Zustand der Astautonomie früher ein; der Ast stirbt früher ab.

So stellten auch KINT et al. (2010) neben dem Einfluss der Einzelbaumvitalität einen Einfluss der Bestandesdichte auf den Astmortalitätsprozess von Eichen fest, welcher im Modell der ebenfalls untersuchten Buche keine statistische Signifikanz erlangte.

Ausweislich des erstellten Modells kann bei der Baumart Eiche eine Kronenansatzhöhe von 8 Metern bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm und einer Standortsbonität von $SI_{10} = 9m$ bei einem $Alter_{1,3}$ von 14 Jahren erreicht werden; eine Erhöhung des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses auf gleichem Standort um einen Millimeter bewirkt eine Verzögerung um knappe 3 Jahre, bis ebenfalls eine Kronenansatzhöhe von 8 Metern erreicht ist. Unter sonst gleichen Bedingungen erreichen Eichen eine Kronenansatzhöhe von 8 Metern auf einem Standort der Bonität $SI_{10} = 9m$ im Vergleich zu Eichen auf einem Standort von $SI_{10} = 8m$ (vgl. Abbildung 50) um etwa 2 Jahre früher.

Für die Baumart Buche wirkt sich ein Standortsunterschied jedoch dramatischer aus: während Bäume eines durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses von 3,5mm auf einem Standort der Bonität $SI_{10} = 7m$ etwa 34 Jahre benötigen, um ihren Kronenansatz auf eine Höhe von 8m zu verschieben, ist ein Kronenansatz gleicher Höhe für Bäume auf einem Standort der Bonität $SI_{10} = 8m$ unter sonst gleichen Bedingungen schon nach etwa 29 Jahren erreicht (vgl. Abbildung 50). Desgleichen verzögert ein durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs von 3,5mm bei der Baumart Buche im Vergleich zu einem Radialzuwachsszenario von 2,5mm auf einem Standort der Bonität $SI_{10} = 8m$ das Erreichen eines Kronenansatzes von 8 Metern um etwa 7 Jahre, auf einem Standort der Bonität $SI_{10} = 7m$ errechnet sich sogar eine Differenz von etwa 8 Jahren (vgl. Abbildung 50).

Trotzdem ergab der Baumartenvergleich keine signifikanten Unterschiede der Steigungen für die unabhängigen Variablen, jedoch einen signifikanten Unterschied des Interzepts beider Modelle. Gemäß des für den gemeinsamen Datensatz parametrisierten Modells besitzt so die Baumart Eiche bei gleicher Höhe und gleichem Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe im Vergleich zur Baumart Buche eine um etwa 1,3 Meter höher ansetzende Krone, was die Ergebnisse von KINT et al. (2010) untermauert.

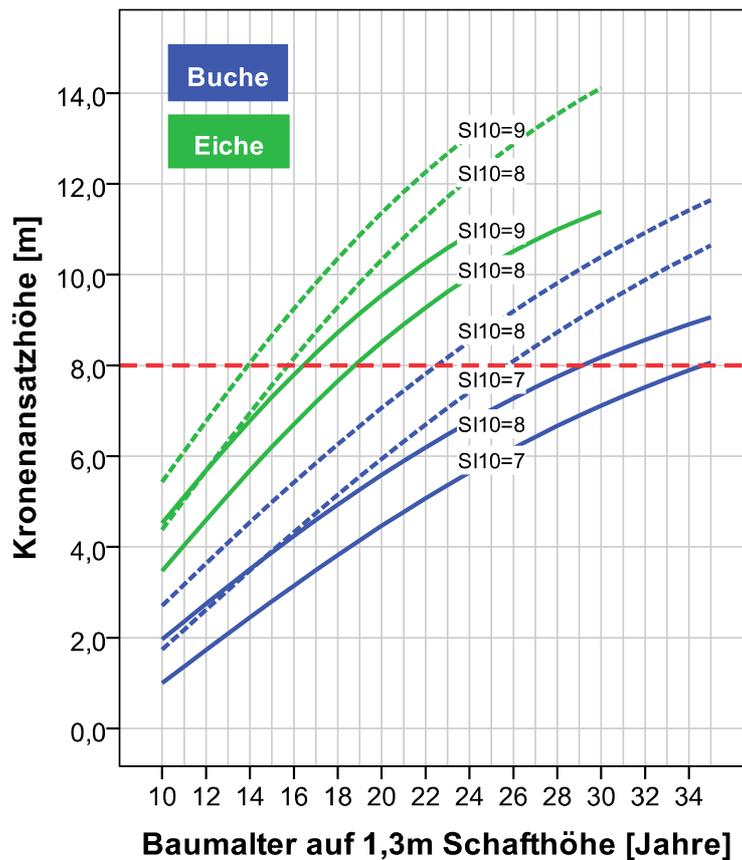


Abbildung 50: Modellierter Kronenansatzhöhe in Abhängigkeit vom Alter_{1,3} von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für verschiedene absolute Oberhöhenbonitäten (Buche: SI₁₀=7 und SI₁₀=8; Eiche: SI₁₀=8 und SI₁₀=9) und unterschiedliche durchschnittliche jährliche Radialzuwachsszenarien (gestrichelte Linie: 2,5mm; durchgezogene Linie: 3,5mm). Zur Orientierung ist eine Kronenansatzhöhe von 8m eingezeichnet (rot gestrichelte Linie).

So kann für eine Höhenbonität von SI₁₀=8m und einem Radialzuwachsszenario von jährlichen 2,5mm für die Baumart Eiche mit einer maximalen jährlichen Kronenansatzhöhenverschiebung von etwa 0,65 Metern gerechnet werden; für die Baumart Buche errechnet sich unter gleichen Bedingungen eine maximale jährliche Kronenansatzverschiebung von nur etwa 0,48 Metern (vgl. Abbildung 51). Dieser Befund ist mit der geringeren Schattentoleranz der Baumart Eiche zu begründen (vgl. z.B. auch MAHALL & WILSON (1986)), welche sich auch darin äußert, dass, wie zuvor diskutiert, ihre Schattenblätter im Vergleich zur Baumart Buche eine weniger effiziente Strahlungsabsorption aufweisen (i.e. geringere spezifische Blattabsorptivitäten) (vgl. z.B. HAGEMEIER (2002), BONOSI (2006)).

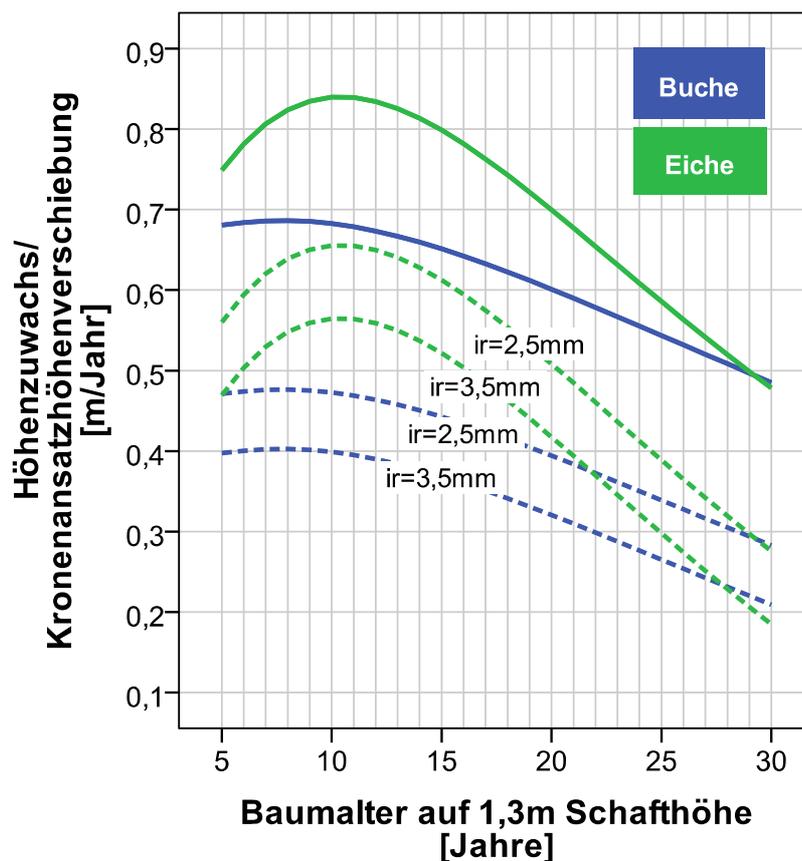


Abbildung 51: jährlicher Baumhöhenzuwachs (durchgezogene Linien) und jährliche Kronenansatzhöhenverschiebung (gestrichelte Linien) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) auf Grundlage der in dieser Arbeit erstellten Modelle für Radialzuwachszenarien von 2,5mm/ Jahr und 3,5mm/ Jahr und eine Oberhöhenbonität von $SI_{10}=8m$.

Des Weiteren könnten auch die unterschiedlichen Wasserleitsysteme der beiden Baumarten zur Erklärung dieser Beobachtung herangezogen werden, da der Zustand der Astautonomie bei Ästen der ringporigen Baumart Eiche nur so lange andauern kann, wie diese fähig sind, ihren Energiebedarf zur Bildung eines neuen Jahrrings selbst zu decken. Kann ein Jahrring durch erhöhte Respiration und verminderte Photosynthese nicht mehr ausgebildet werden (vgl. ROBERTS (1994)), sind die wasserleitenden Spätholzgefäße nach kurzer Zeit nicht mehr funktionsfähig (vgl. LÖSCH (2003)). Der Ast stirbt, sobald der Wasserstrom abbricht, welcher den Ast mit Nährstoffen versorgt und für das Streckungswachstum der Knospen beim Austreiben essentiell ist (HUBER (1926)). Die Baumart Buche ist jedoch durch ihre zerstreutporige Holzanatomie befähigt, in mehreren letztjährigen Jahrringen Wasser zu leiten (DENFFER & STRASBURGER (1983)). Der Knospenaustrieb kann somit im nächsten Frühjahr fortgesetzt und Stoffwechselaktivitäten können aufrecht erhalten werden, auch wenn der Ast vollständig von der Kohlenstoffversorgung des Baumes isoliert wird und es durch erhöhte

Respiration und verminderte Photosynthese zu ausfallenden Jahrringen kommt. Ausfallende Jahrringe wurden in dieser Arbeit an über einem Drittel der im Labor untersuchten lebenden Buchenäste festgestellt; auch weitere Autoren (z.B. GELINSKY (1933)) konnten dies bei Buche beobachten. Jedoch wurde bei der Untersuchung der Eichenäste im Rahmen dieser Arbeit kein Hinweis auf ausfallende Jahrringe gefunden, was im Einklang mit den Ergebnissen anderer Autoren (z.B. HUBER et al. (1965), LÖHR (1969), HANECA (2005)) steht.

Die Fähigkeit der Buchenäste, über einen gewissen Zeitraum am Stamm zu persistieren ohne nennenswerten Zuwachs zu leisten, könnte so neben der zuvor diskutierten höheren Schattentoleranz ein weiterer Grund für die vergleichsweise ausgeprägte Fähigkeit der Baumart Buche zur Tiefenerschließung sein.

Abbildung 52 verdeutlicht schließlich die Unterschiede der in dieser Arbeit erstellten Kronenansatzhöhenmodelle und den von NUTTO (1999) (Eiche) sowie LANGSHAUSEN (2009) (Buche) parametrisierten Kronenansatzhöhenmodellen. Während sich das in dieser Arbeit erstellte Modell für die Baumart Eiche recht gut in Einklang mit dem von NUTTO (1999) parametrisierten Modell bringen lässt (wenngleich die errechneten Kronenansatzhöhen für die älteren Eichen deutlich über den Kronenansatzhöhen liegen, welche sich unter Einsatz des von SPIECKER (1991) entwickelten Modells ergeben), zeigen sich für die Modelle der Baumart Buche Unterschiede von bis zu 3 Metern, wobei das in dieser Arbeit erstellte Modell im Vergleich zu dem von LANGSHAUSEN (2009) parametrisierten Modell immer eine höhere Kronenansatzhöhe prognostiziert. Trotzdem kann konstatiert werden, dass auch der Vergleich der Kronenansatzhöhenmodelle von NUTTO (1999) und LANGSHAUSEN (2009) die schnellere Kronenansatzhöhenverschiebung der Baumart Eiche, wie sie auf Grundlage der in dieser Arbeit erstellten Modelle beobachtet wurde, bestätigt.

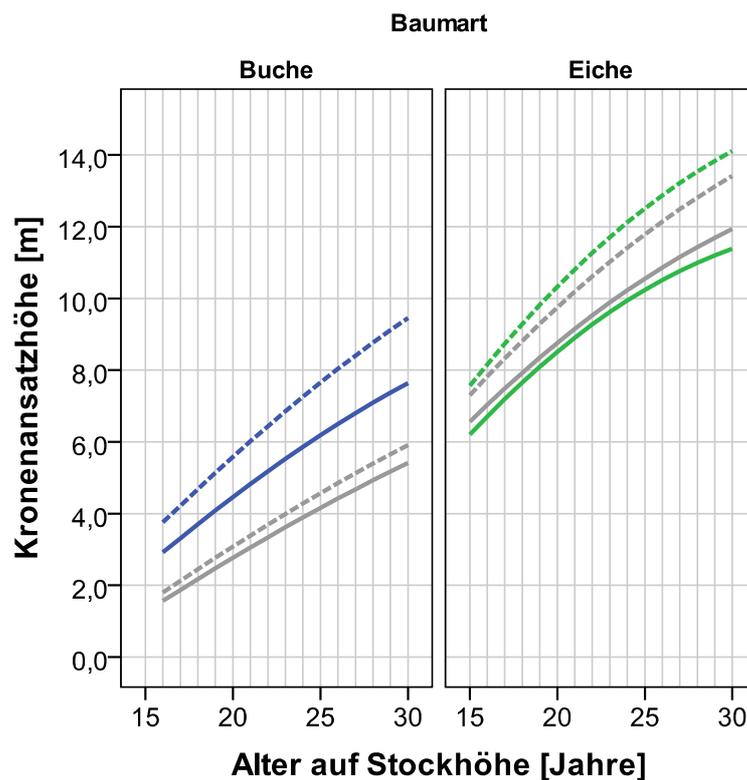


Abbildung 52: Darstellung der Kronenansatzhöhe in Abhängigkeit des Alters auf Stockhöhe von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) auf Grundlage des in dieser Arbeit erstellten Modells sowie auf Grundlage der von LANGSHAUSEN (2009) (Buche: graue Signatur) und NUTTO (1999) (Eiche: graue Signatur) für Radialzuwachsszenarien von 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linie) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linie) und eine Oberhöhenbonität von $SI_{10}=8m$.

5.3.2.2 EINZELASTEBENE

5.3.2.2.1 ASTSTATUS

Ein Modell zur Prognose des Aststatus‘ „lebend“ konnte an die vorliegenden empirischen Datensätze beider Baumarten mit gutem Erfolg angepasst werden. In Anlehnung an KINT et al. (2010) wurden dazu die unabhängigen Variablen Astdurchmesser, vertikale Astposition in der Baumkrone (hier: $Alter_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung) sowie die Baumhöhe und der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs der letzten fünf Lebensjahre des Baumes (von 2004 bis einschließlich 2008) gewählt. Zusätzlich wurde noch das $Alter_{1,3}$ sowie der Astansatzwinkel als unabhängige Variablen hinzugezogen, wobei sich die Variable Astansatzwinkel als nicht signifikant zur Verringerung der Gesamtstreuung beitragend erwies. Der Gesamtanteil der durch das Modell korrekt vorhergesagten Gruppenzugehörigkeiten liegt bei 88% (Buche) beziehungsweise 90,7% (Eiche), wobei im Zuge einer

Trennwertanalyse (vgl. HEIN & WEISKITTEL (2010)), ein Trennwert von 0,81 (Modell der Baumart Buche), bzw. 0,65 (Modell der Baumart Eiche) ermittelt wurde. Werden die Vorzeichen der Parameterschätzer umgekehrt, kann das erstellte Modell als ein Modell zur Beschreibung der Astmortalität interpretiert werden (vgl. KINT et al. (2010)).

Das Modell prognostiziert bei beiden Baumarten *ceteris paribus* eine abnehmende Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmender Baumhöhe sowie zunehmendem Alter_{1,3}. Dieses Ergebnis beschreibt zunächst den Prozess der Astmortalität mit zunehmender Bestandesentwicklung und steht sowohl in Übereinstimmung mit dem erstellten Kronenansatzhöhenmodell wie auch mit den Ergebnissen des von KINT et al. (2010) prognostizierten Modells zur Prognose der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes. Wie schon in Kapitel 5.3.2.1.1 ausgeführt, kann dieser Prozess durch die durch zunehmende („asymmetrische“) Beschattung induzierte Astautonomie erklärt werden. In Verbindung beider Variablen ergeben sich höhere Wahrscheinlichkeiten für die Existenz eines lebenden Astes bei geringeren Standortsbonitäten. Auch dies wird durch das Kronenansatzhöhenmodell dieser Arbeit sowie anderer Autoren (z.B. SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009)) abgebildet und bestätigt somit nochmals die Bedeutung der Standortsgüte für den Fortschritt der Astreinigung. Auch der Effekt des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses der Jahre 2004 bis einschließlich 2008, welcher in Anlehnung an KINT et al. (2010) als Effekt der Einzelbaumvitalität interpretiert werden kann, wirkt sich unter sonst gleichen Bedingungen erhöhend auf die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes aus. Auch dies steht im Einklang mit den Resultaten des Kronenansatzhöhenmodells sowie des Modells zur Prognose des Aststatus‘, welches von KINT et al. (2010) parametrisiert wurde. Auch hier können die Interpretationen, welche bei der Diskussion des Kronenansatzmodells in Kapitel 5.3.2.1.1 zur Rolle des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses auf 1,3m Schafthöhe ausgeführt wurden, zur Erklärung herangezogen werden.

Des Weiteren werden vom Modell zunehmende Wahrscheinlichkeiten der Existenz eines lebenden Astes mit zunehmendem Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung prognostiziert. Das Modell bescheinigt somit unter sonst gleichen Bedingungen jüngeren Ästen aus höheren Kronenbereichen im Vergleich zu älteren, tiefer ansetzenden Ästen eine höhere Wahrscheinlichkeit, bei der Datenaufnahme als „lebend“ aufgenommen worden zu sein, was biologisch plausibel zu bewerten ist und in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von KINT et al. (2010) steht. Weiterhin wird starken Ästen im Vergleich zu Ästen geringerer Durchmesser unter sonst gleichen Bedingungen eine größere Wahrscheinlichkeit, bei der Datenaufnahme lebend vorgefunden worden zu sein, prognostiziert. In Verbindung mit den Resultaten

und Interpretationen der Modelle zur Prognose der Astlänge, des Astdurchmessers, des Astradialzuwachses und des Astansatzwinkels kann resümiert werden, dass der Astdurchmesser, wie auch von KINT et al. (2010) beschrieben, Aufschluss über die „Einzelastvitalität“ gibt. Starke Äste sind ausweislich der erstellten Modelle tendenziell mit einem steileren Astansatzwinkel ausgestattet, was ihnen erlaubt, über vergleichsweise längere Zeit Anschluss zum Kronendach und damit zu vorteilhaften Lichtbedingungen zu halten. Des Weiteren sind sie tendenziell länger, was zusätzlich dazu beiträgt, über vergleichsweise längere Zeit von optimalen Lichtbedingungen zu profitieren. Damit besitzen Äste größeren Durchmessers im Vergleich zu schwächeren Ästen unter sonst gleichen Bedingungen eine bessere Ausgangssituation und eine bessere soziale Stellung in der Astpopulation eines Baumes und somit unter gleichen Bedingungen eine höhere Wahrscheinlichkeit, während der Feldaufnahme als lebend aufgenommen worden zu sein.

Im Baumartenvergleich ergab sich außer einem signifikanten Unterschied im Interzept der beiden Modelle ein signifikanter Unterschied in der Steigung der Variable $\text{Alter}_{1,3}$, $\text{Alter}_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung sowie durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008.

Mit der Variable $\text{Alter}_{1,3}$ kann der zeitliche Einfluss auf den Astmortalitätsprozess bestimmt werden. Dabei wirkt sich diese Variable fast dreimal so stark im Modell der Baumart Eiche auf die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes unter sonst gleichen Voraussetzungen als im Modell der Baumart Buche aus. Auf Grundlage dieses Modells kann der Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche ein signifikant schnellerer Astreinigungsprozess zugesprochen werden, ein Befund, der mit der unterschiedlichen Schattentoleranz der beiden Baumarten sowie den Resultaten des Vergleichs der Kronenansatzmodelle (vgl. Kapitel 5.3.2.1.1) gut in Einklang gebracht werden kann.

Des Weiteren scheint die vertikale Astposition in der Krone des Baumes eine signifikant größere Rolle im Modell der Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen zu spielen. Diese Aussage ist inhaltlich konsistent mit dem erstellten Kronenansatzhöhenmodell und ist vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Schattertragnisses beider Baumarten biologisch plausibel.

Weiterhin spielt der durchschnittliche Radialzuwachs der letzten fünf Jahre als Proxy für die kurzfristige Vitalitätstendenz eines Baumes eine signifikant größere Rolle im Modell der Baumart Buche im Vergleich zum Modell der Baumart Eiche. In den Analysen von KINT et al. (2010), welche

denselben Modelltypus mit ähnlichen Einflussvariablen verwendeten, um den Astreinigungsprozess von Buche und Eiche zu modellieren, konnte für die Baumart Buche kein signifikanter Beitrag des durchschnittlichen Radialzuwachses der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe nachgewiesen werden, während dieser Regressor im Modell der Baumart Eiche indes einen signifikanten Beitrag zur Klärung der Gesamtstreuung beitrug. Obgleich das vorliegende Ergebnis diesen Befunden widerspricht, kann durchaus inhaltliche Konsistenz mit Resultaten anderer Arbeiten festgestellt werden. So beschreibt NUTTO (1999) für die von ihm untersuchten Eichenbestände einen sehr geringen Einfluss des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses auf die Kronenansatzhöhe und begründet dies mit der ausgesprochenen Lichtbedürftigkeit dieser Baumart. Dennoch steht dieses Ergebnis in gewissem Widerspruch zu den Resultaten des Kronenansatzhöhenmodells, welches unter Einspielung der zuvor modellierten standortsspezifischen Alters- Höhenbeziehung implizit eine etwas stärkere Reaktion der Kronenansatzhöhenverschiebung der Baumart Eiche bei Veränderung des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses prognostizierte. Jedoch muss an dieser Stelle nochmals dezidiert herausgestellt werden, dass die Variable $Alter_{1,3}$ nicht in das Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe eingeschlossen werden konnte und möglicherweise aus diesem Grund besagte inhaltliche Diskrepanzen auftraten.

Abbildung 53 verdeutlicht den Unterschied des Astreinigungsprozesses von Buche und Eiche. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes für verschiedene Astdurchmesser unter sonst gleichen Bedingungen. Zunächst fällt der abrupte Verlauf des Astreinigungsprozesses der Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche auf, die einen eher allmählichen Astreinigungsverlauf aufweist; ein Ergebnis, welches sich in Übereinstimmung mit den Resultaten von KINT et al. (2010) in Übereinstimmung bringen lässt. Dabei variiert bei beiden Baumarten die Astüberlebenswahrscheinlichkeit mit dem Astdurchmesser, wobei Ästen auf einer Astansatzhöhe von 6 Metern mit einem Durchmesser von 5 Millimetern ein wahrscheinliches Absterben im Alter von 14 (Buche), bzw. 11 (Eiche) und Ästen derselben Astansatzhöhe mit einem Durchmesser von 50 Millimetern ein wahrscheinliches Absterben im $Alter_{1,3}$ von 31 (Buche) bzw. 19 (Eiche) prognostiziert wird.

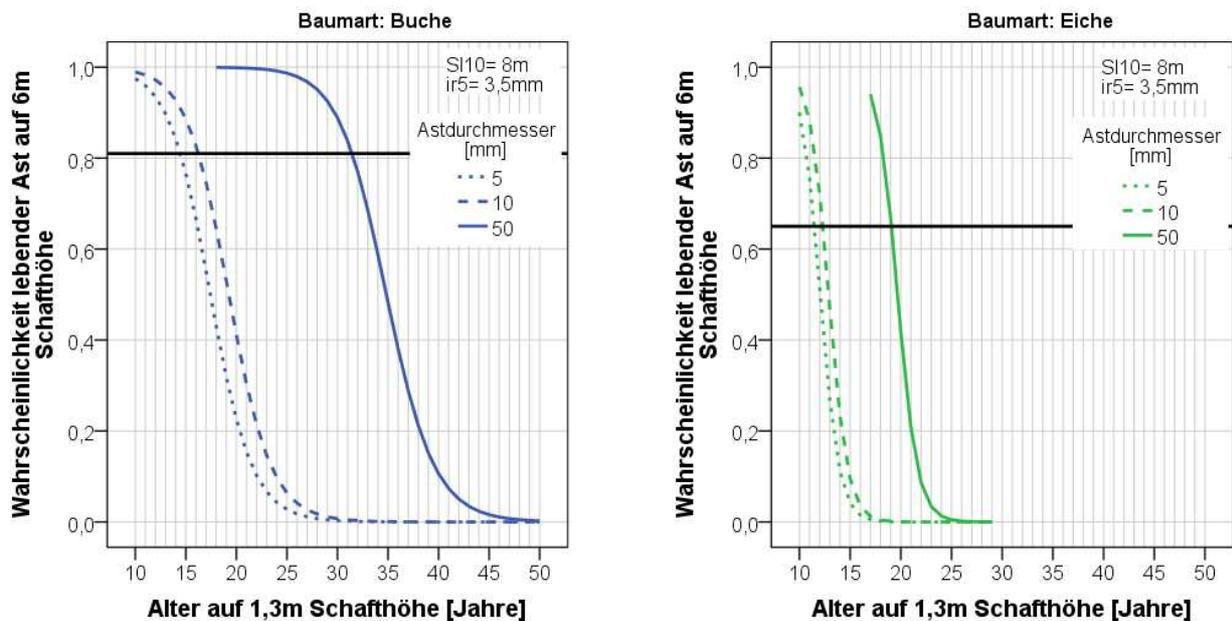


Abbildung 53: Darstellung der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes auf 6m Schafthöhe für verschiedene Astdurchmesser bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe von 3,5mm und bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=8m$ für Buche (links, Signatur: blau) und Eiche (rechts, Signatur: grün). Trennwert (horizontale Linie): Buche 0,81, Eiche: 0,65.

Dabei hat die Eiche eine 0,12- fache *Chance* gegenüber der Buche, unter gleichen Bedingungen einen lebenden Ast aufzuweisen; beziehungsweise besitzt die Buche eine $1/0,12= 8,1$ - fache *Chance* gegenüber der Eiche einen lebenden Ast unter gleichen Bedingungen aufzuweisen. Mit Hilfe der von ZHANG & YU (1998) vorgeschlagenen Formel, welche im Detail in Kapitel 2.12.2.3 beschrieben ist, berechnet sich das Risk- Ratio auf 0,303, was bedeutet, dass die untersuchten Eichen gegenüber den untersuchten Buchen eine 0,3- fache Wahrscheinlichkeit besitzen, einen lebenden Ast unter gleichen Bedingungen aufzuweisen, beziehungsweise eine um 70% geringere Wahrscheinlichkeit. Dies unterstreicht nochmals die Feststellung der schnelleren Astreinigung der Baumart Eiche.

5.3.3 ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT

5.3.3.1 EINZELBAUMBEBENE

5.3.3.1.1 ASTFREIE SCHAFTLÄNGE

Das erstellte Modell zur Vorhersage der astfreien Schaftlänge kann für die Daten der Baumart Eiche alleine mit Hilfe der unabhängigen Variable Baumhöhe 73% der Gesamtstreuung erklären und schätzt die Länge des astfreien Schaftes bis auf eine Ausnahme mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ Metern. Im

Modell der Baumart Buche konnte neben der unabhängigen Variable Baumhöhe noch ein signifikanter negativer Einfluss der Variablen Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe festgestellt werden. Beide Variablen können zusammen 77% der Gesamtstreuung erklären, wobei die Variable Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe nur noch zu etwa 5% zur Klärung der Gesamtstreuung beiträgt.

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen längere astfreie Schäfte mit zunehmender Baumhöhe, was zunächst auf den fortschreitenden Wachstumsprozess des Baumes zurückzuführen ist. In Verbindung mit dem Alter, welches dem in dieser Arbeit erstellten Höhenmodell entnommen wurde, schätzt das Modell bei gleichem Alter_{1,3} längere astfreie Schäfte für Bäume, welche auf vergleichsweise besseren Standorten stocken. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der Untersuchungen von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) und ist inhaltlich konsistent mit dem in dieser Arbeit erstellten Kronenansatzhöhenmodell, welches einen beschleunigten Astmortalitätsprozess auf besseren Standorten prognostiziert. Sobald Äste abgestorben sind, können der Astzersetzungsprozess sowie die Astüberwallung einsetzen. Damit ist dieses Ergebnis als biologisch plausibel zu beurteilen.

Weiterhin wird vom Modell für die Baumart Buche ein negativer Einfluss des Schaftdurchmessers auf die Länge des astfreien Schaftes dargestellt. Wird wiederum das Höhenwachstumsmodell und die damit verbundenen standortsspezifischen Alters- Höhen- Relationen in das Modell eingesetzt, prognostiziert es unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen einen kürzeren astfreien Schaft für Bäume höheren Radialzuwachses. Auch diese Aussage ist konsistent mit den Ergebnissen der Modellierung der astfreien Schaftlänge von SPIECKER (1991), NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009) und steht desgleichen in inhaltlichem Einklang mit dem in dieser Arbeit erstellten Kronenansatzhöhenmodell, welches desgleichen eine tiefer ansetzende Krone für Bäume höheren Radialzuwachses unter sonst gleichen Bedingungen prognostiziert. Da die Abfolge der beiden Prozesse „Astmortalität“ sowie „Astüberwallung“ determiniert ist, ist auch dieses Ergebnis als biologisch plausibel zu bewerten.

Im Baumartenvergleich ergab sich neben dem unterschiedlichen Einfluss des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe ein signifikanter Unterschied in der Steigung der Variable Baumhöhe. Unter sonst gleichen Bedingungen besitzt die Baumart Eiche somit tendenziell einen kürzeren astfreien Schaft, obgleich das Kronenansatzmodell sowie das Modell zur Prognose des Aststatus‘ für die Baumart Eiche einen rascheren Astmortalitätsprozess vorhersagt. Damit können schon auf Einzelbaumebene die Einflüsse

der unterschiedlich rasch voranschreitenden Astzersetzungsprozesse (siehe auch Kapitel 1.2.7.9, Kapitel 4.3., Kapitel 5.3.3.2.1 und Kapitel 5.3.3.2.2) deutlich gemacht werden. Dennoch muss das erstellte Modell zur Prognose der astfreien Schaftlänge kritisch betrachtet werden, denn trotz seiner vergleichsweise hohen Anpassung birgt es einige Schwächen:

Aufgrund der notwendigen Transformierung des Regressanden sowie der ungleichen Regressionsgleichungsformulierungen lassen sich die Modelle zur Prognose der Baumhöhe, der Kronenansatzhöhe und der astfreien Schaftlänge im Gegensatz zu Modellen anderer Autoren nur schlecht miteinander verschneiden.

Die beobachtete nicht- lineare Entwicklung der astfreien Schaftlänge in Abhängigkeit der Baumhöhe sowie in Abhängigkeit des Schaftdurchmessers in 1,3m Höhe steht im Gegensatz zu den Beobachtungen von NUTTO (1999), HEIN (2004) und LANGSHAUSEN (2009), welche in ihren Modellen zur Schätzung der astfreien Schaftlänge eine lineare Beziehung zwischen der Ansatzhöhe des untersten nicht überwallten Totastes und den genannten unabhängigen Variablen unterstellten. Der aus dem entwickelten Modell zur Schätzung der astfreien Schaftlänge entstehende Verlauf der Kurven (vgl. Abbildung 35) muss als biologisch unplausibel bewertet werden.

Es steht zu vermuten, dass bei einer größeren Anzahl von weiteren Beobachtungen, welche sich auch auf Bäume größerer Baumhöhe erstreckten, der Zusammenhang zwischen astfreier Schaftlänge und $\text{Alter}_{1,3}$, bzw. Baumhöhe eine sigmoidale Form annehmen würde, wie es die Darstellung der von LANGSHAUSEN (2009) aufgenommenen Originaldaten in dessen Arbeit annehmen lässt. Wie in Kapitel 2.1.1.1.2 diskutiert, wird zum Beispiel auch bei anderen Wachstumsgrößen wie dem Kronendurchmesser ein theoretisch sinnvoller sigmoidaler Zusammenhang mit dem ihn beeinflussenden Kenngrößen (hier: Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe) diskutiert (z.B. DAWKINS (1963)), wobei jedoch Einigkeit darin besteht, das „Zwischenstück“ dieses Zusammenhangs der Praktikabilität wegen als linear interpretieren zu können, wenn Extremwerte aus der Untersuchung ausgeschlossen werden. Da der Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit auf der Astreinigungphase liegt, wurden nur wenige Daten von Bäumen der Endphase der Astreinigung bzw. zu Beginn der Dimensionierungsphase aufgenommen. Es steht zu vermuten, dass der Datensatz sowohl der Baumart Buche als auch der Baumart Eiche zwar das globale Minimum des Zusammenhangs zwischen astfreier Schaftlänge und Baumhöhe bzw. Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe enthält; ob beide Datensätze jedoch auch den Wendepunkt des Zusammenhangs aufweisen, ist unklar. Mit Sicherheit enthalten sie jedoch

nicht das lokale oder globale Maximum. Da dem Prozess der Astüberwallung der Prozess des Astabsterbens vorgeschaltet ist und dieser wiederum von der jeweiligen Höhenentwicklung abhängig ist, ist es jedoch verständlich, weswegen die empirischen Daten einen nichtlinearen Zusammenhang mit den Variablen Baumhöhe und $\text{Alter}_{1,3}$ aufweisen.

Es konnte zwar ein logarithmisch transformiertes Regressionsmodell an die Daten angepasst werden; jedoch muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass der Verlauf der in Kapitel 4.3.1.1.2. dargestellten Zusammenhänge vor allem mit zunehmendem Alter mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht den in der Praxis zu beobachtenden und auch nicht den in zahlreichen Modellen unterstellten Verlauf des Zusammenhangs zwischen astfreier Schaftlänge und den unabhängigen Variablen Baumhöhe, Baumalter und Schaftdurchmesser abbildet, sondern dem Datenumfang sowie der Datenspreitung der vorliegenden Arbeit geschuldet ist. Obgleich also die Wirkrichtung der Vorzeichen der Parameterschätzer biologisch plausibel ist, muss konstatiert werden, dass der durch die logarithmische Transformation des Regressanden entstandene Verlauf der Entwicklung der astfreien Schaftlänge mit zunehmendem $\text{Alter}_{1,3}$ (vgl. Abbildung 35) keine biologische Plausibilität besitzt.

5.3.3.2 EINZELASTEBENE

5.3.3.2.1 ASTÜBERWALLUNGSDAUER

Die Astüberwallungsdauer wurde in dieser Arbeit in Anlehnung z.B. an HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) mit Hilfe der Variablen „Astdurchmesser“, „durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit“ sowie der Variable „totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns“ prognostiziert. Die Hinzunahme der Variable Astansatzwinkel trug weder im Modell der Baumart Buche noch im Modell der Baumart Eiche zu einer Verringerung der Reststreuung bei. Das erstellte Modell erklärt 25,5% der Gesamtstreuung der empirischen Daten der Baumart Buche und knappe 38% der Gesamtstreuung der empirischen Daten der Baumart Eiche. Verursachend für die geringe Anpassung dürfte zum einen der relativ geringe Stichprobenumfang, welcher maßgeblich nur die Bäume der Höhenstufe 3 umfasste, zum anderen die inhomogenen Voraussetzungen des Datenmaterials sein, welches von Bäumen der Kraft'schen Klassen 1 bis 4 stammt. Abgesehen davon ist davon auszugehen, dass gerade die Überwallungszeit, welche von der Dimension der zu überwallenden horizontalen und vertikalen Distanz abhängt, stark von biotischen und abiotischen Faktoren beeinflusst wird, welche diese Dimensionen steuern und nicht im Zuge dieser

Untersuchung aufgenommen werden konnten. So konnte HEIN (2008) bei der Modellierung der Überwallungsdauer von Buchenästen ebenfalls lediglich 17,6% der Gesamtstreuung erklären.

Bedeutendster Regressor in den Modellen beider Baumarten ist die Variable Astdurchmesser, welche zu knappen 17% (Buche) bzw. 18% (Eiche) zur Klärung der Gesamtstreuung beiträgt. Die Variable „durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe“ konnte zusätzliche 10% (Buche) bzw. 16% (Eiche) der Gesamtstreuung klären. Der totasthaltige Teil des asthaltigen Kerns trug nur noch im Modell der Baumart Eiche zu einer Verringerung der Gesamtstreuung bei.

Das Modell schätzt unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen eine Zunahme der Astüberwallungsdauer mit zunehmendem Astdurchmesser. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den Ergebnissen von z.B. TAKEUCHI (1981), PETRUNCINO et al. (1997), HEIN (2004), HEIN (2008) und HEIN & SPIECKER (2007) und ist vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.2.6.1. diskutierten Zusammenhänge als biologisch plausibel zu beurteilen. Des Weiteren prognostiziert das Modell eine Verkürzung der Astüberwallungsdauer mit zunehmendem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit. Auch dies kann durch Ergebnisse von z.B. KELLOMÄKI et al. (1989), MÄKINEN (2002), HEIN (2004), HEIN & SPIECKER (2007) und HEIN (2008) bestätigt werden und ist ebenfalls als biologisch plausibel zu beurteilen. Weiterhin prognostiziert das Modell der Baumart Eiche eine Verlängerung der Astüberwallungsdauer mit zunehmendem Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns. Der Radius des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns hängt vom Astansatzwinkel ab sowie davon, auf welche Aststummellänge der Ast durch biotische oder mechanische Faktoren verkürzt wird, bevor dieser durch das sekundäre Dickenwachstum des Baumes umschossen wird. BUTIN & KOWALSKI (1983a) streichen den großen Einfluss des Astdurchmessers auf die Zeit vom Astmortalitätsereignis bis zur vollständigen Zersetzung eines Eichenastes heraus (vgl. Kapitel 1.2.7.10). Maßgeblich beeinflussend ist die fortschreitende Verkernung der Eichenäste, welche den Zersetzungsprozess erschwert. Während Äste von Durchmessern unter 2 Zentimetern aufgrund der sie auf ganzer Länge erfassenden Weißfäule an jeder beliebigen Stelle abgebrochen werden können, brechen bei starken, verkernten Ästen von der Astspitze her nur noch nach und nach Teile des Astes ab. Am langsamsten verläuft der Vermorschungsprozess dabei an der Astbasis, wo das Kernholz besonders stark ausgebildet ist. Fällt der Ast schließlich ab, hinterlässt er am Stamm ein Astloch, welches nur langsam überwallt werden kann (BUTIN & KOWALSKI (1983a)). Somit kann durch Verringerung der Astdurchmesser durch Bewirtschaftungsmaßnahmen gleich ein doppelter Beitrag zur schnelleren Überwallung von Ästen

geleistet werden, auch wenn das Abbrechen der Äste zusätzlichen zufälligen Faktoren, welche nicht durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden können, unterliegt. Demgegenüber brechen Äste der Buche nach Beobachtungen von BUTIN & KOWALSKI (1983b) besonders leicht unmittelbar an der Astbasis ab und hinterlassen eine glatte Abbruchstelle, die schnell überwältigt werden kann. Dass der totasthaltige Teil des asthaltigen Kerns im Modell der Baumart Buche keinen signifikanten Beitrag zur Klärung der Gesamtstreuung beiträgt, könnte auf diesen schnellen Zersetzungsprozess der Äste hinweisen, welcher somit nur einen recht geringen totasthaltigen Teil des asthaltigen Kerns hinterlässt. Dem steht jedoch entgegen, dass diese Variable in Untersuchungen von HEIN (2008) zur Überwallungsdauer von Buchenästen signifikant zur Erklärung der Gesamtstreuung der Überwallungszeit beitrug. Somit ist zu vermuten, dass dieses Ergebnis dem geringen Umfang des untersuchten Materials und dessen großer Streuung geschuldet ist.

Der Radialzuwachs wirkt implizit in gleich dreifacher Weise auf die Astüberwallung ein: zunächst existiert das zuvor diskutierte direkte Einwirken auf die Astüberwallung, des Weiteren besteht jedoch ein gegensätzlicher Einfluss auf den Astradialzuwachs und somit auf den Astdurchmesser³⁴ und schlussendlich, vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Verkernungszustände starker und schwacher Äste, beeinflusst der Radialzuwachs indirekt auch die Dimension des totasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns.

Im Baumartenvergleich fand sich neben der im Modell der Baumart Buche nicht berücksichtigten Variable „totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns“ ein signifikanter Unterschied im Interzept der beiden Modelle. Dabei benötigt die Baumart Eiche tendenziell längere Zeit für die Astüberwallung unter sonst gleichen Bedingungen. Aufgrund der zuvor diskutierten und in Kapitel 1.2.7.10 ausführlich beschriebenen unterschiedlichen Zersetzungseigenschaften der Äste erscheint dies plausibel und wird auch so von KINT et al. (2010) bestätigt.

5.3.3.2 WAHRSCHEINLICHKEIT DER ASTÜBERWALLUNG

Das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung ist thematisch eng mit dem Modell zur Prognose der Astüberwallungsdauer verbunden. Zwar ließ sich durch die Schätzung der Astüberwallungsdauer die Tendenz erkennen, dass die Baumart Buche unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen eine raschere Astüberwallung im Gegensatz zur Baumart Eiche aufweist.

³⁴ Die Verfasserin ist sich dabei bewusst, dass die Kausalrichtung $\text{Radialzuwachs}_{1,3} = f(\text{Astdurchmesser} / \text{Astradialzuwachs})$ lautet.

Aufgrund des recht geringen Stichprobenumfangs überwallter Äste sowie der großen Streuung ist diese Aussage jedoch noch mit Unsicherheiten behaftet. Aus diesem Grund wurde ein Modell zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit erstellt. In dieses Modell flossen im Gegensatz zum Modell zur Abschätzung der Astüberwallungsdauer auch die Daten nicht überwallter Totäste ein, was den Stichprobenumfang beträchtlich erhöhte. Des Weiteren erlaubt die hohe Prognosegenauigkeit des erstellten Modells fundiertere Aussagen. Da relevante Einflussvariablen auf die Astüberwallung jedoch schon im Modell zur Abschätzung der Astüberwallungsdauer identifiziert wurden, wurde darauf verzichtet, das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung zunächst baumartenspezifisch zu parametrisieren.

Das erstellte Modell prognostiziert 88,3% der Gruppenzugehörigkeiten in korrekter Weise. Dabei steigt die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung mit zunehmender Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis des Astes, was sich auf den fortschreitenden Zersetzungsprozess des Astes bezieht und somit biologisch plausibel ist. Zudem steigt die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung mit zunehmendem durchschnittlichem Radialzuwachs während der (bisherigen) Überwallungszeit. Dieses Ergebnis besitzt funktionalen Charakter und wurde in Kapitel 5.3.3.2.1 ausführlich diskutiert. Ihm ist desgleichen biologische Plausibilität zuzuschreiben. Mit zunehmendem Astdurchmesser hingegen verringert sich die Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung. Auch dieses Ergebnis ist konsistent mit dem in Kapitel 5.3.3.2.1 diskutierten Modell zur Prognose der Astüberwallungsdauer.

Hier ergibt sich im Baumartenvergleich ein negativer Einfluss der Baumart Eiche auf die Überwallungswahrscheinlichkeit (negatives Vorzeichen des Parameterschätzers). Unter sonst gleichen Bedingungen werden vom Modell geringere Astüberwallungswahrscheinlichkeiten für die Baumart Eiche vorausgesagt, womit sich die Aussage des Baumartenvergleichs für das Modell zur Prognose der Astüberwallungsdauer bestätigen lässt. Dabei besitzt die Eiche gegenüber der Buche eine 0,4 - fache *Chance* unter gleichen Voraussetzungen einen Ast zu überwallen, beziehungsweise besitzt die Buche eine $1/0,4 = 2,5$ - fache *Chance* gegenüber der Eiche einen Ast unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen zu überwallen. Mit Hilfe der von ZHANG & YU (1998) vorgeschlagenen Formel, welche im Detail in Kapitel 2.12.2.3 beschrieben ist, berechnet sich das Risk - Ratio auf 0,5. Dieser Wert sagt aus, dass die untersuchten Eichen gegenüber den untersuchten Buchen eine 0,5 - fache *Wahrscheinlichkeit* besitzen, einen Ast unter gleichen Bedingungen zu überwallen, beziehungsweise eine 50% geringere Wahrscheinlichkeit, was mit dem langsameren Zersetzungsprozess der toten Eichenäste zu erklären ist, welcher maßgeblich durch ihre Verkernung verursacht wird (BUTIN

& KOWALSKI (1983a)) und was nochmals den Befund der schnelleren Astreinigung der Baumart Eiche unterstreicht.

BUTIN & KOWALSKI (1983a) empfehlen eine möglichst frühzeitige Trockenastung der Eiche, um die Überwallungszeit der Totäste zu verkürzen. Diese Empfehlung muss auf Grundlage der vorliegenden Analysen bekräftigt werden.

5.3.3.2.3 *RADIUS DES ASTHALTIGEN KERNS*

Der Radius des asthaltigen Kerns konnte mit den Variablen Astalter, Astdurchmesser, durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs während der Lebenszeit des Astes sowie dem Astansatzwinkel geschätzt werden. Dabei konnten für die empirischen Daten der Baumart Buche etwa 81% der Gesamtstreuung, für die empirischen Daten der Baumart Eiche knappe 63% der Gesamtstreuung erklärt werden. Werden die partiellen Bestimmtheitsmaße der einzelnen Variablen beider Modelle miteinander verglichen, kann erkannt werden, dass die gewählten Variablen zu auffällig unterschiedlichen Anteilen zur Verringerung der Gesamtstreuung beitragen. So ist die Variable Astalter der bedeutendste Regressor im Modell der Baumart Buche, trägt jedoch im Modell der Baumart Eiche lediglich mit 7% zur Verringerung der Gesamtstreuung bei. Hingegen kann der Astdurchmesser im Modell der Baumart Eiche den größten Anteil der unerklärten Reststreuung erklären, obgleich diese Variable im Modell der Baumart Buche nur noch zu etwa 4% zur Klärung der Gesamtstreuung beiträgt. Das Modell schätzt unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen einen größeren asthaltigen Kern mit zunehmendem Astalter. Diese Variable bezieht sich auf die Länge des Zeitraums, in welchem der lebende Ast von dem ihn umgebenden Holzkörper umschlossen wird. Eine Zunahme des Radius des asthaltigen Kerns mit zunehmendem Astalter ist somit biologisch plausibel. Des Weiteren schätzt das Modell eine Zunahme des Radius' des asthaltigen Kerns mit zunehmendem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs des Schaftes. Das Ergebnis bestätigt die Resultate der Modelle zur Schätzung des Radius' des asthaltigen Kerns z.B. von HEIN (2004) oder HEIN (2008) und besitzt zunächst funktionalen Charakter. Mit erhöhtem Radialzuwachs während der Lebenszeit des Astes verwächst eine zunehmende Distanz des Grünastes mit dem ihn umgebenden Holzkörper. Wird diese Variable als Proxy für die Einzelbaumvitalität während der jeweiligen Astlebensdauer betrachtet, bestätigt das Ergebnis implizit das Resultat des Modells zur Prognose des Aststatus', welches aussagt, dass die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes auf gleicher Astansatzhöhe und unter sonst gleichen Bedingungen mit zunehmendem durchschnittlichen Radialzuwachs ansteigt. Wie zuvor

beschrieben, nimmt dann der Radius des asthaltigen Kerns mit jedem zusätzlichen Astlebensjahr um 0,3 Zentimeter (Buche) bzw. 0,5 Zentimeter (Eiche) zu.

Dabei hängt das Ausmaß des Radius' des asthaltigen Kerns jedoch auch vom Astdurchmesser ab. Mit zunehmendem Astdurchmesser wird vom Modell eine Zunahme des Radius' des asthaltigen Kerns prognostiziert. In der Tat ergaben separat durchgeführte Regressionsanalysen mit Hilfe derselben Regressoren, dass der Astdurchmesser bei keiner der beiden Baumarten einen signifikanten Einfluss auf den Radius des lebendasthaltigen Teils des asthaltigen Kerns besaß. Hier ist vor allem das Astalter die entscheidende Variable. Gleichwohl besitzt der Astdurchmesser bei beiden Baumarten einen signifikanten Einfluss auf den totasthaltigen Teil des asthaltigen Radius.

Unter der Annahme sonst gleicher Bedingungen vergrößert sich der Radius des asthaltigen Kerns bei der Baumart Buche pro Zentimeter Astdurchmesser um 0,6 Zentimeter, bei der Baumart Eiche sogar um 1,07 Zentimeter. Als Erklärung wären eine höhere Stabilität von Totästen mit größerem Durchmesser hinsichtlich des Abbrechens vom Schaft sowie eine längere Dauer des Zersetzungsprozesses im Vergleich zu Ästen mit weniger großem Astdurchmesser denkbar. Gerade bei der Baumart Eiche spielt hier auch die mit steigendem Astdurchmesser zunehmende und damit den Zersetzungsprozess verlangsamende Verkernung (BUTIN & KOWALSKI (1983a)) eine Rolle und könnte somit auch erklären, weswegen diese Variable im Modell der Baumart Eiche um so viel mehr zur Erklärung der unerklärten Reststreuung im Vergleich zum Modell der Baumart Buche beiträgt. Insofern kann diesem Ergebnis biologische Plausibilität zugesprochen werden. Weiterhin wird vom Modell ein zunehmender Radius des asthaltigen Kerns mit zunehmendem Astansatzwinkel vorhergesagt. Dieses Ergebnis ist wiederum konsistent mit den Ergebnissen von HEIN (2004) und vor dem Hintergrund trigonometrischer Zusammenhänge als biologisch plausibel zu beurteilen.

Der Baumartenvergleich ergab neben dem unterschiedlichen Einfluss der Variable Astansatzwinkel, welcher nur im Modell der Baumart Buche einen signifikanten Beitrag zur Klärung der Reststreuung leistete, einen signifikanten Unterschied in der Steigung der Variablen Astdurchmesser. Damit besitzt die Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen einen tendenziell breiteren Radius des asthaltigen Kerns. Aufgrund der unterschiedlichen Holzzersehungseigenschaften beider Baumarten ist dieses Ergebnis als biologisch plausibel zu beurteilen. Ähnlich wie schon in Kapitel 5.3.3.2.1 diskutiert, besitzt der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs des Schaftes auch in diesem Zusammenhang einen mehrfachen Einfluss auf den Radius des asthaltigen Kerns. Zum einen existiert der direkte Einfluss

durch die während der Lebenszeit des Astes mit dem ihn umgebenden Holzkörper verwachsene zunehmende Distanz. Da ausweislich des Astradialzuwachsmodells und des Astdurchmessermodells der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs des Schaftes auch positiven Einfluss auf den Astradialzuwachs bzw. den Astdurchmesser ausübt, existiert auch über diesen Zusammenhang ein Einfluss des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses auf den Radius des asthaltigen Kerns. Zum Dritten besteht ein zusätzlicher positiver Zusammenhang zwischen durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs des Schaftes und dem Astansatzwinkel, welcher bei Zunahme den Radius des asthaltigen Kerns der Baumart Buche vergrößert. Soll also der Radius des asthaltigen Kerns möglichst gering gehalten werden, empfiehlt es sich in dreifacher Hinsicht, den Radialzuwachs während der Astreinigungsphase auf möglichst niedrigem Niveau zu halten.

6 FOLGERUNGEN

In diesem Abschnitt soll zunächst eine Bilanz über die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse jedes Teilbereichs gezogen werden. Hierauf werden praktisch orientierte Anwendungsmöglichkeiten der in dieser Arbeit erstellten Modelle vorgestellt. Zum Schluss folgt eine synoptische Betrachtung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse.

6.1 BILANZ DER ERGEBNISSE

6.1.1 BAUMGESTALT UND ASTARCHITEKTUR

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Baumart Buche unter sonst gleichen Bedingungen und bezogen auf das in dieser Arbeit untersuchte Material einen tendenziell größeren Kronendurchmesser im Vergleich zur Baumart Eiche aufweist, was sich auch in der Astlängenentwicklung widerspiegelt. Hier besitzt die Baumart Buche unter sonst gleichen Bedingungen längere Äste, was sich in einem Astdurchmesser- Astlängenverhältnis von 1:125 im Gegensatz zu dem für die Eiche gefundenen Verhältnis von 1: 100 niederschlägt. Weiterhin weist die Baumart Buche unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen eine tendenziell höhere Anzahl lebender Äste in der Krone auf. Für die lichtbedürftige Baumart Eiche konnte anhand des in dieser Arbeit untersuchten Materials eine schnellere Höhenentwicklung im Vergleich zur Baumart Buche festgestellt werden. Des Weiteren wiesen die in dieser Arbeit untersuchten Eichen einen höheren durchschnittlichen Schafradialzuwachs auf 1,3m Höhe bei gleichem Kronendurchmesser auf. Unter sonst gleichen Bedingungen besitzt die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche tendenziell größere Astradialzuwächse und in der Konsequenz auch tendenziell größere Astdurchmesser.

Bei beiden Baumarten konnte ein signifikanter negativer Einfluss des Astansatzwinkels auf den Astradialzuwachs als auch auf den Astdurchmesser nachgewiesen werden. Demnach besitzen steile Äste unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen höhere Astradialzuwächse und in der Konsequenz auch größere Astdurchmesser als plagiotrop ausgerichtete Äste.

Neben ontogenetischen Einflüssen auf die Baumgestalt und Astarchitektur spielt bei beiden Baumarten vor allem das Dickenwachstum des Schaftes eine bedeutende Rolle. Bei beiden Baumarten konnte ein signifikanter positiver Einfluss des (mittleren) Schafradialzuwachses auf 1,3m Höhe auf die Astanzahl, den Astradialzuwachs und auf den Astansatzwinkel festgestellt werden. Implizit konnte des Weiteren ein positiver Einfluss des Schafradialzuwachses auf 1,3m Höhe auf den Kronendurchmesser und somit

auch auf den Astdurchmesser unter sonst gleichen Bedingungen festgestellt werden³⁵. Neben dem direkten Einfluss des Schafradialzuwachses auf Astradialzuwachs und Astdurchmesser existiert somit ein weiterer, indirekter Einfluss durch den Astansatzwinkel.

6.1.2 ASTMORTALITÄTSPROZESS

In der Zusammenschau der beiden Modelle zur Beschreibung des Astmortalitätsprozesses kann dieser beschrieben werden als:

- Abhängig von der Standortsgüte. Es ist ein schnelleres Aststerben auf besseren Standorten zu erwarten. Ausweislich des Kronenansatzhöhenmodells sowie des Modells zur Prognose des Aststatus‘ ist unabhängig vom Standort für die Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen jedoch ein schnellerer Astmortalitätsprozess zu erwarten.
- Abhängig von Dickenwachstum. Es ist ein verzögerter Astmortalitätsprozess für Bäume mit vergleichsweise hohem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs zu erwarten. Ausweislich des Modells zur Prognose des Aststatus‘ verzögert jedoch eine Erhöhung des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses der letzten fünf Jahre den Astmortalitätsprozess für die Baumart Eiche kaum merklich, für die Baumart Buche jedoch augenscheinlich (vgl. Abbildung 32).
- Abhängig vom Astdurchmesser. Es ist bei beiden Baumarten ein verzögerter Astmortalitätsprozess bei Ästen mit vergleichsweise großem Durchmesser zu erwarten. Im Vergleich der beiden Baumarten wird der Astmortalitätsprozess mit zunehmendem Astdurchmesser unter sonst gleichen Bedingungen stärker bei der Baumart Buche verzögert (vgl. Abbildung 53).
- Abhängig von ontogenetischen Einflüssen, durch Baumalter_{1,3} und Baumhöhe definiert. Ausweislich des Kronenansatzmodells ist mit einer Kulmination der Kronenansatzverschiebung parallel zur Kulmination des laufenden Baumhöhenzuwachses zu rechnen, wobei die Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen immer auch einen schnelleren Astmortalitätsprozess gegenüber der Baumart Buche aufweist.

³⁵ Die Verfasserin ist sich dabei bewusst, dass die Kausalrichtung $\text{Radialzuwachs}_{1,3} = f(\text{Astdurchmesser} / \text{Astradialzuwachs})$ lautet.

6.1.3 ASTÜBERWALLUNG UND INNERE ÄSTIGKEIT

Trotz eines schnelleren Astmortalitätsprozesses der Baumart Eiche erweist sich die Astüberwallung aufgrund der spezifischen Zersetzungseigenschaften abgestorbener Eichenäste unter sonst gleichen Bedingungen im Vergleich zu Ästen der Baumart Buche als langsamer voranschreitend. Der Astdurchmesser der Baumart Eiche wirkt sich dabei gravierender auf die Astüberwallung und innere Ästigkeit aus, was durch voranschreitende Verkernungsprozesse mit zunehmendem Astdurchmesser und somit zunehmend erschwerte Holzersetzung toten Astmaterials zu erklären ist.

In der Zusammenschau lässt sich der Schafradialzuwachs als wichtigste Einflussvariable auf die Astüberwallung und innere Ästigkeit identifizieren. Dichtständiger erwachsene Bäume mit geringerem durchschnittlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe besitzen unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen dünnere Äste (vgl. Kapitel 0 sowie Kapitel 4.1.2.3), welche rasch absterben (vgl. Kapitel 4.2.1.1. sowie Kapitel 4.2.2.1), ausweislich des Astüberwallungsmodells auch schneller überwallt werden (Kapitel 4.3.2.1) und nach der Überwallung einen schmaleren asthaltigen Kern im Schaftholz hinterlassen (vgl. Kapitel 4.3.2.3.). Jedoch ist es, um die Astüberwallung zu forcieren, zu diesem Zeitpunkt wichtig, das Dickenwachstum z.B. durch Durchforstungsmaßnahmen weiter zu fördern. Klassischerweise wird dieses Bewirtschaftungsprinzip in der Praxis in Form des „zweiphasigen Pflegekonzepts“ (vgl. z.B. SPIECKER et al. (2009)) umgesetzt.

6.2 EINFLUSS DES DICKENWACHSTUMS AUF ASTENTWICKLUNG UND ASTREINIGUNG

Für die Güteklassen F-A (Buche) bzw. Q-A (Eiche) gelten nach den Sortierregeln der Laubrundholz-Qualitätssortierung des EUROPÄISCHEN KOMITEES FÜR NORMUNG (1997) die höchsten Anforderungen. So dürfen bei beiden Baumarten bei zum Verkauf stehendem Rundholz im unteren Stammbereich weder lebende Äste noch nicht überwallte Totäste existieren, um in die höchste Qualitätsklasse eingeordnet werden zu können. Ziel einer erfolgreichen Astreinigungsphase muss es daher sein, den Astmortalitätsprozess auf der gewünschten astfreien Schaftlänge vollständig zum Abschluss gebracht zu haben, um danach im Zuge der Dimensionierungsphase eine schnelle Astüberwallung der Äste im oberen Bereich der gewünschten astfreien Schaftlänge sowie ein zügiges Erreichen der gewünschten Zieldurchmesser bis zum Ende der Umtriebszeit durch forciertes Dickenwachstum zu gewährleisten.

Dabei ist die im Rahmen von Bewirtschaftungsmaßnahmen am einfachsten zu steuernde Größe der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs des Schaftes, welcher durch die Bestandesdichte beeinflusst wird. Während der Dimensionierungsphase ist ein vergleichsweise hoher durchschnittlicher Radialzuwachs des Schaftes wünschenswert. Jedoch ist selbiger während der Astreinigungphase und vor allem zu deren Ende hin den Pflegezielen hinsichtlich Wertholzproduktion absolut und unter jedem in dieser Arbeit betrachteten Gesichtspunkt abträglich. Dabei wirkt sich der Radialzuwachs des Schaftes auf allen in dieser Arbeit betrachteten Ebenen in direkter oder indirekter Weise auf die Holzqualität aus.

Werden Bäumen vergleichsweise größere Standräume zugemessen, führt dies zu einer weiter ausladenden Krone und in der Folge zu einem erhöhten Radialzuwachs des Schaftes. Dieser trägt zu einer Erhöhung der Astanzahl und somit zu einer erhöhten Astdichte bei gleicher Kronenlänge bei. Diese Äste weisen ebenfalls erhöhte Radialzuwächse auf, sind jedoch im Vergleich tendenziell etwas horizontaler ausgerichtet, was sich bei beiden Baumarten leicht mindernd auf den Astradialzuwachs auswirkt. Der Astmortalitätsprozess schreitet bei erhöhtem Schaft radialzuwachs bei beiden Baumarten nur langsam voran, daraus ergeben sich vergleichsweise höhere Astalter in den tieferen Kronenbereichen und in Kombination mit den erhöhten Astradialzuwächsen auch stärkere Astdurchmesser, welche zu einer verzögerten Astüberwallung sowie einem größeren asthaltigen Kern führen.

6.2.1 SIMULATION DES ASTREINIGUNGSPROZESSES

Um die Folgen von erhöhtem Schaft radialzuwachs auf den Astreinigungsprozess von Buche und Eiche darstellen zu können, wurde eine Simulation durchgeführt, in die mehrere in dieser Arbeit erstellten Modelle auf Einzelbaum- sowie auf Einzelastebene Eingang fanden. Die Simulationen nehmen einen astfreien Schaft von 10 Metern Höhe sowie einen Zieldurchmesser auf 1,3m Schafthöhe von 60 Zentimetern an, welcher entweder mit einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5 Millimetern oder 3,5 Millimetern erreicht wird. Sie gehen von der Prämisse aus, dass der Durchmesser des asthaltigen Kerns des Schaftes maximal ein Drittel (vgl. SCHULZ (1959)) des in der jeweiligen Höhe erreichten Schaftdurchmessers betragen darf. Damit nimmt der erlaubte Durchmesser des asthaltigen Kerns mit zunehmender Schafthöhe ab. Der erlaubte Durchmesser des asthaltigen Kerns beträgt somit auf 1,3m Schafthöhe 20 Zentimeter und wird bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm in 40 Jahren, bei einem Radialzuwachsszenario von 3,5mm in 29 Jahren erreicht. Zu diesem Zeitpunkt soll die Beurteilung der bisherigen Astreinigung erfolgen. Dabei soll

erfasst werden, ob das Ziel eines astfreien Schaftes von 10 Metern auf gegebener Standortgüte sowie die Einhaltung der ein- Drittel-Grenze des Durchmessers des asthaltigen Kerns erreicht ist. Durch die in dieser Arbeit erstellten Modelle ist es möglich, den Status der Astreinigung zu diesem Zeitpunkt zu simulieren und gegebenenfalls Empfehlungen zur Erreichung der vorgegebenen Ziele zu geben. Mit Hilfe des Höhenmodells wurde dem Baumalter auf 1,3m Höhe bei Astbildung, welches die vertikale Verteilung der Äste am Baum charakterisiert, standortsspezifische Astansatzhöhenstufen zugewiesen. Durch den Einsatz des Kronenansatzhöhenmodells konnte danach das maximale Astalter in jeder Ansatzhöhenstufe bestimmt werden. Der Einsatz des Astdurchmessermodells erlaubte es wiederum, den Astdurchmesser zu seinem Mortalitätszeitpunkt zu bestimmen. Mit Hilfe des Modells zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit konnte hernach der Überwallungsstatus des Einzelastes bestimmt werden. Der Einsatz des Modells zur Abschätzung des Radius' des asthaltigen Kerns erlaubte schlussendlich die Prognose, ob sich dieser innerhalb der ein- Drittel- Grenze befand. Zur Illustration wurden aus den möglichen Szenarien beispielhaft jeweils ein Radialzuwachsszenario von 2,5mm und 3,5mm bei einer Standortbonität von $SI_{10}=7m$ und einem konstanten Astansatzwinkel von 40° bei einem Produktionsziel von 60cm auf 1,3m Schafthöhe sowie 10 Metern astfreier Schaft herausgegriffen. Weitere Szenarien finden sich im Anhang. Für beide Baumarten ergibt sich ausweislich der in dieser Arbeit erstellten Modelle unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen (siehe jeweiligen Tabellenkopf) für einen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe von 2,5mm eine problemlose Astreinigung (siehe Tabelle 43 und Tabelle 44). Das Kronenansatzhöhenmodell impliziert geringere mittlere maximale Astalter: die Äste sterben früher ab. Durch den vergleichsweise geringeren Radialzuwachs der Äste bei geringerem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe ergibt sich in der Summe ein geringerer Astdurchmesser. Diese Äste überwallen schnell und überschreiten die geforderte ein- Drittel- Grenze des Durchmessers des asthaltigen Kerns nicht. Maßnahmen wie Grün- oder Trockenastung sind bei beiden Baumarten nicht notwendig.

Buche, $ir_{1,3}=2,5\text{mm}$;SI₁₀=7m; Zieldurchmesser: 60cm;Alter_{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze= 40 Jahre;

Astansatzwinkel= 40°;

Kronenansatzhöhe= 12,53m

Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Mittlerer Radius asthaltiger Kern < ein-Drittel- Grenze?	(Trocken) Astung notwendig?
0-1	9,5	0	22,7	✓	4,15	9,95	✓	✗
1-2	10,0	0	23,4	✓	4,34	9,85	✓	✗
2-3	10,6	0	24,4	✓	4,60	9,75	✓	✗
3-4	11,6	0	25,7	✓	5,00	9,58	✓	✗
4-5	12,5	0	27,2	✓	5,32	9,45	✓	✗
5-6	13,3	0	28,0	✓	5,65	9,33	✓	✗
6-7	14,0	0	29,5	✓	5,91	9,08	✓	✗
7-8	15,0	0	31	✓	6,30	8,95	✓	✗
8-9	17,0	0	33,8	✓	7,07	8,83	✓	✗
9-10	19,0	0	36,6	✓	8,03	8,79	✓	✗

Tabelle 43: Simulierter Astreinigungsprozess von Buche bei einer Standortsbonität von SI₁₀=7m, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.

Eiche, $ir_{1,3}=2,5\text{mm}$;SI₁₀=7m; Zieldurchmesser: 60cm;Alter_{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze = 40 Jahre;

Astansatzwinkel= 40°;

Kronenansatzhöhe= 15,37m

Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Äste überwältigt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Mittlerer Radius asthaltiger Kern < ein-Drittel- Grenze?	(Trocken) Astung notwendig?
0-1	7,0	0	30,6	✓	6,32	9,91	✓	✗
1-2	7,0	0	30,1	✓	6,27	9,79	✓	✗
2-3	7,0	0	29,5	✓	6,20	9,70	✓	✗
3-4	7,0	0	29,2	✓	6,17	9,62	✓	✗
4-5	7,0	0	28,6	✓	6,10	9,54	✓	✗
5-6	7,0	0	28,3	✓	6,07	9,37	✓	✗
6-7	7,5	0	29,8	✓	6,86	9,20	✓	✗
7-8	8,3	0	31,3	✓	7,26	9,12	✓	✗
8-9	9,5	0	36,2	✓	8,09	9	✓	✗
9-10	10,0	0	37,7	✓	8,49	8,87	✓	✗

Tabelle 44: Simulierter Astreinigungsprozess von Eiche bei einer Standortsbonität von SI₁₀=7m, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.

Für ein Radialzuwachsszenario von 3,5mm ergibt sich unter sonst gleichen Bedingungen schon ein ganz anderes Bild (siehe Tabelle 45 und Tabelle 46). Die Kronenansatzhöhenverschiebung verläuft hier insgesamt auf einem geringeren Niveau (siehe Abbildung 51), wodurch impliziert wird, dass die Äste der unteren Kronenbereiche langsamer absterben und somit ein höheres Astalter erreichen. In Kombination mit einem vergleichsweise höheren Astradialzuwachs ergeben sich größere Astdurchmesser zum Mortalitätszeitpunkt. Diese überwallen langsamer und ergeben einen großen Durchmesser des asthaltigen Kerns, welcher vor allem in den Schaftbereichen, in denen der Zeitpunkt

der Astmortalität weniger lang zurückliegt, die ein- Drittel- Grenze überschreitet. Besonderes Augenmerk muss darauf gelegt werden, dass die Verzögerung des Astreinigungsprozess bei der Buche insbesondere darin gründet, dass sich der Kronenansatz langsamer nach oben verschiebt und der Astmortalitätsprozess somit noch nicht stattgefunden hat. Bei der Baumart Eiche verzögert sich der Astreinigungsprozess vor allem durch das Vorhandensein starker Totäste, welche durch ihre Holzzersetzungseigenschaften insbesondere auch aufgrund von Verkernungsprozessen (BUTIN & KOWALSKI (1983a)) einen größeren totasthaltigen Teil des asthaltigen Kerns aufweisen. Dadurch wird deren Überwallungsprozess verlängert; der mangelhaft zersetzte Totaststummel wächst daraufhin sukzessive in das ihn umgebende Holz ein und verursacht einen großen Durchmesser des asthaltigen Kerns. Dieser Trend des langsamen Astmortalitäts- aber raschem Zersetzungs- und Überwallungsprozess bei der Baumart Buche und des raschen Astmortalitäts- aber langsamen Zersetzungs- und Überwallungsprozess bei der Baumart Eiche konnte auch so schon von KINT et al. (2010) beobachtet werden. Auf die Bewirtschaftung bezogen sind bei beiden Baumarten unter dem vorgestellten Szenario Maßnahmen wie Grün- oder Trockenastung zu ergreifen, um das anvisierte Ziel noch erreichen zu können.

Im Vergleich beider vorgestellter Szenarien fällt auf, dass sich der untere Teil des astfreien Schaftes unabhängig vom durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe relativ problemlos astreinigt. Die jährliche Kronenansatzhöhenverschiebung in dieser Phase ist groß, Äste erreichen nur ein geringeres Astalter und weisen somit einen geringeren Astdurchmesser auf. Bis zum Ende der Astreinigungsphase können sie problemlos überwallt werden. Probleme treten erst im oberen Teil der astfreien Schaftlänge auf, wenn die Äste durch eine immer geringer werdende Kronenansatzverschiebung vergleichsweise spät vom Astmortalitätsprozess erfasst werden, somit einen größeren Durchmesser erreichen und bis zum Ende der Astreinigungsphase nur noch wenig Zeit bleibt, diese Äste überwallen zu lassen. Hinzu kommt, dass der durch die ein-Drittel-Regel bestimmte erlaubte Durchmesser des asthaltigen Kerns mit zunehmender Schafthöhe abnimmt, während die Astdurchmesser und somit die jeweiligen Durchmesser asthaltiger Kerne mit zunehmender Schafthöhe zunehmen.

Buche, $ir_{1,3}=3,5\text{mm}$;SI₁₀=7m; Zieldurchmesser: 60cm;Alter_{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze = 29 Jahre;

Astansatzwinkel= 40°;

Kronenansatzhöhe= 6,74m

Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Mittlerer Radius asthaltiger Kern < ein-Drittel- Grenze?	(Trocken) Astung notwendig?
0-1	11,0	0	25,8	✓	5,60	10,00	✓	✗
1-2	11,5	0	28,3	✓	6,00	9,85	✓	✗
2-3	13,3	0	29,8	✓	6,41	9,75	✓	✗
3-4	14,5	0	31,7	✓	7,01	9,62	✓	✗
4-5	16,0	0	35,0	✓	7,62	9,45	✓	✗
5-6	18,3	0	38,0	✓	8,55	9,30	✓	✗
6-7	21,0	1	42,1	✗	9,47	9,20	✗	✓
7-8	24,0	1	38,1	✗	9,98	9,08	✗	✓
8-9	27,5	1	36,3	✗	11,17	8,90	✗	✓
9-10	32,0	1	33,9	✗	12,35	8,79	✗	✓

Tabelle 45: Simulierter Astreinigungsprozess von Buche bei einer Standortsbonität von SI₁₀=7m, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.

Eiche, $ir_{1,3}=3,5\text{mm}$;SI₁₀=7m; Zieldurchmesser: 60cm;Alter_{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze = 29 Jahre;

Astansatzwinkel= 40°;

Kronenansatzhöhe= 9,86m

Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Astdurchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Mittlerer Radius asthaltiger Kern < ein-Drittel-Grenze?	(Trocken) Astung notwendig?
0-1	8,0	0	36,2	✓	8,12	9,95	✓	✗
1-2	8,0	0	36,0	✓	8,10	9,79	✓	✗
2-3	8,0	0	35,8	✓	8,08	9,66	✓	✗
3-4	8,5	0	37,6	✓	8,51	9,54	✓	✗
4-5	9,0	0	39,4	✓	8,94	9,41	✓	✗
5-6	10,5	0	45,0	✗	10,24	9,25	✗	✓
6-7	11,0	0	46,9	✗	11,10	9,20	✗	✓
7-8	11,5	□□48,7	48,7	✗	12,40	9,12	✗	✓
8-9	13,0	0	58,2	✗	14,10	9,00	✗	✓
9-10	17,0	1	63,9	✗	15,30	8,85	✗	✓

Tabelle 46: Simulierter Astreinigungsprozess von Eiche bei einer Standortsbonität von SI₁₀=7m, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.

Entsprechend den vorliegenden Ergebnissen sollte somit auch eine Grün- bzw. Trockenastung neben der natürlichen Astreinigung durch Seitendruck bei der Bewirtschaftung von Buche und Eiche in Betracht gezogen werden, wobei sich die Grünastung vor allem auf Äste im unteren Kronenbereich der Baumart Buche, welche über lange Zeit am Stamm persistieren und keine nennenswerte Leistung für das Gesamtsystem erbringen, beschränkt. Trockenastung sollte vor allem bei vielversprechenden Exemplaren oder Z- Baum- Anwärtern der Baumart Eiche als Maßnahme überdacht werden, um die lange Überwallungsdauer insbesondere stärkerer Totäste zu verkürzen und das Ausmaß des asthaltigen Kerns zu reduzieren. Auch hier begrenzt sich die Astung ausweislich der vorgestellten Simulation auf

den oberen Bereich der gewünschten astfreien Schaftlänge. BUTIN & KOWALSKI (1983a) empfehlen eine möglichst frühzeitige Trockenastung der Eiche, um die Überwallungszeit der Totäste zu verkürzen. JOBLING & PEARCE (1977) und HOCHBICHLER et al. (1990) empfehlen sogar eine Grünastung der Eiche, wenn diese im Weitverband gepflanzt wird. Den Ergebnissen von HOCHBICHLER et al. (1990) zufolge können hier Astungswunden von 5 bis 6cm Durchmesser innerhalb von 5 Jahren vollständig überwallen. ZIEREN (1970) betont, dass die Überwallung von Astungswunden bei Eiche ungefähr nur halb soviel Zeit wie eine natürliche Astreinigungphase in Anspruch nimmt. BEINHOFER (2010) kommt zu dem Ergebnis, dass im Weitverband gepflanzte Buchen- und Eichenbestände, in welchen die Astreinigung künstlich durch Astung herbeigeführt wird, finanziell attraktive Möglichkeiten bietet, da die extrem hohen Kosten herkömmlich begründeter Pflanzungen auf ein Mindestmaß reduziert werden. Zwar fallen Astungskosten an; diese amortisieren sich jedoch durch die erhöhte Holzqualität. Jedoch betont BEINHOFER (2010), dass nur wenig über die langzeitlichen Auswirkungen von Astungen insbesondere bei der Baumart Buche hinsichtlich Verfärbungen oder Pilzinfektionen bekannt sei. Schon ZIMMERLE (1943) konnte bei Astungsversuchen an Buche eine „beachtliche Veränderung des inneren Holzkörpers“ durch Verfärbungen feststellen. Dennoch wird die Astung der Buche z.B. von EISNER et al. (2002) oder HEIN (2005) unter der Bedingung einer korrekten Schnittführung, welche die Gefahr von Holzverfärbungen minimiere, befürwortet. VOLKERT (1953) stellt die Bedeutung des Astdurchmessers auf die Gefahr von Holzverfärbungen nach Astungsmaßnahmen heraus, welche sich mit zunehmendem Astdurchmesser deutlich erhöhe. DUJESIEFKEN et al. (2005) weisen auf die jahreszeitliche Abhängigkeit der Reaktion auf Astungsmaßnahmen bei Buche und Eiche hin. Demnach werden Astungswunden während der Vegetationszeit effizienter kompartimentalisiert (vgl. SHIGO (1984)) als während der Vegetationsruhe. Auch Verfärbungen des Holzes lassen sich reduzieren, indem die Astungsmaßnahmen zu Beginn der Vegetationszeit durchgeführt werden (ebenda).

Um bei einem Zieldurchmesser von 60cm den maximalen asthaltigen Kern auf ein Drittel des in der jeweiligen Höhe erreichten Schaftdurchmessers zu begrenzen, müssen sich die Astdurchmesser mit zunehmender Höhe verringern. Tabelle 47 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Auf Grundlage der in dieser Arbeit erstellten Modelle wurde der maximale Astdurchmesser berechnet, bei welchem die ein-Drittel-Grenze bei einem Zieldurchmesser von 60cm in der jeweiligen Schafthöhe noch einzuhalten ist. Dabei muss notfalls auch auf Astungsmaßnahmen von Grün- oder Trockenästen zurückgegriffen werden, welche sich vor allem auf die obere Hälfte der astfreien Schaftlänge konzentrieren müssen, da hier der Astmortalitätsprozess immer langsamer verläuft. Für die Baumart Buche sind Astdurchmesser

von durchschnittlich etwa 4cm tolerabel, wenn der Zieldurchmesser von 60cm maximal ein Drittel asthaltigen Kern enthalten soll. Für die Baumart Eiche empfiehlt es sich, die Äste nicht stärker als im Durchschnitt 3,4cm werden zu lassen, um das Produktionsziel nicht zu gefährden. Auch hier werden somit wieder die unterschiedlichen Holzersetzungseigenschaften toten Astmaterials von Buche und Eiche deutlich.

Buche, $ir_{1,3}=3,5\text{mm}$; $SI_{10}=7\text{m}$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze = 29 Jahre; Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 6,74m			Eiche, $ir_{1,3}=3,5\text{mm}$; $SI_{10}=7\text{m}$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein- Drittel-Grenze = 29 Jahre; Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 9,86m		
Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Maximal erlaubter Astdurchmesser [mm]	Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Maximal erlaubter Astdurchmesser [mm]
0-1	10,00	44,29	0-1	9,95	37,22
1-2	9,85	43,79	1-2	9,79	36,33
2-3	9,75	42,80	2-3	9,66	35,60
3-4	9,62	42,05	3-4	9,54	35,00
4-5	9,45	41,31	4-5	9,41	34,34
5-6	9,30	40,57	5-6	9,25	33,89
6-7	9,20	39,82	6-7	9,20	33,23
7-8	9,08	39,08	7-8	9,12	32,78
8-9	8,90	38,09	8-9	9,00	32,12
9-10	8,79	37,09	9-10	8,85	31,46

Tabelle 47: Maximal erlaubter Astdurchmesser von Buche und Eiche bei einem Produktionsziel von 60cm Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe und 10m astfreiem Schaft bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7\text{m}$ und einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm.

Ein bestimmter durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs kann nur bei einem bestimmten Kronendurchmesser geleistet werden, der sich mit zunehmendem Alter_{1,3} erweitern muss. Wird der durchschnittliche jährliche Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe mit Hilfe von Formel 4 in eine Angabe zum durchschnittlichen Baumabstand und auf Bestandesebene in eine Angabe zur mittleren Baumanzahl pro Hektar übersetzt, lässt sich der Astreinigungsprozess in der Praxis im Hinblick auf die dargestellten Simulationen relativ einfach abschätzen (Vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Zur

besseren Vergleichbarkeit beider Baumarten wird jeweils ein durchschnittlicher Überschirmungsgrad von 70% unterstellt, auch wenn ein durchschnittlicher Überschirmungsgrad von 80% für die Baumart Buche etwas praxisnäher wäre.

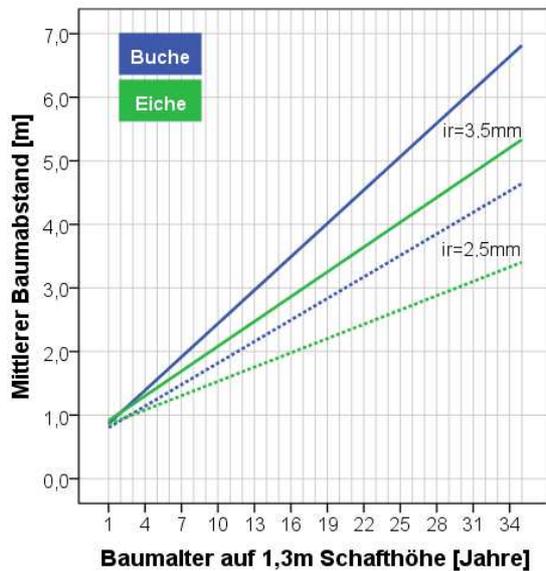


Abbildung 54: Mittlerer Baumabstand von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe für ein Radialzuwachsszenario von durchschnittlichen jährlichen 2,5mm (gestrichelte Linien) und 3,5mm (durchgezogene Linien). Es wurde ein Überschirmungsgrad von 70% unterstellt.

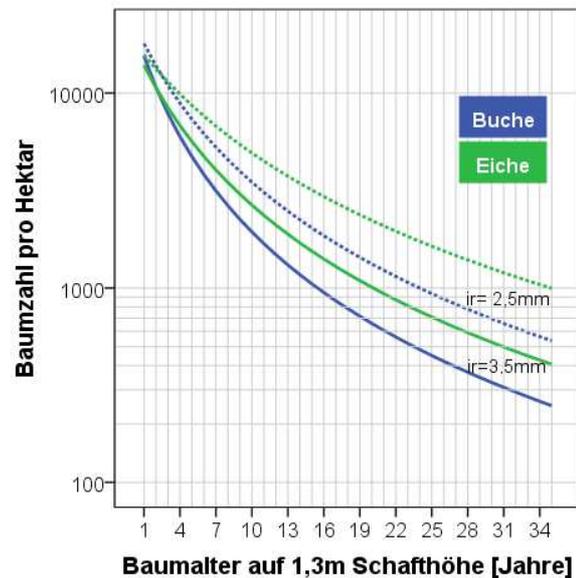


Abbildung 55: Entwicklung der Baumzahl pro Hektar von Buche (Signatur: blau) und Eiche (Signatur: grün) für die Radialzuwachsszenarien 2,5mm (gestrichelte Linie) und 3,5mm (durchgezogene Linie). Es wurde ein Überschirmungsgrad von 70% unterstellt.

6.2.2 EINFLUSS WEITERER FAKTOREN

Neben dem Dickenwachstum wurden weitere für die Astentwicklung und Astreinigung bedeutsame Einflussfaktoren auf Einzelbaum- wie auch auf Einzelastebene ausgemacht. Vor allem im Rahmen der Astbildungs- und Astmortalitätsprozesse spielen auch standörtliche Gegebenheiten eine Rolle. Die dargestellten Simulationen des Astentwicklungs- und Astreinigungsprozesses, welche auf Grundlage der in dieser Arbeit parametrisierten Modelle erstellt wurden, weisen ein erhöhtes Astalter auf schlechteren Standorten und somit unter sonst gleichen Bedingungen einen etwas höheren Astdurchmesser auf (vgl. Tabelle 48 und Tabelle 49).

Auf schlechteren Standorten ist ein geringeres Höhenwachstum und somit eine vergleichsweise verspätete Astbildung und ein verzögerter Astmortalitätsprozess auf gleicher Astansatzhöhe zu erwarten. Offensichtlich scheinen sich jedoch Astbildungs- und Astmortalitätsprozesse nicht die Waage

zu halten, woraus unter sonst gleichen Bedingungen etwas stärkere Astdurchmesser für Bäume schlechterer Standortsbonitäten resultieren.

Des Weiteren konnten neben ontogenetischen Faktoren, wie etwa der Baumhöhe oder des Baum- oder Astalters aber auch dem Baumalter zum Zeitpunkt der Astbildung vor allem der Astdurchmesser sowie der Astansatzwinkel als bedeutsame Faktoren für die Astarchitektur, die Astmortalität, die Astüberwallung sowie die innere Ästigkeit identifiziert werden. Beide Variablen sind wiederum mit dem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe korreliert und lassen sich durch dessen Regulierung steuern.

Buche				
	SI₁₀=7m; ir_{1,3}=3,5mm Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 6,74m		SI₁₀=8m; ir_{1,3}=3,5mm Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 7,81m	
Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Mittleres maximales Astalter [Jahre]	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]
0-1	11,0	25,8	9,0	22,98
1-2	11,5	28,3	10,0	24,6
2-3	13,3	29,8	11,0	26,2
3-4	14,5	31,7	12,5	28,7
4-5	16,0	35,0	14,0	31,1
5-6	18,3	38,0	15,5	32,0
6-7	21,0	42,1	17,6	37,0
7-8	24,0	38,1	20,0	39,2
8-9	27,5	36,3	22,5	38,1
9-10	32,0	33,9	30,5	36,4

Tabelle 48: Mittleres maximales Astalter und der jeweilige mittlere Astdurchmesser für zwei verschiedene Standortsbonitäten (SI₁₀=7 und SI₁₀=8) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm für die Baumart Buche.

Eiche				
	SI₁₀=7m ; ir _{1,3} =3,5mm Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 9,86m		SI₁₀=8m ; ir _{1,3} =3,5mm Astansatzwinkel= 40°; Kronenansatzhöhe= 10,74m	
Astansatzhöhe (klassiert) [m]	Mittleres maximales Astaltes [Jahre]	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Mittleres maximales Astaltes [Jahre]	Mittlerer Astdurch- messer zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]
0-1	8,0	36,2	6,0	28,5
1-2	8,0	36,0	7,0	32,2
2-3	8,0	35,8	7,0	32,1
3-4	8,5	37,6	7,5	33,8
4-5	9,0	39,4	8,0	35,6
5-6	10,5	45,0	9,0	39,4
6-7	11,0	46,9	9,0	39,3
7-8	11,5	48,7	10,5	44,9
8-9	13,0	58,2	11,5	48,7
9-10	17,0	63,9	15,0	62,0

Tabelle 49: Mittleres maximales Astalter und der jeweilige mittlere Astdurchmesser für zwei verschiedene Standortsbonitäten (SI₁₀=7 und SI₁₀=8) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm für die Baumart Eiche.

6.3 EINFLUSS DER BAUMART AUF ASTENTWICKLUNG UND ASTREINIGUNG

Im Rahmen der Arbeit konnten die in 1.2.7 ausführlich dargestellten autökologischen Eigenschaften der schattentoleranten Baumart Buche und der lichtbedürftigen Baumart Eiche zu großen Teilen in ihren spezifischen Wachstumsmustern wiedererkannt werden. Die Kontrastierung der beiden Baumarten auf Grundlage ihrer baumartenspezifisch parametrisierten Wachstumsmodelle erwies sich dabei als zweckmäßig, um diese spezifischen Eigenheiten auch als solche zu erkennen.

6.3.1 BUCHE

Für die Baumart Buche konnte eine ausgeprägtere laterale Kronenplastizität festgestellt werden. Dabei wurde eine tendenziell höhere Anzahl lebender Äste in der Krone der Baumart Buche konstatiert, welche auch tendenziell länger waren. Diese Charakteristiken weisen die Buche als Schattbaumart aus: durch eine Monolayer- Architektur der Äste wird ein Minimum an Selbstbeschattung erreicht, was die

Lichtausnutzung im Schatten maximiert. Unter Einsatz minimaler „Kosten“ werden die Äste so positioniert, dass sie möglichst vollständig vorhandene Lücken im Kronendach ausfüllen. Auffallend ist ein im Vergleich zur Baumart Eiche recht geringer Dickenzuwachs sowohl des Schaftes als auch der Äste, was in tendenziell dünneren Astdurchmessern resultiert. Steil ansetzende Äste besitzen bei beiden Baumarten eine größere Wahrscheinlichkeit, unter gleichen Umständen zu überleben. Bei der Baumart Buche ist dieser Zusammenhang jedoch ausgeprägter. Aufgrund ihrer Holzanatomie ist ein Ausfall von Jahrringen an Ästen der Baumart Buche möglich. Dies wurde neben der effektiven Strahlungsabsorption ihrer Blätter als weiterer möglicher Grund für die ausgeprägte Fähigkeit zur Tiefenerschließung der untersten Kronenbereiche diskutiert. Der Astmortalitätsprozess am unteren Schaftbereich kann somit unter Umständen sehr lange dauern. Ist ein Ast jedoch schlussendlich abgestorben, verläuft der Zersetzungs- und Überwallungsprozess recht rasch. Unter dem Gesichtspunkt der Wertholzproduktion gesehen ist während des Astreinigungsprozesses bei der Baumart Buche besonderes Augenmerk auf den Astmortalitätsprozess zu richten, welcher aufgrund der diskutierten holzanatomischen und physiologischen Eigenschaften der Baumart Buche zögerlich verläuft. Notfalls muss auch eine Grünastung der untersten lebenden Äste an besonders vielversprechenden Exemplaren vor allem zum Ende der Astreinigungsphase hin in Betracht gezogen werden. Da diese Äste jedoch meist ausfallende Jahrringe oder ein sehr geringes Dickenwachstum aufweisen, muss dies jedoch nicht mit größter Eile geschehen. Dabei ist auf die richtige Schnittführung zu achten, bei welcher der Astkragen unversehrt belassen werden muss, um unerwünschte Holzverfärbungen zu vermeiden. Grünastungsmaßnahmen in den oberen Bereichen der gewünschten astfreien Schaftlänge sollten idealerweise mit einer ersten Durchforstung verbunden werden, um das Dickenwachstum des Schaftes zugunsten einer kurzen Überwallungsdauer anzuregen.

6.3.2 EICHE

Die Baumart Eiche zeichnet sich durch ein rascheres Höhenwachstum in der Jugend aus. Ihre laterale Kronenplastizität ist weniger ausgeprägt und sie besitzt weniger, aber dafür dickere Äste, welche zudem etwas kürzer sind. Bei gleicher Kronenbreite sind bei der Baumart Eiche höhere Radialzuwächse sowohl des Schaftes als auch der Äste zu erwarten. Innerhalb der Krone der Eiche sind stark ausgeprägte Astdurchmesserkontraste zu finden, welche aus den vergleichsweise hohen Astradialzuwächsen resultieren. Der Astmortalitätsprozess verläuft abrupt und rasch. Dabei besitzt die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche eine um 70% geringere Wahrscheinlichkeit, unter der Voraussetzung gleicher Bedingungen einen lebenden Ast auf gleicher Astansatzhöhe aufzuweisen. Der

anschießende Astüberwallungsprozess verläuft jedoch aufgrund der Zersetzungseigenschaften der Totäste sehr zögerlich. Dabei wird ein Ast der Baumart Eiche unter gleichen Voraussetzungen mit einer 50% geringeren Wahrscheinlichkeit überwallt. Besonderes Augenmerk ist somit im Laufe der Astreinigung der Baumart Eiche darauf zu richten, dass die Überwallungszeit der Äste verkürzt wird. Dies kann zum Einen durch die Verringerung der Astdurchmesser geschehen; Äste unter 2cm Durchmesser werden aufgrund ihrer noch fehlenden Verkernung am Leichtesten zersetzt und können schnell überwallt werden. Soll der asthaltige Kern maximal 30 Prozent eines Zieldurchmessers von 60cm betragen, muss dafür Sorge getragen werden, dass kein Ast einen stärkeren Durchmesser als 4cm erreicht. Aufgrund des raschen Dickenwachstums der Eichenäste muss der Astentwicklungsprozess vor allem im oberen Bereich der gewünschten astfreien Schaftlänge sorgsam beobachtet werden. Während der Astreinigungsphase ist somit auf dichtständige Erziehung zu achten. GOCKEL (1994) berichtet jedoch von zunehmend schlechten Kronenentwicklungen junger Eichen bei zu dichtständigen Pflanzungen mit durchschnittlichen Baumabständen von unter einem Meter.

Zum Anderen kann die Überwallungszeit durch Astung verkürzt werden. Da der Astmortalitätsprozess der Baumart Eiche sehr rasch verläuft, ist es auch möglich, die Überwallungszeit durch Trockenastungsmaßnahmen starker Totäste einzuschränken. Auch hier ist eine schnelle Überwallung zu erwarten, wenn der Totast schaftnah entfernt wird.

7 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden Baumgestalt, Astarchitektur und Astreinigungsprozesse der schattentoleranten Buche (*Fagus sylvatica* L.) und der lichtbedürftigen Eiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.) in Abhängigkeit vom Dickenwachstum untersucht. Durch möglichst einfache und leicht zu interpretierende baumartenspezifische waldwachstumskundliche Modelle wurden relevante Einflussvariablen, welche auf Baumgestalt, Astarchitektur, Astmortalitätsprozess sowie Astüberwallung und innere Ästigkeit einwirken, auf Einzelbaum- wie auch auf Einzelastebene herausgefiltert und quantifiziert. Auf Grundlage dieser Modelle wurden die Baumarten Buche und Eiche kontrastiert. Baumartenspezifische Unterschiede werden aufgezeigt und vor dem Hintergrund ihrer autökologischen Eigenschaften interpretiert. Alle Modelle werden zusätzlich im Kontext des Dickenwachstums betrachtet. Im weiteren Verlauf werden auf Grundlage dieser Modelle Empfehlungen zur waldbaulichen Gestaltung der Astreinigungsphase von Buche und Eiche gegeben werden.

Das Untersuchungskonzept dieser Arbeit beruht auf dem Prinzip der unechten Zeitreihe in Kombination mit dem retrospektiven Ansatz der Stammanalyse. Die für diese Arbeit aufgenommenen Probestämme entstammen vorwiegend Beständen des westlichen Baden- Württembergs, aus welchen jeweils 5 Bäume der Kraft'schen Klassen 1 bis 4 entnommen wurden. So wurden insgesamt 143 Probestämme, davon 69 Buchen und 74 Eichen, stehend (Baumhöhe, Kronenansatzhöhe, Kronendurchmesser) sowie liegend (Astansatzhöhe, Astdurchmesser, Astansatzwinkel, Astlänge, Exposition des Astes) vermessen. Gefällte Probestämme wurden in ein-Meter-Sektionen aufgeteilt. Aus jeder Sektion wurde der stärkste überwallte Totast, der stärkste nicht überwallte Totast und der stärkste lebende Ast für weitere Untersuchungen entnommen. Nach entsprechender Präparation der Totäste wurden der Mortalitätszeitpunkt sowie gegebenenfalls das Jahr der vollständigen Überwallung erhoben. Des Weiteren wurden noch verschiedene Distanzmaße wie der Radius des asthaltigen Kerns aufgenommen. An den entnommenen Lebendastproben sowie den dazugehörigen Stammscheiben wurden die Radialzuwächse vermessen. Insgesamt wurden während der Feldaufnahmen und der Laborarbeiten Daten von knapp 4200 Ästen aufgenommen, worauf ein Anteil von etwa 60% auf lebende Äste entfiel.

Im Teilbereich Baumgestalt und Astarchitektur wurde zunächst auf Einzelbaumebene eine Modellierung des Höhenwachstums sowie des Kronendurchmessers und der Astanzahl durchgeführt. Auf Einzelastebene wurden Modelle zur Prognose der Astlänge, des Astdurchmessers, des Astradialzuwachses sowie des Astansatzwinkels erstellt. Zusammenfassend konnte für die Baumart

Buche unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen ein tendenziell größerer Kronendurchmesser im Vergleich zur Baumart Eiche festgestellt werden, was sich auch in der Astlängenentwicklung widerspiegelte. Hier besitzt die Baumart Buche unter sonst gleichen Bedingungen längere Äste. Weiterhin weist die Baumart Buche unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen eine tendenziell höhere Anzahl lebender Äste in der Krone auf. Für die lichtbedürftige Baumart Eiche konnte im untersuchten Altersspektrum eine schnellere Höhenentwicklung im Vergleich zur Baumart Buche festgestellt werden. Des Weiteren wiesen die in dieser Arbeit untersuchten Eichen einen höheren durchschnittlichen Schafradialzuwachs auf 1,3m Höhe bei gleichem Kronendurchmesser auf. Unter sonst gleichen Bedingungen besitzt die Baumart Eiche im Vergleich zur Baumart Buche tendenziell größere Astradialzuwächse und *ergo* auch tendenziell größere Astdurchmesser.

Bei beiden Baumarten konnte ein signifikanter negativer Einfluss des Astansatzwinkels auf den Astradialzuwachs als auch auf den Astdurchmesser nachgewiesen werden. Auf Grund dessen besitzen steile Äste unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen höhere Astradialzuwächse und in der Konsequenz auch größere Astdurchmesser. Neben ontogenetischen Einflüssen auf die Baumgestalt und Astarchitektur spielt bei beiden Baumarten vor allem das Dickenwachstum des Schaftes eine bedeutende Rolle. Hier konnte ein signifikanter positiver Einfluss des (mittleren) Schafradialzuwachses auf 1,3m Höhe auf die Astanzahl, den Astradialzuwachs und auf den Astansatzwinkel festgestellt werden. Implizit konnte des Weiteren ein positiver Einfluss des Schafradialzuwachses auf 1,3m Höhe auf den Kronendurchmesser und somit auch auf den Astdurchmesser unter sonst gleichen Bedingungen festgestellt werden. Neben dem direkten Einfluss des Schafradialzuwachses auf Astradialzuwachs und Astdurchmesser existiert somit ein weiterer, indirekter Einfluss durch den Astansatzwinkel.

Im Teilbereich Astmortalitätsprozess wurde auf Einzelbaumebene ein Modell zur Prognose der Kronenansatzhöhe sowie auf Einzelastebene ein Modell zur Prognose des Aststatus‘ erstellt. Zusammenfassend kann der Astmortalitätsprozess beider Baumarten zunächst als abhängig von der Standortsgüte beschrieben werden. Es ist ein schnelleres Aststerben auf besseren Standorten zu erwarten. Unabhängig vom Standort ist für die Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen jedoch ein schnellerer Astmortalitätsprozess zu erwarten. Des Weiteren konnte bei beiden Baumarten ein verzögerter Astmortalitätsprozess für Bäume mit vergleichsweise hohem durchschnittlichem jährlichem Radialzuwachs festgestellt werden. Eine Erhöhung des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses verzögert den Astmortalitätsprozess für die Baumart Eiche kaum merklich, für die Baumart Buche jedoch evident. Weiterhin konnte bei beiden Baumarten ein verzögerter Astmortalitätsprozess mit

zunehmendem Astdurchmesser festgestellt werden, welche sich bei der Baumart Buche als ausgeprägter erwies. Zusätzlich konnte ein ontogenetischer Einfluss auf den Astmortalitätsprozess festgestellt werden. Es ist mit einer Kulmination der Kronenansatzverschiebung parallel zur Kulmination des laufenden Baumhöhenzuwachses zu rechnen, wobei die Baumart Eiche unter sonst gleichen Bedingungen immer auch einen schnelleren Astmortalitätsprozess gegenüber der Baumart Buche aufweist.

Im Teilbereich Astüberwallung und innere Ästigkeit wurde auf Einzelbaumebene ein Modell zur Prognose der astfreien Schaftlänge und auf Einzelastebene ein Modell zur Schätzung der Astüberwallungsdauer, der Astüberwallungswahrscheinlichkeit und des Radius' des asthaltigen Kerns erstellt. Trotz eines rascheren Astmortalitätsprozesses der Baumart Eiche erweist sich die Astüberwallung aufgrund der spezifischen Zersetzungseigenschaften abgestorbener Eichenäste unter sonst gleichen Bedingungen im Vergleich zu Ästen der Baumart Buche als langsamer voranschreitend. Der Astdurchmesser der Baumart Eiche wirkt sich dabei gravierender auf die Astüberwallungsdauer und das Ausmaß der inneren Ästigkeit aus, was durch voranschreitende Verkernungsprozesse mit zunehmendem Astdurchmesser und somit zunehmend erschwerte Holzzersetzung toten Astmaterials zu erklären ist.

Dabei lässt sich der Schafradialzuwachs als wichtigste Einflussvariable auf die Astüberwallung und innere Ästigkeit identifizieren. Dichtständiger erwachsene Bäume mit geringerem durchschnittlichem Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe besitzen unter der Voraussetzung sonst gleicher Bedingungen dünnere Äste, welche rascher absterben, ausweislich des Astüberwallungsmodells auch schneller überwallt werden und nach der Überwallung einen schmaleren asthaltigen Kern im Schaftholz hinterlassen. Jedoch ist es, um die Astüberwallung zu forcieren, zu diesem Zeitpunkt wichtig, das Dickenwachstum z.B. durch Durchforstungsmaßnahmen weiter zu fördern. Klassischerweise wird dieses Bewirtschaftungsprinzip in der Praxis in Form des „zweiphasigen Pflegekonzepts“ umgesetzt.

8 SUMMARY

This study analyses tree shape, branching architecture and natural pruning processes related to diameter growth of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.), which exhibit contrasting light requirements. Simple and easy to interpret growth models have been developed to depict relevant influencing factors on tree shape, such as branching architecture and natural pruning processes on single tree level, and on single branch level, which should be filtered out and quantified. The models have first been fitted separately to the species-specific data material and in a second step, the two tree species have been contrasted based on their specific growth models in order to show differences and interpret them based on their contrasting autecological behavior. All models have also been related to diameter growth. Based on the gained results, silvicultural suggestions should be made in a third step.

The methodology of this work follows a retrospective approach combined with the principle of space-for-time substitution with plots of different developmental phases. Trees have mainly been sampled on plots in western Baden- Württemberg, Germany. In each stand 5 trees of Kraft's class 1 to 4 have been measured (tree height, crown base height, crown diameter) and felled for branch measurements (height, diameter, angle, length and exposition of the branch). Overall, 143 sample trees, of which 69 beech trees and 74 oak trees have been measured. Sample trees have been divided into one-meter sections. In each section the thickest occluded dead branch, the thickest dead branch and the thickest living branch have been sampled for additional analyses. Besides distance- related measures, the year of branch death and, if applicable, the year of full branch occlusion have been detected on dead branch sample material after appropriate preparation. Radial increment measurements have been carried out on sampled living branches as well as on their adjacent stem discs. Altogether almost 4200 branches have been measured, of which about 60% were living branches.

In the section tree form and branching architecture, models have been fitted to predict height growth, crown diameter and total branch number on single tree level. On single branch level, models to predict branch length, branch diameter, branch radial increment and branch angle have been developed. Beech showed *ceteris paribus* a wider crown in comparison to oak, which was also reflected by its longer branches. Moreover, beech showed a larger number of living branches in its crown in comparison to oak. The light- demanding oak showed a faster height development as well as a faster radial increment on stem and branches, which, other factors being equal, reflects the tendency of larger branch diameters. There is a significant negative influence of branch angle on branch diameter for both species,

which means, that steeper branches exhibit larger radial increments and, as a result, larger branch diameters. Besides ontogenetic impacts, there is a clear positive influence of stem radial growth on crown diameter as well as on branch number, - diameter, - radial increment and - angle. For this reason, stem radial increment influences branch diameters twofold by, first, having an indirect influence through branch angle and, second, having a direct influence on branch diameter growth itself.

A model to predict crown base height on single tree level and a model to predict branch status on single branch level in the section branch mortality process has been developed. To sum up, the branch mortality process of both tree species is primarily dependent on site, where trees on better sites show faster branch mortality processes. Independently of site, oak shows a faster branch mortality process. Comparably higher stem radial increments delay branch mortality processes, where the delay on oak is less discernable. Branch mortality process is also delayed by branch diameter, where larger branches show a better chance to survive a longer time. This observation is also more pronounced on beech. There is also an additional ontogenetic influence on branch mortality process, which reaches its maximum speed during culmination of height increment. Oak always shows a faster branch mortality process than beech.

On single tree level a model to predict the length of the branch-free bole has been developed to describe branch occlusion. On single branch level, models to predict occlusion time, the probability of occlusion as well as a model to predict the radius of the knotty core have been developed. Despite the faster branch mortality process, oak shows a longer occlusion process resulting from its specific characteristics of wood decay processes. The delaying influence of branch diameter on branch occlusion process as well as its negative influence on branch occlusion probability and its positive influence on the radius of the knotty core is more pronounced for oak. Stem radial increment is the most important influencing factor on branch occlusion and the radius of the knotty core, by influencing branch diameter and the speed of the branch mortality process. Trees showing a comparably low radial increment have smaller branches and show a rapid branch mortality process, which means, that the branches die at a younger age. Occlusion time will therefore be reduced and the diameter of the knotty core will remain small. After having reached the desired length of the branch-free bole, thinning is necessary to speed up occlusion time of the remaining dead branches and emphasize diameter growth of the stem to reach the target diameter. This can be done by implementing a two phase silvicultural management system.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- ABETZ, P. & MERKEL, O. (1968): Aststärken und Schaftovalität in Fichten- Reihenbeständen. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 139 (6): 138-145.
- ABETZ, P. & UNFRIED, P. (1983): Aststärken an Z-Bäumen in einem Fichten-Standraumversuch im Forstbezirk Riedlingen/Donau. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 155: 189–197.
- ACHEN, C. (2000): Why Lagged Dependent Variables Can Suppress the Explanatory Power of Other Independent Variables. – Online verfügbar unter <http://polmeth.wustl.edu/mediaDetail.php?docId=175>. 42 S.
- ACHIM, A., GARDINER, B., LEBAN, J.-M. & DAQUITAINE, R. (2006): Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. – New Zealand Journal of Forestry Science 36 (2-3): 246–264.
- AIBA, S. & KOHYAMA, T. (1997): Crown Architecture and Life-History Traits of 14 Tree Species in a Warm- Temperate Rain Forest. Significance of Spatial Heterogeneity. – The Journal of Ecology 85 (5): 611–624.
- ALCORN, P., PYTTEL, P., BAUHUS, J., SMITH, G., THOMAS, D., JAMES, R. & 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 252: 41–51.
- ALDINGER, E., HÜBNER, W., MICHIELS, H.-G., MÜHLHÄÜBER, G., SCHREINER, M. & WIEBEL, M. (1998): Überarbeitung der Standortkundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren. – Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 39: 5–71.
- ANDERSON, D., BURNHAM, K. & THOMPSON, W. (2000): Null Hypothesis Testing: Problems, Prevalence, and an Alternative. – The Journal of Wildlife Management 64 (4): 912–923.
- ANDREN, T. (2007): Econometrics. – Ventus Publishing ApS. 141 S.
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs u. Ertrag von Waldbeständen. – BLV Verl.-Ges, München, Bonn, Wien. 490 S.
- BACKHAUS, K. (1996): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung ; mit 205 Tabellen. 8., verb. – Springer, Berlin [u.a.]. 591 S.
- BALDWIN, V., PETERSON, K., CLARK, A., FERGUSON, R., STRUB, M. & BOWER, D. (2000): The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. – Forest Ecology and Management 137 (1-3): 91–102.
- BALZERT, H., SCHÄFER, C., SCHRÖDER, M. & KERN, U. (2008): Wissenschaftliches Arbeiten: Wissenschaft, Quellen, Artefakte, Organisation, Präsentation. – W3L GmbH. 368 S.
- BARBAROUX, C. & BREDA, N. (2002): Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. – Tree Physiology 22 (17): 1201–1210.
- 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 28: 1007-1015.

- BECKER, G. (2010): Der Wald und seine Nutzung. – In: DEPENHEUER, O. & MÖHRING, B. (Edit.): Waldeigentum: 149–162. Springer Berlin Heidelberg.
- BEINHOFER, B. (2010-03-01): Comparing the financial performance of traditionally managed beech and oak stands with roomy established and pruned stands. – European Journal of Forest Research 129 (2): 175–187.
- BERTRAM, J. (1989): Size-dependent differential scaling in branches: the mechanical design of trees revisited. – Trees- Structure and Function 3 (4): 241–253.
- BJÖRKLUND, L. (1997): The interior knot structure of *pinus sylvestris* stems. – Scandinavian Journal of Forest Research 12: 403–412.
- BLANK, R. (1997): Ringporigkeit des Holzes und häufige Entlaubung durch Insekten als spezifische Risikofaktoren der Eichen. – Forst und Holz 52 (9): 235–242.
- BÖRNER, M. (1997): Zu Wachstum und Wachstumsreaktion der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) nach Freistellung im fortgeschrittenen Alter. Eine einzelbaumorientierte Untersuchung waldwachstumskundlicher und betriebswirtschaftlicher Aspekte der sogenannten Zieldurchmesserernte. Dissertation. – Freiburg i. Brsg., 197 S.
- BONNEMANN, A. (1956): Eichen-Buchen-Mischbestände. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 127 (2/3): 33–42.
- 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. Freiburg (Breisgau): Albert- Ludwigs- Universität und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Baden- Württemberg, 2006 (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung; Bd. 34). Zugl. Freiburg (Breisgau), Univ., Diss., 2005. 118 S.
- BONSER, S. & AARSSSEN, L. (1994): Plastic Allometry in Young Sugar Maple (*Acer saccharum*): Adaptive Responses to Light Availability. – American Journal of Botany 81 (4): 400–406.
- BORCHERT, R. & TOMLINSON, P. (1984): Architecture and Crown Geometry in *Tabebuia rosea* (Bignoniaceae). – American Journal of Botany 71 (7): 958–969.
- BOZZUTO, L. & WILSON, B. (1988): Branch angle in red maple trees. – Canadian Journal of Forest Research 18: 643–646.
- BRAUN, H. (1963): Die Organisation des Stammes von Bäumen und Sträuchern. – Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart. 162 S.
- BULLOCK, S. (2000): Developmental Patterns of Tree Dimensions in a Neotropical Deciduous Forest. – Biotropica 32 (1): 42–52.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (1969): Sortiermerkblätter für Stammholz .Vereinbart zwischen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg und den Baden- Württembergischen Sägewerksverbänden. Forst-HKS. Stand Oktober 1988. –.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ; ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2004): Die zweite BundeswaldinventurBW1². Das Wichtigste in Kürze. Bonn/Berlin: Selbstverlag, 108 S.
- BURGER, H. (1947): Holz, Blattmenge und Zuwachs. Die Eiche. – In: BURGER, H. (Edit.): Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen: 211–278, Zürich.

- BURGER, H. (1949-1950): Holz, Blattmenge und Zuwachs. Die Buche. – In: BURGER, H. (Edit.): Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen: 419–467, Zürich.
- BURNHAM, K., WHITE, G. & ANDERSON, D. (1995): Model Selection Strategy in the Analysis of Capture-Recapture Data. – *Biometrics* 51 (3): 888–898.
- BURSCHEL, P. & HUSS, J. (1997): Grundriß des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. 2., neubearb. und erw. Aufl. – Parey, Berlin. 487 S.
- BUTIN, H. & KOWALSKI, T. (1983a): Die natürliche Astreinigung und ihre biologischen Voraussetzungen. Die Pilzflora der Stieleiche (*Quercus robur* L.). – *European Journal of Forest Pathology* 13: 428–439.
- BUTIN, H. & KOWALSKI, T. (1983b): Die natürliche Astreinigung und ihre biologischen Voraussetzungen. I. Die Pilzflora der Buche (*Fagus sylvatica* L.). – *European Journal of Forest Pathology* 13: 322–334.
- CANHAM, C. (1988): Growth and Canopy Architecture of Shade-Tolerant Trees: Response to Canopy Gaps. – *Ecology* 69 (3): 786–795.
- CANHAM, C. (1989): Different Responses to Gaps among Shade-Tolerant Tree Species. – *Ecology* 70 (3): 548–550.
- CASTÉRA, P. & MORLIER, V. (1991): Growth patterns and bending mechanics of branches. – *Trees-Structure and Function* 5 (4): 232–238.
- CEULEMANS, R., STETTLER, R. & HINCKLEY, T. (1990): Crown architecture of *Populus* clones as determined by branch orientation and branch characteristics. – *Tree Physiology* (7): 157–167.
- CHAMBEL, M., CLIMENT, J., ALIA, R. & VALLADARES, F. (2005): Phenotypic plasticity. a useful framework for understanding adaptation in forest species. – *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 14 (3): 334–344.
- CHAPMAN, J. & GOWER, S. (1991): Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. – *Canadian Journal of Forest Research* 21 (10): 1533–1543.
- CHEN, H., KLINKA, K. & KAYAHARA, G. (1996): Effects of light on growth, crown architecture, and specific leaf area for naturally established *Pinus contorta* var. *latifolia* and *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* saplings. – *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1149–1157.
- CLAVEAU, Y., MESSIER, C., COMEAU, P. & COATES, K. (2002): Growth and crown morphological responses of boreal conifer seedlings and saplings with contrasting shade tolerance to a gradient of light and height. – *Canadian Journal of Forest Research* 32 (3): 458.
- COCHARD, H. & TYREE, M. (1990): Xylem dysfunction in *Quercus*: vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. – *Tree Physiology* 6 (4): 393–407.
- COCHARD, H., LEMOINE, D., AMÉGLIO, T. & GRANIER, A. (2001): Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. – *Tree Physiology* 21 (1): 27–33.
- COCHRANE, L. & FORD, E. (1978): Growth of a Sitka Spruce plantation: Analysis and stochastic description of the development of the branching structure. – *Journal of Applied Ecology* 15: 227–244.
- COLIN, F. & HOULLIER, F. (1991): Branchiness of norway spruce in north-eastern France: modelling vertical trends in maximum nodal branch size. – *Annales des Sciences Forestières* 48: 679–693.

- COLIN, F. & HOULLIER, F. (1992): Branchiness in norway spruce in northeastern France: predicting the main crown characteristics from usual tree measurements. – *Annales des Sciences Forestières* 49: 511–538.
- CORNELISSEN, J. (1993): Aboveground Morphology of Shade-Tolerant *Castanopsis fargesii* Saplings in Response to Light Environment. – *International Journal of Plant Sciences* 154 (4): 481–495.
- COOMES, D. & GRUBB, P. (1998): A comparison of 12 tree species of Amazonian caatinga using growth rates in gaps and understorey, and allometric relationships. – *Functional Ecology* 12 (3): 426–435.
- DAWKINS, H. (1963): Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. – *Commonwealth Forestry Review* 42: 318–333.
- DELAGRANGE, S., MESSIER, C., LECHOWICZ, M. & DIZENGREMEL, P. (2004): Physiological, morphological and allocational plasticity in understory deciduous trees: importance of plant size and light availability. – *Tree Physiology* 24: 775–784.
- DELEUZE, C., HERVÉ, J.-C., COLIN, F. & RIBEYROLLES, L. (1996): Modelling crown shape of *Picea abies*: spacing effects. – *Canadian Journal of Forest Research* 26 (11): 1957–1966.
- DENFFER, D. von & STRASBURGER, E. (1983): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Mit 50 Tabellen. 32. Aufl. / . – Fischer, Stuttgart. 1161 S.
- DIELER, J. & PRETZSCH, H. (2010): Zur Kronenplastizität der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im Rein- und Mischbestand. – In: NAGEL, J. (Edit.): Tagungsband Sektion Ertragskunde Tagung 2010: 109–117.
- DORUSKA, P. & BURKHART, H. (1994): Modeling the diameter and locational distribution of branches within the crowns of loblolly pine trees in unthinned plantations. – *Canadian Journal of Forest Research* 24 (12): 2362–2376.
- DUCHESNEAU, R., LESAGE, I., MESSIER, C. & MORIN, H. (2001): Effects of light and intraspecific competition on growth and crown morphology of two size classes of understory balsam fir saplings. – *Forest Ecology and Management* 140 (2-3): 215–225.
- DUJESIEFKEN, D., LIESE, W., SHORTLE, W. & MINOCHA, R. (2005): Response of beech and oaks to wounds made at different times of the year. – *European Journal of Forest Research* 124: 113–117.
- DURBIN, J. (1970): Testing for Serial Correlation in Least-Squares Regression When Some of the Regressors are Lagged Dependent Variables. – *Econometrica* 38 (3): 410–421.
- EISNER, N., GILMAN, E. & GRABOWSKY, J. (2002): Branch Morphology impacts compartmentalization of pruning wounds. – *Journal of Arboriculture* 28 (2): 99–105.
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5., stark veränd. und verb. Aufl. – Ulmer, Stuttgart. 1357 S.
- EPP, P. (2004): Zur Abschätzung des Zuwachspotentials von Fichten und Tannen nach starker Freistellung in Plenterüberführungsbeständen. Freiburg (Breisgau): Albert- Ludwigs- Universität und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Baden- Württemberg, 2004 (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung; Bd. 24). Zugl. Freiburg (Breisgau), Univ., Diss., 2003. 135 S.
- EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (1997): Laub- Rundholz Qualitäts- Sortierung. Teil 1: Eiche und Buche. – Beuth Verlag GmbH, Berlin 79.040 (EN1316-1).

- 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* 20: 243–251.
- FARNSWORTH, K. & NIKLAS, K. (1995): Theories of Optimization, Form and Function in Branching Architecture in Plants. – *Functional Ecology* 9 (3): 355–363.
- FIELD, A. (2009): *Discovering statistics using SPSS*. 3. ed. – Sage, Los Angeles, Calif. 821 S.
- FISHER, J. & STEVENSON, J. (1981): Occurrence of Reaction Wood in Branches of Dicotyledons and Its Role in Tree Architecture. – *Botanical Gazette* 142 (1): 82–95.
- FREIST-DORR, M. (1992a): Struktur und Wachstum süddeutscher Traubeneichen- Buchen-Mischbestände. – *Forstliche Forschungsberichte München*.
- FREIST-DORR, M. (1992b): Das Einzelbaumwachstum in langfristig beobachteten Mischbestandsversuchen, dargestellt am Beispiel der Eichen-Buchen-Versuchsfläche Waldbrunn 105. – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 111 (1): 106-116-116.
- FREUND, R., WILSON, W. & SA, P. (2006): *Regression analysis. Statistical modeling of a response variable*. 2. ed. – Elsevier Academic Press, Boston, Mass. 459 S.
- FUJIMORI, T. (1993): Dynamics of crown structure and stem growth based on knot analysis of a hinoki cypress. – *Forest Ecology and Management* 56: 57–68.
- GADOW, K. von (2003): *Waldstruktur und Wachstum*. [Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004]. – Univ.-Verl. Göttingen; Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek, Göttingen. 254 S.
- GARBER S. & MAGUIRE D. (2005): Vertical trends in maximum branch diameter in two mixed-species spacing trials in the central Oregon Cascades. – *Canadian Journal of Forest Research* 35: 295–307.
- GELINSKY, H. (1933): Die Astreinigung der Rotbuche. – *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 65 (6): 289–322.
- GERECKE, K.-L. (1988): Herleitung und Anwendung von „Referenzbäumen“ zur Beschreibung des Wachstumsganges vorherrschender Tannen. Dissertation. – Freiburg (Breisgau). 141 S.
- GERSONDE, R. & O'HARA, K. (2005): Comparative tree growth efficiency in Sierra Nevada mixed-conifer forests. – *Forest Ecology and Management* 219 (1): 95–108.
- GILMORE, D. & SEYMOUR, R. (1997): Crown architecture of *Abies balsamea* from four canopy positions. – *Tree Physiology* 17: 71–80.
- GIVNISH, T. (1988): Adaptation to sun and shade: a whole-plant perspective. – *Australian Journal of Plant Physiology* 15: 63–92.
- GOCKEL, H. (1994): Soziale und qualitative Entwicklungen sowie Z-Baumhäufigkeiten in Eichenjungbeständen. Die Entwicklung eines neuen Pflanzschemas "Die Trupppflanzung". Göttingen, Univ., Diss., 1994. – . 168 S.
- GOTTSCHALK, K. (1994): Shade, leaf growth and crown development of *Quercus rubra*, *Quercus velutina*, *Prunus serotina* and *Acer rubrum* seedlings. – *Tree Physiology* 14 (7-8-9): 735–749.
- GRAH, R. (1961): Relationship between tree spacing, knot size and log quality in young douglas fir stands. – *Journal of Forestry* 59 (270-272).

- GRUBER, F. (1992): Dynamik und Regeneration der Gehölze. Teil I: Baumarchitektur auf ökologisch-dynamischer Grundlage und zur Bioindikation am Beispiel der Europäischen Fichte, Weißtanne, Douglasie und Europäischen Lärche. Habilitation. – Göttingen.
- HAAPANEN, M., VELLING, P. & ANNALA, M.-L. (1997): Progeny trial estimates of genetic parameters for growth and quality traits in Scots pine. – *Silva Fennica* 31 (1): 3–12.
- HACKE, U. & SAUTER, J. (1996): Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. – *Oecologia* 105 (4): 435–439.
- HAGEMEIER, M. (2002): Funktionale Kronenarchitektur mitteleuropäischer Baumarten am Beispiel von Hängebirke, Waldkiefer, Traubeneiche, Hainbuche, Winterlinde und Rotbuche. Berlin; Stuttgart: Cramer in der Gebr. Borntraeger-Verl.-Buchh. (Dissertationes Botanicae; Bd. 361). Zugl: Göttingen, Univ., Diss. 154 S.
- HAHN, D. (1995): Entscheidungshilfe für die Steuerung des Dickenwachstums von Buche (*Fagus sylvatica* L.). Entwicklung und Aufbau auf der Grundlage eines distanzabhängigen Einzelbaum-Konkurrenzmodells. Dissertation. – Freiburg i. Brsg., 225 S.
- HALLÉ, F. & NG, F. (1981): Crown construction in mature dipterocarp trees. – *Malaysian Forester* 44: 222–233.
- HALLÉ, F., OLDEMAN, R. & TOMLINSON, P. (1978): Tropical trees and forests. An architectural analysis. – Springer, Berlin. 441 S.
- HANECA, K. (2005): Tree-ring analyses of European oak: implementation and relevance in (pre-)historical research in Flanders. Dissertation. – Ghent.
- HANSEN, U., FIEDLER, B. & RANK, B. (2002): Variation of pigment composition and antioxidative systems along the canopy light gradient in a mixed beech/oak forest: a comparative study on deciduous tree species differing in shade tolerance. – *Trees - Structure and Function* 16 (4): 354–364.
- HARA, T., KIMURA, M. & KIKUZAWA, K. (1991): Growth Patterns of Tree Height and Stem Diameter in Populations of *Abies Veitchii*, *A. Mariesii* and *Betula Ermanii*. – *The Journal of Ecology* 79 (4).
- HARMER, R. (1989): The Effect of Mineral Nutrients on Growth, Flushing, Apical Dominance and Branching in *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. – *Forestry* 62 (4): 383–396.
- HARMER, R. (1992): Relationships between Shoot Length, Bud Number and Branch Production in *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. – *Forestry* 65 (1): 61–72.
- HASHIMOTO, R. (1990): Analysis of the morphology and structure of crowns in a young sugi (*Cryptomeria japonica*) stand. – *Tree Physiology* 6 (2): 119–134.
- HASHIMOTO, R. (1991): Canopy development in young sugi (*Cryptomeria japonica*) stands in relation to changes with age in crown morphology and structure. – *Tree Physiology* (8): 129–143.
- HAYWOOD, A. (2002): Growth of advanced European beech trees in the transformation phase in the southern Black Forest. Inaugural-Dissertation. – Freiburg im Breisgau. 144 S.
- HEIN, S. (2004): Zur Steuerung von Astreinigung und Dickenwachstum bei Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.). Freiburg (Breisgau): Albert-Ludwigs-Universität und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Baden-Württemberg, 2004 (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung; Bd. 25) Zugl. Freiburg (Breisgau), Univ., Diss., 2003. 263 S.

- HEIN, S. (2005): Wertästung bei Buche? – In: FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (Edit.): FVA-Einblick: 2–3. Selbstverlag, Freiburg, Br.
- HEIN, S. (2007): Ansätze zur Modellierung der Überwallung und inneren Ästigkeit bei Buche [*Fagus sylvatica* L.]. – In: NAGEL, J. (Edit.): Tagungsband Sektion Ertragskunde Tagung 2007: 17-28.
- HEIN, S. (2009): Modeling natural pruning of Common Ash, Sycamore and Wild Cherry. – In: SPIECKER, H., HEIN, S., MAKKONEN-SPIECKER, K. & THIES, M. (Edit.): Valuable broadleaved forests in Europe: 103–122. Brill; European Forest Institute, Leiden ;, Boston, [Joensuu].
- HEIN, S. & SPIECKER, H. (2007): Comparative analysis of occluded branch characteristics for *Fraxinus excelsior* and *Acer pseudoplatanus* with natural and artificial pruning. – Canadian Journal of Forest Research 37 (8): 1414–1426.
- HEIN, S., WEISKITTEL, A. & KOHNLE, U. (August 7–10, 2007a): Models on branch characteristics of wide- spaced Douglas- fir. – In: DYKSTRA, D. & MONSERUD, R. (Edit.): Forest Growth and Timber Quality: Crown Models and Simulation Methods for Sustainable Forest Management. Proceedings of an International Conference: 23–33.
- HEIN, S., MÄKINEN, H., YUE, C. & KOHNLE, U. (2007b): Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany. – Forest Ecology and Management 242 (2-3): 155–164.
- HEIN, S. (2008): Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica*. – Forest Ecology and Management 256 (12): 2046–2057.
- HEIN, S. & WEISKITTEL, A. (2010): Cutpoint analysis for models with binary outcomes: a case study on branch mortality. – European Journal of Forest Research 129 (4): 585-590.
- HEMERY, G. E., SAVILL, P. S. & PRYOR, S. N. (2005): Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. – Forest Ecology and Management 215 (1-3): 285–294.
- HEMPEL, G., WILHELM, K. & LIEPOLDT, W. (1889): Die Bäume und Sträucher des Waldes in botanischer und forstwirtschaftlicher Beziehung. – Hölzel, Wien. 3 Bände.
- HENRIKSSON, J. (2001): Differential shading of branches or whole trees: survival, growth, and reproduction. – Oecologia 126: 482–486.
- HENSKENS, F., BATTAGLIA, M., CHERRY, M. & BEADLE, C. (2001): Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. – Trees 15: 365–377.
- HERRMANN, L., MAURER, T. & STAHR, K. (2002): Digitaler Bodenatlas Baden-Württemberg. Online verfügbar unter: <https://www.uni-hohenheim.de/bodenatlas-bawue>
- HOCHBICHLER, E., KRAPPENBAUER, A. & MAYRHOFER, F. (1990): Ein Pflegemodell für Eichenjungbestände. Grünastung, eine wirtschaftliche Problemlösung der Wertholzerziehung. – Centralblatt für das gesamte Forstwesen 107 (1): 1–12.
- HÖLL, W. (1997): Storage and mobilization of carbohydrates and lipids. – In: RENNENBERG, H. (Edit.): Trees - contributions to modern tree physiology. Backhuys Publ., Leiden. 585 S.
- HORN, H. (1976): The adaptive geometry of trees. – Princeton University Press, Princeton, N.J. 144 S.
- HUBER, B. (1926): Ökologische Probleme der Baumkrone. – Planta 2 (4): 476–488.

- HUBER, B., SIEBENLIST, V. & NIEß, W. (1965): Jahrringchronologie Hessischer Eichen. – Büdinger Geschichtsverein, Büdingen. 4 S.
- ILOMÄKI, S., NIKINMAA, E. & MÄKELÄ, A. (2003): Crown rise due to competition drives biomass allocation in silver birch. – *Canadian Journal of Forest Research* 33 (12): 2395–2404.
- ILONEN, P., KELLOMÄKI, S., HARI, P. & KANNINEN, M. (1979): On distribution of growth in crown system of young Scots pine stands. – *Silva Fennica* 13 (4): 316–326.
- JANKIEWICZ, L. & STECKI, Z. (1976): Some mechanisms responsible for differences in tree form. – In: CANNELL, M. & LAST, F. (Edit.): *Tree physiology and yield improvement*: 157–172. Academic Pr., London.
- JANSSEN, J. & LAATZ, W. (2005): *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests ; mit 163 Tabellen.* 5., neu bearb. und erw. Aufl. – Springer, Berlin. 754 S.
- JOBLING, J. & PEARCE, M. (1977): *Free growth of oak.* – H.M.St.Of., London. 16 S.
- JÜTTNER, O. (1993): Ertragstafeln für Eichen (1955). – In: MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM, E. L. u. F. B.-W. (Edit.): *Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung.* Selbstverlag, Stuttgart.
- KAHLE, H.-P., KARJALAINEN, T., SCHUCK, A., AGREN, G., KELLOMÄKI, S., MELLERT, K., PRITZEL, J., REHFUESS, K. & SPIECKER, H. (Edit.) (2008): *Causes and consequences of forest growth trends in Europe. Results of the RECOGNITION project.* – Leiden [u.a.]. XIV, 261 S.
- KALLIOVIRTA, J. & TOKOLA, T. (2005): Functions for Estimating Stem Diameter and Tree Age Using Tree Height, Crown Width and Existing Stand Database Information. – *Silva Fennica* 39 (2): 227–248.
- KANTOLA, A. & MÄKELÄ, A. (2004): Crown development in Norway spruce [*Picea abies*(L.) Karst.]. – *Trees* 18 (4): 408–421.
- KEELE, L. & KELLY, N. (2006): Dynamic Models for Dynamic Theories: The Ins and Outs of Lagged Dependent Variables. – *Political Analysis* 14 (2): 186–205.
- KELLOMÄKI, S. & VÄISÄNEN, H. (1988): Dynamics of branch population in the canopy of young scots pine stands. – *Forest Ecology and Management* 24: 67–83.
- KELLOMÄKI, S., OKER-BLOM, P., VALTONEN, E. & VÄISÄNEN, H. (1989): Structural development of Scots Pine stands with varying initial density: Effect of pruning on branchiness of wood. – *Forest Ecology and Management* 27: 219–233.
- KELLOMÄKI, S. & OKER-BLOM, P. (1983): Canopy structure and light climate in a young Scots pine stand. – *Silva Fennica* 17 (1): 1–21.
- KERSHAW, J., MAGUIRE, D. & HANN D. (1990): Longvity and duration of radial growth increment in Douglas- fir branches. – *Canadian Journal of Forest Research* 20 (11): 1690–1695.
- KIENHOLZ, R. (1941): Seasonal Course of Height Growth in Some Hardwoods in Connecticut. – *Ecology* 22 (3): 249–258.
- KING, D. (1998): Relationship between Crown Architecture and Branch Orientation in Rain Forest Trees. – *Annals of Botany* 82: 1–7.

- 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 260 (11): 2023–2034.
- KIßLING (1895): Vergleichende Untersuchungen über das Wachstum der Eiche und Buche im Jugend- und Stangenholzalder. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 18: 154–159.
- KRAFT, G. (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. – Klindworth, Hannover. 147 S.
- KRAMER, H. (1976): Begriffe der Forsteinrichtung. – Sauerländer, Frankfurt am Main. 80 S.
- KRAMER, H. (1988): Waldwachstumslehre. Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. – Parey, Hamburg ;, Berlin. 374 S.
- KRAMER, H. & AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. 3., erw. – Sauerländer, Frankfurt am Main. 266 S.
- KRAMER, P. (1986): The role of physiology in forestry. – Tree Physiology 2 (1-2-3): 1–16.
- 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 Botany 37 (7): 1657–1668.
- KUPKA, I. (2007): Growth reaction of young wild cherry (*Prunus avium* L.) trees to pruning. – Journal of Forest Science 53: 555–560.
- KURTH, A. (1946): Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. – Zürich: (Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen; Bd. 24, 2. Heft) Zugl. Zürich, Univ., Diss., 1946. 76 S.
- LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN WÜRTTEMBERG (2007): Jahresbericht 2007 der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg. Forstwirtschaftsjahr 2007.
- LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (2008): Jahresbericht 2008 der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg. Forstwirtschaftsjahr 2008.
- LANDESBETRIEB FORST-BW (2009): Jahresbericht 2009 des Landesbetriebes ForstBW. Forstwirtschaftsjahr 2009.
- LANGSHAUSEN, J. (2009): Optionen der Wachstumssteuerung zur Produktion von Wertholz bei der Baumart Buche (*Fagus sylvatica* L.). Dissertation. – Freiburg (Breisgau). 297 S.
- LAROCQUE G. & MARSHALL P. (1994): Crown development in red pine stands. I: Absolute and relative growth measures. – Canadian Journal of Forest Research 24 (4): 762–774.
- LINNERT, M. (2009): Wachstum und Qualität junger Buchen in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand. Dissertation. – Univ.-Verl. Göttingen, Göttingen. 143 S.
- LÖHR, E. (1969): Jahresringverlust bei Laubbäumen mit ringporigem Holz. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 140: 18–22.
- LÖSCH, R. (2003): Wasserhaushalt der Pflanzen. 2., unveränd. Aufl. – Quelle und Meyer, Wiebelsheim. 595 S.
- LÜPKE, B. von (1987): Überlegungen zur Wertleistung und Begründung von gleichaltrigen Buchen-Eichen- Mischbeständen im Forstamt Rheinhausen. – Forst und Holz (19): 37–41.

- MAGUIRE, D., JOHNSTON, S. & CAHILL, J. (1999): Predicting branch diameters on second-growth Douglas-fir from tree-level descriptors. – *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1829–1840.
- MAGUIRE, D., MOEUR, M. & BENNETT, W. (1994): Models for describing basal diameter and vertical distribution of primary branches in Douglas fir. – *Forest Ecology and Management* 63: 23–55.
- MAGUIRE, D. & HANN, W. (1987): A Stem Dissection Technique for Dating Branch Mortality and Reconstructing Past Crown Recession. – *Forest Science* 33 (4): 858–871(14).
- MAGUIRE, D., KERSHAW, J. & HANN, D. (1991): Predicting the Effects of Silvicultural Regime on Branch Size and Crown Wood Core in Douglas-Fir. – *Forest Science* 37: 1409–1428.
- MAHALL, B. & WILSON, C. (1986): Environmental Induction and Physiological Consequences of Natural Pruning in the Chaparral Shrub *Ceanothus megacarpus*. – *Botanical Gazette* 147 (1): 102–109.
- MÄKELÄ, A. & VANNINEN, P. (2001): Vertical structure of Scots pine crowns in different age and size classes. – *Trees* 15: 385–392.
- MÄKINEN, H. (1996): Effect of intertree competition on branch characteristics of *Pinus sylvestris* families. – *Scandinavian Journal of forest research* 11: 129–136.
- MÄKINEN, H. (1999a): Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. – *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1216–1224.
- MÄKINEN, H. (1999b): Growth, suppression, death and self-pruning of branches of Scots Pine in southern and central Finland. – *Canadian Journal of Forest Research* 29: 585–594.
- MÄKINEN, H. (2002): Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. – *Trees* 16 (4-5): 346–353.
- MÄKINEN, H. & COLIN, F. (1998): Predicting branch angle and branch diameter of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information. – *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1686–1696.
- MÄKINEN, H. & COLIN, F. (1999): Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. – *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1225–1236.
- MÄKINEN, H. & SONG, T. (2002): Evaluation of models for branch characteristics of Scots pine in Finland. – *Forest Ecology and Management* 159 (1-3): 25–39.
- MÄKINEN, H. & HEIN, S. (2006): Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. – *European Journal of Forest Research* 125 (3): 239–248.
- MÄKINEN, H., OJANSUU, R., SAIRANEN, P. & YLI-KOJOLA, H. (2003a): Predicting branch characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from simple stand and tree measurements. – *Forestry* 76 (5): 525–546.
- MÄKINEN, H., OJANSUU, R. & NIEMISTÖ, P. (2003b): Predicting External Branch Characteristics of Planted Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) on the Basis of Routine Stand and Tree Measurements. – *Forest Science* 49 (2): 301–317.
- MARKS, P. (1975): On the Relation between Extension Growth and Successional Status of Deciduous Trees of the Northeastern United States. – *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 102 (4): 172–177.

- MAYER-WEDELIN, H. (1929): Ästigkeit und Aushaltung des Buchenholzes. – Forstarchiv 5: 413–418.
- MCMAHON, T. & KRONAUER, R. (1976): Tree structures: Deducing the principle of mechanical design. – Journal of Theoretical Biology 59 (2): 443–466.
- MCMAHON, T. (1973): Size and Shape in Biology. – Science 179 (4079): 1201–1204.
- MEDHURST, J. & BEADLE, C. (2001): Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. – Tree Physiology 21 (12-13): 989–999.
- MEREDIEU, C., COLIN, F. & HERVÉ, J.-C. (1998): Modelling branchiness of Corsican pine with mixed-effect models (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* (Poiret) Maire). – Annales des Sciences Forestières 55: 359–374.
- MESSIER, C., DOUCET, R., RUEL, J., CLAVEAU, Y., KELLY, C. & LECHOWICZ, M. (1999): Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests. – Canadian Journal of Forest Research 29 (6): 812–823.
- MESSIER, C. & NIKINMAA, E. (2000): Effects of light availability and sapling size on the growth, biomass allocation, and crown morphology of understory sugar maple, yellow birch, and beech. – Écoscience 7 (3): 345–356.
- MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM, E. L. u. F. B.-W. (Edit.) (1993): Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung. – Selbstverlag, Stuttgart. 188 S.
- MITSCHERLICH, G. & GADOW, K. von (1968): Über den Zuwachsverlust bei der Ästung von Nadelbäumen. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 139: 175–184.
- MOURELLE, C., KELLMAN, M. & KWON, L. (2001): Light occlusion at forest edges: an analysis of tree architectural characteristics. – Forest Ecology and Management 154 (1-2): 179–192.
- NEILSEN, W. & GERRAND, A. (1999): Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection. – Forest Ecology and Management 123 (2-3): 217–229.
- NIEMISTÖ, P. (1995): Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of Silver Birch (*Betula pendula*). – Scandinavian Journal of forest research 10: 235–244.
- NUTTO, L. (2000): Wachstum und Qualität von Eichen aus Nesterpflanzung. – AFZ- der Wald 55 (8).
- NUTTO, L., SPATHELF, P. & ROGERS, B. (2005): Managing diameter growth and natural pruning of *Parana pine*, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O Ktze., to produce high value timber. – Annals of Forest Science 62: 163–173.
- 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.). – [Hrsg. Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg], Freiburg (Breisgau). (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung; Bd.5). Zugl. Freiburg (Breisgau), Univ. Diss., 1998.

- OKER-BLOM, P., KELLOMAKI, S., VALTONEN, E. & VAISANEN, H. (1988): Structural development of *pinus sylvestris* stands with varying initial density: A simulation model. – Scandinavian Journal of Forest Research 3 (1): 185–200.
- OSADA, N., TATENO, R., HYODO, F. & TAKEDA, H. (2004): Changes in crown architecture with tree height in two deciduous tree species: developmental constraints or plastic response to the competition for light? – Forest Ecology and Management 188 (1-3): 337–347.
- OTEBEYE, G. (1992): Genetics of growth and quality characteristics of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. – Siva Genetica 41 (4-5): 249–252.
- PASW Statistics (2010). IBM SPSS Inc., Chicago, IL, Version 18.0.
- PERSSON, A. (1994): How geotype and silviculture interact in forming timber properties. – Silva Fennica 28 (4): 275–282.
- PETRIȚAN, A., LÜPKE, B. von & PETRIȚAN, I. (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 128 (1): 61–74.
- PETRUNCINO, M., BRIGGS, D. & BARBOUR, R. (1997): Predicting pruned branch stub occlusion in young, coastal Douglas-fir. – Canadian Journal of Forest Research 27: 1074–1082.
- PINKARD, E. & NEILSEN, W. (2003): Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. – Forest Ecology and Management 172: 215–227.
- PÖYKKÖ, T. (1982): Genetic variation in quality characters of scots pine. – Silva Fennica 16 (2): 135–140.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. – Parey, Berlin [u.a.] 414 S.
- PUKKALA, T., KARSIKKO, J. & KOLSTRÖM, T. (1992): A spatial model for the diameter of thickest branch of Scots pine. – Silva Fennica 26 (4): 219–230.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2010): R. A language and environment for statistical computing. – The R Foundation for Statistical computing.
- RAPRAEGER, E. (1939): Development of Branches and Knots in Western White Pine. – Journal of Forestry 37 (3): 239–245.
- REUKEMA, D. (1959): Missing annual rings in branches of young-growth Douglas-fir. – Ecology 40 (3): 480–482.
- ROBERTS, S. (1994): The occurrence of non-ring producing branches in *Abies lasiocarpa*. – Trees-Structure and Function 8 (6): 263–267.
- ROBINSON, A. (February 3 2010): icebreakR. Online verfügbar unter: cran.r-project.org/doc/contrib/Robinson-icebreaker.pdf.
- ROLOFF, A. (1993): Kronenentwicklung und Vitalitätsbeurteilung ausgewählter Baumarten der gemäßigten Breiten. – Sauerländer, Frankfurt am Main. 258 S.
- ROLOFF, A. (1985): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Bd.93. 258 S.

- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen. Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. – Ulmer, Stuttgart. 164 S.
- SACHS, L. & HEDDERICH, J. (2006): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R ; mit 180 Tabellen. 12., vollst. neu bearb. Aufl. – Springer, Berlin. 702 S.
- SAVIN, N. & WHITE, K. (1977): The Durbin-Watson Test for Serial Correlation with Extreme Sample Sizes or Many Regressors. – *Econometrica* 45 (8): 1989–1996.
- SCHENDERA, C. (2008): Regressionsanalyse mit SPSS. – Oldenbourg, München. 466 S.
- SCHLENKER, G. & MÜLLER, S. (1973): Erläuterungen zur Karte der regionalen Gliederung von Baden- Württemberg I. Teil. (Wuchsgebiete Neckarland und Schwäbische Alb). – *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 23: 3–66.
- SCHLENKER, G. & MÜLLER, S. (1975): Erläuterungen zur Karte der regionalen Gliederung von Baden- Württemberg II. Teil. (Wuchsgebiet Südwestdeutsches Alpenvorland). – *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 24 (1): 3–37.
- SCHLENKER, G. & MÜLLER, S. (1978): Erläuterungen zur Karte der regionalen Gliederung von Baden- Württemberg III. Teil. (Wuchsgebiet Schwarzwald). – *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung* 26 (1): 3–52.
- SCHMIDT, M. (2001): Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. 302 S.
- SCHMIDT, M., GADOW, K. von & HÖFLE, H. (2005): Vorkommen und Ausprägung von fakultativen Kerntypen bei Rotbuche auf südniedersächsischen Kalk- und Rötstandorten. – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 176 (11/12): 200–212.
- SCHOBER, R. (1993): Ertragstabellen für die Baumart Buche (1971). – In: MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM, E. L. u. F. B.-W. (Edit.): *Hilfstabellen für die Forsteinrichtung*. Zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung. Selbstverlag, Stuttgart.
- SCHÖPF, J. (1954): Untersuchungen über Astbildung und Astreinigung der Selber Kiefer. – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 73 (9- 10): 275–290.
- SCHULZ, H. (1959): Untersuchungen über die Bewertung und Güteigenschaften des Eichenholzes aus verschiedenen Wuchsgebieten. – *Sauerländer*, Frankfurt am Main. 90 S.
- SCHWAPPACH, A. (1916): Zur Entwicklung der Mischbestände von Eiche und Buche. – *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 48 (12): 615–623.
- SHIGO, A. (1984): Compartmentalization: A conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. – *Annual Review of Phytopathology* 22 (22): 189–214.
- SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI K. & KIRA T. (1964-06-01): A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory. I. Basic analysis. – *Japanese Journal of Ecology* 14 (3): 97–105.
- SHUKLA, R. & RAMAKRISHNAN, P. (1986): Architecture and Growth Strategies of Tropical Trees in Relation to Successional Status. – *Journal of Ecology* 74: 33–46.
- SIPE, T. & BAZZAZ, F. (1994): Gap Partitioning among Maples (*Acer*) in Central New England: Shoot Architecture and Photosynthesis. – *Ecology* 75 (8): 2318–2332.

- SLOBODA, B. (1971): Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. – Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg (Breisgau), Bd.5.
- SONE, K., NOGUCHI, K. & TERASHIMA, I. (2005): Dependency of branch diameter growth in young *Acer* trees on light availability and shoot elongation. – *Tree Physiology* 25: 39–48.
- SONE, K., NOGUCHI, K. & TERASHIMA, I. (2006): Mechanical and ecophysiological significance of the form of a young *Acer rufinerve* tree: vertical gradient in branch mechanical properties. – *Tree Physiology* 26: 1549–1558.
- SPERRY, J., NICHOLS, K., SULLIVAN, J. & EASTLACK, S. (1994): Xylem Embolism in Ring-Porous, Diffuse-Porous, and Coniferous Trees of Northern Utah and Interior Alaska. – *Ecology* 75 (6): 1736–1752.
- SPIECKER, H. (1983): Durchforstungsansätze bei Eiche unter besonderer Berücksichtigung des Dickenwachstums. – *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 154: 21–30.
- 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, Bd.72: 155 S.
- SPIECKER, H. (1999): Overview of Recent Growth Trends in European Forests. – *Water, Air, & Soil Pollution* 116 (1): 33–46.
- SPIECKER, H., HEIN, S., MAKONEN-SPIECKER, K. & THIES, M. (Edit.) (2009): Valuable broadleaved forests in Europe. – Brill; European Forest Institute, Leiden;, Boston, [Joensuu]. 256 S.
- SPIECKER, H. (2011): Berechnung des Baumabstands unter Annahme eines Dreiecksverbands. Mündliche Mitteilung vom 08.04.2011, Freiburg (Breisgau).
- SPRINGMANN, S., ROGERS, R. & SPIECKER, H. (2011): Impact of artificial pruning on growth and secondary shoot development of wild cherry (*Prunus avium* L.). – *Forest Ecology and Management* 261 (3): 764–769.
- SPRUGEL, D., HINCKLEY, T. & SCHAAP, W. (1991): The theory and practice of branch autonomy. – *Annual Review of Ecology and Systematics* 22: 309–334.
- STANFORD UNIVERSITY (2010): Critical Values for the Durbin-Watson Test: 1% Significance Level. Online verfügbar unter <http://www.stanford.edu/~clint/bench/dw01d.htm>.
- SUMIDA, A. & KOMIYAMA, A. (1997): Crown Spread Patterns for Five Deciduous Broad-leaved Woody Species: Ecological Significance of the Retention Patterns of Larger Branches. – *Annals of Botany* 80 (6): 759–766.
- TAKAHASHI, K. (1996): Plastic response on crown architecture to crowding in understory trees of two co-dominating conifers. – *Annals of Botany* 77 (2): 159–164.
- TAKEUCHI, I. (1981): Studies on the occlusion of branch stubs after artificial pruning of mature stands in a 72-year-old Sugi stand. – *Journal of the Japanese Forestry Society* 63 (2): 39–45.
- TILMAN, D. (1977): Resource Competition between Plankton Algae: An Experimental and Theoretical Approach. – *Ecology* 58 (2): 338–348.
- TILMAN, D. (1988): Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. – Princeton Univ. Press, Princeton, NJ. 360 S.

- TOJIC, K. (2010): Einordnung des Wachstums von Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) im Zeitraum zwischen den zwei Bundeswaldinventuren (1987 und 2002) in den längerfristigen Kontext. Dissertation. – Freiburg (Breisgau).
- UHL, E., METZGER, H. G. & SEIFERT, T. (2006): Dimension und Wachstum von solitären Buchen und Eichen. – In: NAGEL, J. (Edit.): Tagungsband Sektion Ertragskunde Tagung 2006: 47–53.
- ULVCRONA, K., CLAEISSON, S., SAHLÉN, K. & LUNDMARK, T. (2007): The effects of timing of pre-commercial thinning and stand density on stem form and branch characteristics of *Pinus sylvestris*. – *Forestry* 80 (3): 323–335.
- UMEKI, K. & KIKUZAWA, K. (2000): Patterns in individual growth, branch population dynamics, and growth and mortality of first-order branches of *Betula platyphylla* in northern Japan. – *Annales des Sciences Forestières* 57 (5/ 6): 587–598.
- UNTHEIM, H. (1996): Zur Veränderung der Produktivität von Waldstandorten. Mitteilungen der Baden- Württembergischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Bd. 198. Zugl. Univ. Diss. – Freiburg (Breisgau). 239 S.
- VALLADARES, F. & NIINEMETS, Ü. (2008): Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences. – *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39 (1): 237–257.
- VOLKERT, E. (1953): Untersuchungen über das Verhalten von Astwunden nach Grünastung und natürlichem Astabfall bei Rotbuche. – *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 72 (3- 4): 110–124.
- WATT, M., MOORE, J. & MCKINLAY, B. (2005): The influence of wind on branch characteristics of *Pinus radiata*. – *Trees* 19 (1): 58–65.
- WEINREICH, A. (2000): Qualitätsentwicklung junger Eichen in Bestandeslücken. Freiburg (Breisgau), Univ. Diss., 2000. 249 S.
- WEISKITTEL, A. & MAGUIRE, D. (2006): Branch surface area and its vertical distribution in coastal Douglas-fir. – *Trees* 20 (6): 657–667.
- WHITE, D. (1993): Relationships between foliar number and the cross-sectional areas of sapwood and annual rings in red oak (*Quercus rubra*) crowns. – *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1245–1251.
- WIEDEMANN, E. (1949): Ertragstabellen der wichtigen Holzarten bei verschiedener Durchforstung sowie einiger Mischbestandsformen. – Schaper, Hannover.
- WILSON, B. (2000): Apical control of branch growth and angle in woody plants. – *American Journal of Botany* 87 (5): 601–607.
- WITOWSKI, J. (1997): Gas exchange of the lowest branches of young Scots pine: a cost–benefit analysis of seasonal branch carbon budget. – *Tree Physiology* 17: 757–765.
- WOLFF, B. (2003): Das Klima in den forstlichen Wuchsgebieten und Wuchsbezirken Deutschlands. – Wiedebusch, Hamburg. 82 S.
- YAMANE, T. & ZUBROD, H.-J. (1976): Statistik. : ein einführendes Lehrbuch. – Fischer-Taschenbuch-Verl., Frankfurt am Main. 858 S.
- YOU DEN, W. (1950): Index for rating diagnostic tests. – *Cancer* 3 (1): 32–35.
- ZEIDE, B. (1993): Analysis of Growth Equations. – *Forest Science* 39: 594–616.

- ZHANG, J. & YU, K. (1998): What's the Relative Risk? A Method of Correcting the Odds Ratio in Cohort Studies of Common Outcomes. – JAMA: The Journal of the American Medical Association 280 (19): 1690–1691.
- ZIEREN, A. (1970): Zur Ästung von Esche und Eiche. – AFZ- der Wald 25 (13): 771–772.
- ZIMMERLE, H. (1943): Über Ästungsversuche bei der Rotbuche. – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 119: 88–104.

10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Parameterschätzer der Kronenansatzhöhenmodelle sowie der Modelle zur Schätzung der astfreien Schaftlänge von LANGSHAUSEN (2009) (Buche) und NUTTO (1999) (Eiche).....	27
Tabelle 2: Parameterschätzer des nicht - linearen Höhenwachstumsmodells auf Datengrundlage der Ertragstafelwerte zur Vorauswahl der zu untersuchenden Bestände	44
Tabelle 3: Stichprobenumfang aufgeteilt nach Baumart und Höhenstufen.	57
Tabelle 4: Wertebereiche für die Hilfsfunktion „Rindenanteil Schaft“ für Buche und Eiche	69
Tabelle 5: Ergebnisse der univariaten Regressionsanalyse zur Schätzung des Rindenanteils des Schaftes für Buche und Eiche nach Formel 12.	69
Tabelle 6: Wertebereiche für die Hilfsfunktion „Rindenanteil Äste“ für Buche und Eiche.....	70
Tabelle 7: Ergebnisse der univariaten Regressionsanalyse zur Schätzung des Rindenanteils der Äste für Buche und Eiche nach Formel 12.	71
Tabelle 8: Ausgewählte Dimensions- und Zuwachsgrößen der aufgenommenen Probestämme.....	73
Tabelle 9: Ausgewählte Dimensionsgrößen der am liegenden Baum aufgenommenen lebenden und toten Äste.	74
Tabelle 10: Ausgewählte Kenngrößen der im Labor vermessenen lebenden Äste, der nicht überwallten Totäste und der überwallten Totäste.	76
Tabelle 11: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Höhenwachstumsmodells.	78
Tabelle 12: Ergebnisse des multiplen nicht-linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Höhenwachstums nach Formel 13.....	80
Tabelle 13: Wertebereiche für die einzelnen Variablen des Kronendurchmessermodells.	83
Tabelle 14: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Kronendurchmessers von Buche und Eiche nach Formel 15.	84
Tabelle 15: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astanzahlmodells.....	91
Tabelle 16: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung der Astanzahl nach Formel 17.....	92
Tabelle 17: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Astlängenmodell der Baumart Buche.	100
Tabelle 18: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astlängenmodells nach Formel 19.....	100

Tabelle 19: Ergebnisse des linearen Regressionsmodells für die Astlänge nach Formel 19.....	101
Tabelle 20: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astdurchmessermodells.....	104
Tabelle 21: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für die Prognose des Astdurchmessers nach Formel 20.....	105
Tabelle 22: Variablenselektion mit Hilfe des AIC für das Astradialzuwachsmodell der Baumart Eiche.....	115
Tabelle 23: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astradialzuwachsmodells.....	116
Tabelle 24: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für die Prognose des Astradialzuwachses nach Formel 22.....	117
Tabelle 25: Darstellung der Durchschnittswerte der in Abbildung 25 dargestellten jährlichen Astradialzuwächse von Buche und Eiche für drei verschiedene vertikale Astpositionen bei einem durchschnittlichen jährlichen Schafradialzuwachs von 2,2mm und einem konstanten Astansatzwinkel von 40°.....	123
Tabelle 26: Darstellung des modellierten Astradialzuwachses von Buche und Eiche im Astalter 5 und bei einem Astansatzwinkel von 40° für vier verschiedene vertikale Astpositionen (Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung= 5, 10, 15, 20 Jahre) bei einem Schafradialzuwachs von 2,5mm und 3,5mm.....	125
Tabelle 27: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Astansatzwinkelmodell der Baumarten Buche und Eiche.....	126
Tabelle 28: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Astansatzwinkelmodells.....	127
Tabelle 29: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells für den Astansatzwinkel nach Formel 24.....	128
Tabelle 30: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Kronenansatzhöhenmodells.....	134
Tabelle 31: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Prognose der Kronenansatzhöhe nach Formel 26.....	135
Tabelle 32: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des binär-logistischen Regressionsmodells zur Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit des Aststatus'="lebend".	142

Tabelle 33: Ergebnisse des binär-logistischen Regressionsmodells zur Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit des Aststatus'="lebend" nach Formel 28.....	143
Tabelle 34: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung der astfreien Schaftlänge.....	149
Tabelle 35: Ergebnisse des (multiplen) linearen Regressionsmodells für die Prognose der astfreien Schaftlänge nach Formel 30.....	150
Tabelle 36: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung der Astüberwallungsdauer.	156
Tabelle 37: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung der Astüberwallungsdauer nach Formel 32.	157
Tabelle 38: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Prognose der Astüberwallungswahrscheinlichkeit.	164
Tabelle 39: Ergebnisse des binären logistischen Regressionsmodells zur Abschätzung der Astüberwallungswahrscheinlichkeit nach Formel 34.	164
Tabelle 40: Variablenselektion mit Hilfe des AIC- Kriteriums für das Modell zur Prognose des asthaltigen Kerns der Baumart Buche.....	168
Tabelle 41: Wertebereiche für Buche und Eiche für die einzelnen Variablen des Modells zur Schätzung des Radius' des asthaltigen Kerns.....	169
Tabelle 42: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells zur Schätzung des Radius' des asthaltigen Kerns nach Formel 35.....	170
Tabelle 43: Simulierter Astreinigungsprozess von Buche bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7m$, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.....	227
Tabelle 44: Simulierter Astreinigungsprozess von Eiche bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7m$, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 2,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.....	228
Tabelle 45: Simulierter Astreinigungsprozess von Buche bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7m$, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.....	230

Tabelle 46: Simulierter Astreinigungsprozess von Eiche bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7m$, einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm und einem Astansatzwinkel von 40° unter der Zielvorgabe 10m astfreier Schaftlänge und einem Durchmesser auf 1,3m Höhe von 60cm am Ende der Umtriebszeit. Signatur: Häkchen: ja, Kreuz: nein.....	231
Tabelle 47: Maximal erlaubter Astdurchmesser von Buche und Eiche bei einem Produktionsziel von 60cm Schaftdurchmesser auf 1,3m Höhe und 10m astfreiem Schaft bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=7m$ und einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm.	233
Tabelle 48: Mittleres maximales Astalter und der jeweilige mittlere Astdurchmesser für zwei verschiedene Standortsbonitäten ($SI_{10}=7$ und $SI_{10}=8$) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm für die Baumart Buche.....	235
Tabelle 49: Mittleres maximales Astalter und der jeweilige mittlere Astdurchmesser für zwei verschiedene Standortsbonitäten ($SI_{10}=7$ und $SI_{10}=8$) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm für die Baumart Eiche.....	236
Tabelle 50: Übersicht über die Wuchsbezirke und natürlichen Regionalwaldgesellschaften der untersuchten Bestände.	273
Tabelle 51: Überblick über die wichtigsten standortkundlichen Kennwerte der untersuchten Bestände.	275
Tabelle 52: Übersicht über die wichtigsten waldwachstumkundlichen Kennwerte der untersuchten Probestämme.....	276
Tabelle 53: Übersicht über die wichtigsten waldwachstumkundlichen Kennwerte der aufgenommenen Bedränger.....	277
Tabelle 54: Übersicht der wichtigsten waldwachstumkundlichen Kenngrößen der am liegenden Baum aufgenommenen lebenden Äste.	278
Tabelle 55: Übersicht der wichtigsten waldwachstumkundlichen Kenngrößen der am liegenden Baum aufgenommenen Totäste.	279

11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ergebnisse des Höhenmodells auf Grundlage der Ertragstafelwerte und ausgewählte Höhenstufen für Buche (oben, blau) und Eiche (unten, grün). 1= Höhenstufe 10%- 20%; 2= Höhenstufe 30%- 40%, 3= Höhenstufe 50%- 60%.	45
Abbildung 2: Vermessung der Totäste am Beispiel eines überwallten Totastes.	51
Abbildung 3: Gegenüberstellung des Schaftdurchmessers mit Rinde [cm] mit dem Schaftdurchmesser ohne Rinde [cm] von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).....	70
Abbildung 4: Gegenüberstellung des Astdurchmessers ohne Rinde [mm] mit dem Astdurchmesser mit Rinde [mm] für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche(rechts, grüne Signatur).....	71
Abbildung 5: Lage der Untersuchungsflächen in Baden - Württemberg. Buche, blaue Signatur, Eiche: grüne Signatur.	72
Abbildung 6: Darstellung des auf Grundlage der Stammanalyse berechneten Höhenwachstumsverlaufs der untersuchten Bäume. Buche: blaue Signatur, Eiche; grüne Signatur	78
Abbildung 7: Abweichungen des modellierten Höhenwachstumsverlaufs zum tatsächlichen Höhenwachstumsverlauf [m] für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	80
Abbildung 8: Modellierter Höhenwachstumsverlauf für absolute Höhenbonitäten (SI ₁₀) im Alter _{1,3} 10 Jahre. Der Gültigkeitsbereich der Kurven ist an die vorliegende Datenstruktur angepasst.....	81
Abbildung 9: jährlicher Höhenzuwachs (Berechnung auf Grundlage der Ergebnisse des Höhenwachstumsmodells) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedene Höhenbonitäten (SI ₁₀ = 7m: gestrichelte Linie; SI ₁₀ =8m: durchgezogene Linie).	82
Abbildung 10: Gegenüberstellung der gemessenen Werte des Kronendurchmessers mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung des Kronendurchmessers über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).....	86
Abbildung 11: Darstellung des vom Modell prognostizierten Kronendurchmessers über dem Alter _{1,3} für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (durchgezogene Linie= 3,5mm/Jahr; gestrichelte Linie= 2,5mm/ Jahr) für Buche (Signatur: blau) und Eiche (Signatur: grün).....	88
Abbildung 12: Darstellung der über die prognostizierten Werte berechneten Kroneneffizienz über dem Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe für Buche (Signatur: blau) und Eiche (Singnatur: grün) beispielhaft dargestellt am Radialzuwachsszenario 3,5mm/Jahr.....	89

Abbildung 13: Gegenüberstellung der gemessenen Werte der Anzahl lebender Äste mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung der Anzahl lebender Äste über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).....	93
Abbildung 14: Anzahl der Totäste in der Krone in Abhängigkeit vom durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von Buche (links) und Eiche (rechts).	96
Abbildung 15 Anzahl der lebenden Äste in Abhängigkeit der Kronenlänge von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für Radialzuwachsszenarien von durchschnittlich 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linien) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linien).....	97
Abbildung 16: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über der unabhängigen Variable Astdurchmesser für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	102
Abbildung 17: modellierte Astlänge in Abhängigkeit des Astdurchmessers für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur).	103
Abbildung 18: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	107
Abbildung 19: Darstellung des vom Modell prognostizierten Astdurchmessers in Abhängigkeit vom $Alter_{1,3}$ für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) sowie für zwei Unterschiedliche vertikale Astpositionen am Schaft ($5=Alter_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung; $15=Alter_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung; 15 Jahre) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) und einem konstanten Astansatzwinkel von 40° . Die dargestellten Funktionen entsprechen dem Gültigkeitsbereich des vorliegenden Datenmaterials.	110
Abbildung 20: Darstellung der vom Modell prognostizierten vertikalen Astdurchmesserverteilung für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem angenommenen $Alter_{1,3}$ von 29 Jahren und einem konstanten Astansatzwinkel von 40° . Die dargestellten Funktionen entsprechen dem Gültigkeitsbereich des vorliegenden Datenmaterials.....	111
Abbildung 21: Mittlere jährliche Zuwachsindizes des Stammes (durchgezogene Linie) sowie der Äste (gestrichelte Linie) von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur) aller untersuchten Bäume.....	113

- Abbildung 22: Mittelwert des jährlichen Astradialzuwachses über dem Astalter (fortlaufend) von Buche (links) und Eiche (rechts) aufgeteilt nach Astaltersklassen. Minimalbelegung: 3 Beobachtungen/Astalter. 114
- Abbildung 23: Gegenüberstellung der gemessenen Werte des Astradialzuwachses mit den durch das Modell prognostizierten Werten sowie Darstellung der Residuen aus dem Modell zur Schätzung des Astradialzuwachses über den einzelnen unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur). 119
- Abbildung 24: mittlerer jährlicher Astradialzuwachs von 11-15- jährigen Ästen unterschiedlich alter Bäume (Höhenstufe 10-20%, Höhenstufe 30-40%, Höhenstufe 50-60%) von Buche (links) und Eiche (rechts) über dem Astalter. Minimalbelegung: 3 Beobachtungen/ Astalter. 121
- Abbildung 25: Schaftradialzuwachs (schwarze Linie) sowie modellierte Astradialzuwachswerte von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) über dem Alter_{1,3} für 3 verschiedene vertikale Astpositionen: Alter_{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung 5 (durchgezogene Linie), 10 (gestrichelte Linie) und 15 (gepunktete Linie) bei einem konstanten Astansatzwinkel von 40°. 123
- Abbildung 26: Schaftradialzuwachs (schwarze Linien) sowie modellierte Astradialzuwachswerte von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) über dem Alter_{1,3} für ein Radialzuwachsszenario von durchschnittlich 2,2mm auf 1,3m Schafthöhe (gestrichelte Linien) und 3,2mm auf 1,3m Schafthöhe (durchgezogene Linien) für Äste, welche zu einem Alter_{1,3} von 5 Jahren gebildet wurden bei einem konstanten Astansatzwinkel von 40°. 124
- Abbildung 27: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur). 130
- Abbildung 28: Astansatzwinkel in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe zum Zeitpunkt der Astbildung von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für einen durchschnittlichen jährlichen Astradialzuwachs von 2mm bei einem Astalter von 5 bzw. 10 Jahren für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie, 3,5mm: durchgezogene Linie). 132
- Abbildung 29: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur). 136
- Abbildung 30: Modellierte Baumhöhe (durchgezogene Linie) und Kronenansatzhöhe (gestrichelte Linie) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem durchschnittlichen

jährlichen Radialzuwachs von 2,5 und 3,5mm und einer absoluten Oberhöhenbonität SI_{10} von 8m.	138
Abbildung 31: ROC- Kurve für das Modell zur Prognose der Wahrscheinlichkeit des Aststatus „lebend“ für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur) mit einer AUC von 0,975 (Buche) bzw. 0,970 (Eiche). Die diagonale Linie des Diagramms repräsentiert die Situation, in welcher das binäre Ergebnis vollkommen zufällig erraten werden würde.	144
Abbildung 32: Darstellung der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes auf 6m Schafthöhe für einen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe von 2,5mm (Signatur: gepunktete Linie) und 3,5mm (Signatur: durchgezogene Linie) bei einer Standortsbonität von $SI_{10}=8m$ und einem unterstellten Astdurchmesser von 10mm von Buche (Signatur: blau) und Eiche (Signatur: grün). Trennwert (horizontale Linien): Buche 0,81 (Signatur: blau), Eiche: 0,65 (Signatur: grün).	147
Abbildung 33: Ansatzhöhe des untersten Totastes in Abhängigkeit der Baumhöhe für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	148
Abbildung 34: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	151
Abbildung 35: Modellierte astfreie Schaftlänge in Abhängigkeit des Alters _{1,3} von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedenen Standortsbonitäten ($SI_{10} = 7$: gestrichelte Linie; $SI_{10} = 8$: durchgezogene Linie) für ein Radialzuwachsszenario (nur bei Buche) von durchschnittlichen jährlichen 2,5mm und 3,5mm.	153
Abbildung 36: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur).	159
Abbildung 37: Modellierte Überwallungsdauer in Abhängigkeit des Astdurchmessers von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für zwei verschiedene Radialzuwachsszenarien (2,5mm: gestrichelte Linie; 3,5mm: durchgezogene Linie) und zwei verschiedenen Längen des totasthaltigen Kerns (nur Eiche) von 1cm und 5cm.	160
Abbildung 38: ROC- Kurve für das Modell zur Prognose der Astüberwallung, AUC= 0,961.	165
Abbildung 39: Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung in Abhängigkeit der Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis des Astes für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem Astdurchmesser von 10, 25 und 40mm und einem mittleren jährlichen Radialzuwachs auf 1,3m	

- Schafthöhe von 2,5mm (oben) bzw. 3,5mm (unten) während der bisherigen Überwallungszeit. Der Trennwert liegt bei 0,29 (horizontale Linie)..... 167
- Abbildung 40: Darstellung der vom Modell prognostizierten Werten in Abhängigkeit der empirisch erhobenen Daten sowie Darstellung der Residuen des Modells über den unabhängigen Variablen für Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechts, grüne Signatur). 172
- Abbildung 41: Modellierter Radius des asthaltigen Kerns in Abhängigkeit des Astalters zum Zeitpunkt des Absterbens bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs des Schaftes während der Lebenszeit des Astes von 2,5 und 3,5 Millimetern von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur). Es wurde ein durchschnittlicher jährlicher Astradialzuwachs von 2mm und bei der Buche ein Astansatzwinkel von 45° angenommen. 175
- Abbildung 42: Alters- Höhenbeziehung für die vom Modell vorhergesagten Werte (dunkle Farbe) im Vergleich zu denen der Ertragstafeln (helle Farbe). Die Bonitätsfächer der Ertragstafel ($dG_{z100} = 7$ bis $dG_{z100} = 9$ [Eiche] bzw. 10 [Buche]) sowie des in dieser Arbeit erstellten Höhenmodells ($SI_{10} = 5m$ bis $SI_{10} = 8,5m$ [Buche]; $SI_{10} = 6m$ bis $SI_{10} = 12m$ [Eiche]) sind als Fläche dargestellt..... 182
- Abbildung 43: Darstellung des Kronendurchmessers in Abhängigkeit des Alters auf Stockhöhe von Buche und Eiche auf Grundlage des in dieser Arbeit erstellten Modells (Buche: blaue Signatur; Eiche: grüne Signatur) sowie auf Grundlage der von LANGSHAUSEN (2009) (Buche: graue Signatur) und NUTTO (1999) (Eiche: graue Signatur) für Radialzuwachsszenarien von 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linie) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linie). Für die Berechnung des Kronendurchmessers nach LANGSHAUSEN (2009) wurde eine Höhenbonität von $SI_{120} = 35m$ (vgl. ebenda) angenommen. 184
- Abbildung 44: Schaftdurchmesser in 1,3m Höhe in Abhängigkeit des Alters auf 1,3m Schafthöhe für Buche (oben, blaue Signatur) und Eiche (unten, grüne Signatur) aller empirisch aufgenommenen Bäume. Zur besseren Vergleichbarkeit sind verschiedene durchschnittliche jährliche Radialzuwachsgänge dargestellt. 187
- Abbildung 45 Darstellung des Astdurchmessers in Abhängigkeit des Astalters von Buche (oben, blaue Signatur) und Eiche (unten, grüne Signatur) aller aufgenommenen lebenden Äste. Zur besseren Vergleichbarkeit sind verschiedene durchschnittliche jährliche Astradialzuwachsgänge dargestellt. 194
- Abbildung 46: Rechts: Astgrundflächensumme aller Äste über 1cm Astdurchmesser in Abhängigkeit der Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur). Rechts: Durchschnittliche Astgrundfläche aller Äste über 1cm Durchmesser in

- Abhängigkeit der Grundfläche des Stammes auf 1,3m Schafthöhe für Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur). 195
- Abbildung 47: Median, Interquartilbereich, Ausreißer und Extremfälle der Astdurchmesser einjähriger Äste (mit Rinde) von Buche (links, blaue Signatur) und Eiche (rechte, grüne Signatur). Anzahl der Beobachtungen= Buche: 411 Äste; Eiche: 383 Äste. Die Ermittlung der Astdurchmesser erfolgte retrospektiv aus den Astradialzuwachsmessungen und dem Einsatz des Rindenmodells für Äste. 196
- Abbildung 48: Darstellung des Astansatzwinkels in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe zum Zeitpunkt der Astbildung von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für einen Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe von 3,5mm und ein Astalter von 10 Jahren für zwei verschiedene Astdurchmesser (20mm: gestrichelte Linie, 40mm: durchgezogene Linie). 202
- Abbildung 49: Astansatzwinkel in Abhängigkeit vom Astalter von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs von 3,5mm auf 1,3m Schafthöhe und einem $Alter_{1,3}$ zum Zeitpunkt der Astbildung von 5 Jahren, sowie einem Astdurchmesser von 40mm. 202
- Abbildung 50: Modellierte Kronenansatzhöhe in Abhängigkeit vom $Alter_{1,3}$ von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) für verschiedene absolute Oberhöhenbonitäten (Buche: $SI_{10}=7$ und $SI_{10}=8$; Eiche: $SI_{10}=8$ und $SI_{10}=9$) und unterschiedliche durchschnittliche jährliche Radialzuwachsszenarien (gestrichelte Linie: 2,5mm; durchgezogene Linie: 3,5mm). Als Orientierung ist eine Kronenansatzhöhe von 8m eingezeichnet (rot gestrichelte Linie). 205
- Abbildung 51: jährlicher Baumhöhenzuwachs (durchgezogene Linien) und jährliche Kronenansatzhöhenverschiebung (gestrichelte Linien) von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) auf Grundlage der in dieser Arbeit erstellten Modelle für Radialzuwachsszenarien von 2,5mm/ Jahr und 3,5mm/ Jahr und eine Oberhöhenbonität von $SI_{10}=8m$ 206
- Abbildung 52: Darstellung der Kronenansatzhöhe in Abhängigkeit des Alters auf Stockhöhe von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) auf Grundlage des in dieser Arbeit erstellten Modells sowie auf Grundlage der von LANGSHAUSEN (2009) (Buche: graue Signatur) und NUTTO (1999) (Eiche: graue Signatur) für Radialzuwachsszenarien von 2,5mm/ Jahr (gestrichelte Linie) und 3,5mm/ Jahr (durchgezogene Linie) und eine Oberhöhenbonität von $SI_{10}=8m$ 208
- Abbildung 53: Darstellung der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines lebenden Astes auf 6m Schafthöhe für verschiedene Astdurchmesser bei einem durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachs der letzten 5 Jahre auf 1,3m Schafthöhe von 3,5mm und bei einer Standortsbonität

von $SI_{10}=8m$ für Buche (links, Signatur: blau) und Eiche (rechts, Signatur: grün). Trennwert (horizontale Linie): Buche 0,81, Eiche: 0,65.	212
Abbildung 54: Mittlerer Baumabstand von Buche (blaue Signatur) und Eiche (grüne Signatur) in Abhängigkeit des Baumalters auf 1,3m Schafthöhe für ein Radialzuwachsszenario von durchschnittlichen jährlichen 2,5mm (gestrichelte Linien) und 3,5mm (durchgezogene Linien). Es wurde ein Überschirmungsgrad von 70% unterstellt.	234
Abbildung 55: Entwicklung der Baumanzahl pro Hektar von Buche (Signatur: blau) und Eiche (Signatur: grün) für die Radialzuwachsszenarien 2,5mm (gestrichelte Linie) und 3,5mm (durchgezogene Linie). Es wurde ein Überschirmungsgrad von 70% unterstellt.	234

12 ANHANG

VERWENDETE VARIABLENBEZEICHNUNGEN

AD	Astdurchmesser [mm]
AL	Astlänge [cm]
Alter _{1,3}	Alter _{1,3} [Jahre]
Alter(lfd) _{1,3}	laufendes Alter _{1,3} [Jahre]
Alter _{1,3ref}	Referenzalter der absoluten Höhenbonität [Jahre]
Alter _{Ast}	Astalter [Jahre]
Alter(lfd) _{Ast}	laufendes Astalter [Jahre]
ASL	Astfreie Schaftlänge [m]
AW	Astansatzwinkel in Bezug auf die Vertikale [°]
BA	Baumart (0= Buche; 1= Eiche) [-]
Bab _{1,3}	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]
BHD	Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3m Höhe [cm]
bon	Absolute Höhenbonität [m]
H	Baumhöhe [m]
ir _{1,3}	jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm]
ir _{(mittel)1,3}	durchschnittlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe [mm/Jahr]
ir _{5(mittel)1,3}	durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs auf 1,3m Schafthöhe der Jahre 2004 bis einschließlich 2008 [mm]
ir _{(mittel)leb}	mittlerer jährlicher Radialzuwachs des Schaftes direkt unterhalb des Astes im Zeitraum zwischen Astbildung und letzten lebenden Jahr des betreffenden Astes [mm]
ir _{(mittel)1,3ÜD}	mittlerer jährlicher Radialzuwachs in 1,3m Schafthöhe während der Überwallungszeit [mm]
ir _{Ast}	jährlicher Astradialzuwachs [mm]
KaH	Kronenansatzhöhe [m]
KB	Kronenbreite [m]
KL	Kronenlänge [m]
N _L	Anzahl der lebenden Äste
p(L)	Wahrscheinlichkeit für Aststatus= lebend
p(Ü)	Wahrscheinlichkeit der Astüberwallung [-]
R _{ak}	Radius des asthaltigen Kerns [cm]
TA	Totasthaltiger Teil des asthaltigen Kerns [cm]
T _M	Anzahl der Jahre seit dem Mortalitätsereignis [N]
ÜD	Überwallungsdauer [Jahre]

WUCHSBEZIRKE UND STANDORTSANGABEN

Bestandesnummer	Name der unteren Forstbehörde	Betriebsname	Wuchsbezirksgruppe ³⁶	Wuchsbezirk ³⁷	Natürliche Regionalwaldgesellschaft ³⁸
1	Lörrach	Staatswald Lörrach	1/09	Dinkelberg	Atlantisch- kolliner Buchen- Eichenwald
2	Lörrach	Gemeinde Efringen-Kirchen	1/05	Rheinebene von Freiburg bis Basel (Niederterrasse)	Planarer Eichen-Mischwald
3	Ortenaukreis	Gemeinde Appenweier	1/06	Rheinhügelland zwischen Baden-Baden und Emmendingen	Atlantisch- kolliner Buchenwald
4	Ortenaukreis	Gemeinde Appenweier	1/06	Rheinhügelland zwischen Baden-Baden und Emmendingen	Atlantisch- kolliner Buchenwald
5	Ortenaukreis	Gemeinde Appenweier	1/03a	Niederterrasse der Flussaue zwischen Rastatt und Kehl	Planarer Stieleichen-Mischwald und Flussauewald
6	Ortenaukreis	Gemeinde Appenweier	1/03a	Niederterrasse der Flussaue zwischen Rastatt und Kehl	Planarer Stieleichen-Mischwald und Flussauewald
7	Lörrach	Stadt Lörrach	1/09	Dinkelberg	Atlantisch- kolliner Buchen- Eichenwald
8	Lörrach	Stadt Lörrach	1/09	Dinkelberg	Atlantisch- kolliner Buchen- Eichenwald
9	Lörrach	Gemeinde Steinen	3/12	Schopfheimer Bergland	Atlantisch- submontaner Buchen- Eichen- Tannenmischwald
10	Ortenaukreis	BG Lahr Bereich Stadtwald	1/06	Rheinhügelland zwischen Baden-Baden und Emmendingen	Atlantisch- kolliner Buchenwald
11	Ortenaukreis	Staatswald Ortenau-kreis	3/03c	Schwarzwaldrand zwischen Kinzig und Elz	Atlantisch- Submontaner Buchen- Eichen- Tannenwald
12	Ortenaukreis	Stadt Achern	1/03a	Niederterrasse der Flussaue zwischen Rastatt und Kehl	Planarer Stieleichen-Mischwald und Flussauewald
13	Ortenaukreis	Stadt Achern	1/03a	Niederterrasse der Flussaue zwischen Rastatt und Kehl	Planarer Stieleichen-Mischwald und Flussauewald

³⁶ SCHLENKER & MÜLLER (1973), SCHLENKER & MÜLLER (1975), SCHLENKER & MÜLLER (1978) und ALDINGER et al. (1998).

³⁷ SCHLENKER & MÜLLER (1973), SCHLENKER & MÜLLER (1975), SCHLENKER & MÜLLER (1978) und ALDINGER et al. (1998).

³⁸ SCHLENKER & MÜLLER (1973), SCHLENKER & MÜLLER (1975), SCHLENKER & MÜLLER (1978) und ALDINGER et al. (1998).

14	Konstanz	Staatswald Konstanz	7/05a	Weißjura- Moräne bei Engen	Kontinental-submontaner Buchenwald
15	Konstanz	Stadt Tengen	6/9	Hegualb	Kontinental-submontaner Buchenwald
16	Ortenaukreis	Gemeinde-wald Schutter-wald	1/06	Rheinhügelland zwischen Baden-Baden und Emmendingen	Atlantisch- kolliner Buchenwald
17	Emmendingen	Stadtwald Emmen-dingen	1/06	Rheinhügelland zwischen Baden-Baden und Emmendingen	Atlantisch- kolliner Buchenwald
18	Karlsruhe Landkreis	Stadtwald Bruchsal	4/05a	Vorderer Kraichgau	Atlantisch- kolliner Buchenwald
19	Karlsruhe Landkreis	Stadtwald Bruchsal	4/05a	Vorderer Kraichgau	Atlantisch- kolliner Buchenwald
20	Ortenaukreis	Gemeinde-wald Ohlsbach	3/03b	Vorgebirg zwischen Bühl und Offenburg	Atlantisch submontaner Buche- Eichen-Tannenwald
21	Karlsruhe Landkreis	Stadtwald Bruchsal	4/05a	Vorderer Kraichgau	Atlantisch- kolliner Buchenwald
22	Breisgau- Hoch-schwarzwald	Gemeinde-wald Oberried	3/10	Westlicher Südschwarzwald	Atlantisch-Submontaner Buchen- Eichen-Tannenwald
23	Lörrach	Staatswald Lörrach	3/10	Westlicher Südschwarzwald	Atlantisch-Submontaner Buchen- Eichen-Tannenwald
24	Lörrach	Staatswald Lörrach	3/10	Westlicher Südschwarzwald	Atlantisch-Submontaner Buchen- Eichen-Tannenwald
25	Enzkreis	Gemeinde-wald Remchin-gen	4/04	Pfinzgau	Atlantisch-kolliner Buchenwald
26	Tübingen	Stadtwald Mössingen	4/15b	Vorland der Reutlinger Alb	submontaner Buchen-Eichenwald
27	Lörrach	Stadtwald Kandern	3/10	Westlicher Südschwarzwald	Atlantisch-Submontaner Buchen- Eichen-Tannenwald
28	Breisgau- Hoch-schwarzwald	Staatswald Breisgau-Hoch-schwarz-wald	3/09	Mittlerer Schwarzwald zwischen Kinzig und Dreisam	Atlantisch-montaner Buchen-Tannenwald
29	Karlsruhe Landkreis	Gemeinde-wald Gondels-heim	4/05a	Vorderer Kraichgau	Atlantisch- kolliner Buchenwald

Tabelle 50: Übersicht über die Wuchsbezirke und natürlichen Regionalwaldgesellschaften der untersuchten Bestände.

Bestandesnummer	Höhe über NN [m] ³⁹	Mittlere Lufttemperatur (Jahr) [°C] ⁴⁰	Mittlere Niederschlags-höhen (Jahr) [mm] ⁴¹	Bodenlandschaft ⁴²
1	400	8,5-9,5	850- 1050	Rendzina / Braunerde-Rendzina / Pararendzina aus Hangschutt über Kalk-, Mergel- und Dolomitgestein im Wechsel mit Terra fusca-Braunerde / Terra fusca-Parabraunerde
2	230	9,0-10,0	620-740	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
3	300	9,6-10,0	860-1050	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
4	300	9,6-10,0	860-1050	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
5	150	9,5-10	390-530	Auenboden / Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten
6	150	9,5-10	390-530	Auenboden / Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten
7	400	8,5-9,5	850- 1050	Rendzina / Braunerde-Rendzina / Pararendzina aus Hangschutt über Kalk-, Mergel- und Dolomitgestein im Wechsel mit Terra fusca-Braunerde / Terra fusca-Parabraunerde
8	400	8,5-9,5	850- 1050	Rendzina / Braunerde-Rendzina / Pararendzina aus Hangschutt über Kalk-, Mergel- und Dolomitgestein im Wechsel mit Terra fusca-Braunerde / Terra fusca-Parabraunerde
9	450	8,2-9,8	867-1344	Rendzina / Pararendzina / Ranker / Podsol-Braunerde / Pelosol-Braunerden / Pseudogley in engem Wechsel aus Kalk- und Mergelgesteinen, Sand-, Schluff- und Tonsteinen
10	280	9,6-10,0	860-1050	Parabraunerde aus lößbedeckten, lehmig-sandigen Terrassenablagerungen
11	400	7,4-10,4	906-1640	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
12	150	9,5-10	390-530	Parabraunerde aus lößbedeckten, lehmig-sandigen Terrassenablagerungen
13	150	9,5-10	390-530	Parabraunerde aus lößbedeckten, lehmig-sandigen Terrassenablagerungen
14	520	7,9-8,7	684-873	Braunerde / Parabraunerde/Pararendzina aus lehmig-sandigen, kalkhaltigen Moränenablagerungen
15	650	6,9-8,3	711-899	Braunerde / Podsol-Braunerde/Braunerde-Rendzina/ Parabraunerde in engem Wechsel aus Tonschiefer, Grauwacken und Kalksteinen
16	280	9,6-10,0	860-1050	Auenboden / Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten

³⁹ SCHLENKER & MÜLLER (1973), SCHLENKER & MÜLLER (1975), SCHLENKER & MÜLLER (1978) und ALDINGER et al. (1998)..

⁴⁰ Mittelwerte aus Messungen im Zeitraum 1961- 1990 aus WOLFF, 2003.

⁴¹ Mittelwerte aus Messungen im Zeitraum 1961- 1990 aus WOLFF, 2003.

⁴² HERRMANN et al., 2002.

17	280	9,6-10,0	860-1050	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
18	180	9,1-9,9	725-899	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
19	180	9,1-9,9	725-899	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
20	430	7,4-10,4	906-1640	Parabraunerde aus lößbedeckten, lehmig-sandigen Terrassenablagerungen
21	180	9,1-9,9	725-899	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
22	650	4,3-9,5	1077-2061	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
23	650	4,3-9,5	1077-2061	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
24	650	4,3-9,5	1077-2061	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
25	180	8,7-9,8	752-899	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm
26	430	7,2-8,3	790-1005	Rendzina / Pararendzina / Ranker / Podsol-Braunerde / Pelosol-Braunerden / Pseudogley in engem Wechsel aus Kalk- und Mergelgesteinen, Sand-, Schluff- und Tonsteinen
27	650	4,3-9,5	1077-2061	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
28	700	5,0-9,7	1086-1900	Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen
29	180	9,1-9,9	725-899	Tschernosem-Parabraunerde / Parabraunerde-Tschernosem aus Löß oder Lößlehm

Tabelle 51: Überblick über die wichtigsten standortkundlichen Kennwerte der untersuchten Bestände.

BESTANDESWEISE KENNWERTE DER UNTERSUCHTEN PROBEBÄUME

Bezeichnung Probe- fläche	Baum- art	Anzahl Probe- bäume	Baum- alter auf Stock- höhe [Jahre]	Baum- alter auf 1,3m Schaft- höhe [Jahre]	Baum- höhe [m]	Kronen- durch- messer [m]	Kronen- ansatz- höhe [m]	Astfreie Schaft- länge [m]	Schaft- durch- messer auf 1,3m Höhe [cm]	
			Arithmetischer Mittelwert							
1	Buche	5	34,8	33,0	21,30	05,32	10,12	03,70	17,96	
2	Eiche	5	30,2	27,8	19,38	03,75	11,16	06,33	17,30	
3	Eiche	5	28,2	24,8	22,58	05,07	09,62	06,49	23,42	
4	Eiche	5	20,8	18,4	15,83	03,73	07,01	02,81	16,56	
5	Eiche	5	25,6	23,2	18,20	04,72	09,40	06,30	19,56	
6	Eiche	5	17,4	15,2	13,92	03,67	06,00	01,88	15,00	
7	Eiche	5	25,2	22,0	17,30	03,84	08,86	03,53	17,26	
8	Eiche	5	28,0	24,8	17,78	03,57	10,40	03,37	17,44	
9	Buche	5	16,2	13,8	10,81	02,36	02,81	02,39	07,60	
10	Eiche	5	08,6	07,4	06,36	02,11	02,10	01,57	06,36	
11	Eiche	5	18,6	15,8	12,48	01,97	06,29	02,37	10,38	
12	Eiche	4	06,7	04,5	03,47	01,56	00,47	00,45	02,80	
13	Eiche	5	09,8	07,6	05,95	02,03	01,14	00,68	05,74	
14	Buche	5	31,6	27,4	15,09	03,62	03,19	02,61	14,58	
15	Buche	5	23,4	20,6	13,85	02,55	06,74	02,59	11,56	
16	Eiche	5	19,0	16,8	14,35	03,27	07,12	03,34	14,58	
17	Buche	5	30,0	21,0	16,06	03,37	08,60	05,51	11,66	
18	Buche	5	35,4	27,0	19,13	01,87	12,83	07,16	11,50	
19	Buche	5	17,0	12,2	08,10	01,65	02,94	01,68	06,10	
20	Buche	5	22,2	19,6	15,27	03,22	06,83	02,97	10,74	
21	Eiche	5	09,0	05,2	05,01	01,67	01,39	00,28	05,38	
22	Buche	5	13,6	08,8	06,46	02,36	01,44	00,22	06,22	
23	Eiche	5	17,0	13,8	11,13	02,54	04,90	01,61	10,64	
24	Buche	5	18,0	12,6	08,84	01,83	03,84	02,21	06,12	
25	Eiche	5	10,2	08,0	05,81	01,37	01,63	00,76	05,60	
26	Buche	5	46,8	37,2	20,31	04,07	11,55	07,74	15,72	
27	Buche	4	47,0	39,5	21,10	03,44	10,86	10,12	16,25	
28	Buche	5	14,6	10,4	05,69	01,78	01,49	00,37	04,84	
29	Buche	5	50,6	24,4	22,77	05,31	14,04	09,72	22,60	
Gesamt	Buche	69								
Gesamt	Eiche	74								
Gesamt	Total	143								

Tabelle 52: Übersicht über die wichtigsten waldwachstumskundlichen Kennwerte der untersuchten Probebäume.

BESTANDESWEISE KENNWERTE DER AUFGENOMMENEN BEDRÄNGER

Bezeichnung Probefläche	Baumart	Anzahl Bedränger	Geschätztes Baualter auf Stockhöhe [Jahre] ⁴³	Baumhöhe [m]	Kronen- ansatzhöhe [m]	Astfreie Schaftlänge [m]	Schaftdurch- messer auf 1,3m Höhe [cm]
			Arithmetischer Mittelwert				
1	Buche	13	35,0	20,99	08,85	05,92	18,38
2	Eiche	10	30,0	20,19	09,69	05,55	20,40
3	Eiche	11	28,0	23,17	09,59	07,42	21,77
4	Eiche	07	21,0	15,85	07,34	02,35	15,67
5	Eiche	12	26,0	18,08	09,46	05,21	18,38
6	Eiche	07	17,0	13,68	06,52	02,10	16,58
7	Eiche	11	25,0	17,53	08,58	04,62	17,53
8	Eiche	13	28,0	18,53	09,18	04,38	17,97
9	Buche	10	16,0	11,47	02,73	01,31	08,33
10	Eiche	04	09,0	07,05	02,62	01,50	06,50
11	Eiche	11	19,0	12,40	06,10	02,32	12,40
12	Eiche	07	07,0	03,38	00,74	00,56	02,64
13	Eiche	10	10,0	06,52	01,27	00,96	08,48
14	Buche	07	32,0	16,22	03,35	02,40	19,14
15	Buche	10	23,0	14,83	04,51	02,33	13,41
16	Eiche	10	19,0	15,36	08,54	03,30	15,32
17	Buche	07	24,0	16,80	06,71	03,06	13,47
18	Buche	11	32,0	20,61	09,84	05,93	17,38
19	Buche	10	17,0	08,03	02,99	00,89	06,25
20	Buche	12	22,0	15,60	06,99	04,02	13,69
21	Eiche	01	09,0	05,80	00,50	00,28	04,50
22	Buche	10	14,0	06,54	00,89	00,50	06,26
23	Eiche	11	17,0	12,09	04,98	01,50	12,05
24	Buche	07	18,0	08,21	03,94	03,30	06,10
25	Eiche	09	10,0	06,13	01,49	00,76	06,14
26	Buche	11	47,0	21,55	11,45	08,72	19,24
27	Buche	12	47,0	21,26	12,42	09,05	19,67
28	Buche	11	15,0	05,98	01,23	00,70	05,00
29	Buche	14	51,0	26,68	13,26	06,20	29,21
Gesamt	Buche	145					
Gesamt	Eiche	132					
Gesamt	Total	277					

Tabelle 53: Übersicht über die wichtigsten waldwachstumskundlichen Kennwerte der aufgenommenen Bedränger.⁴³ Mittelwert des Alters auf Stockhöhe der 3 ältesten Bäume/ Bestand

BESTANDESWEISE ANGABEN DER AM LIEGENDEN BAUM AUFGENOMMENEN
LEBENDEN ÄSTE

Bezeichnung Probefläche	Baumart	Anzahl gemessene lebende Äste	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	Astalter [Jahre]	Astdurchmesser [mm]	Astansatzwinkel [°]
			Arithmetischer Mittelwert			
1	Buche	143	23,12	10,85	27,63	45,11
2	Eiche	121	20,09	08,61	28,44	47,54
3	Eiche	114	16,98	08,91	41,08	38,88
4	Eiche	120	12,84	06,51	26,59	44,22
5	Eiche	140	16,77	07,54	33,41	44,09
6	Eiche	103	10,42	05,40	25,97	41,96
7	Eiche	118	15,78	07,42	29,12	41,65
8	Eiche	088	17,45	08,19	30,08	37,47
9	Buche	111	08,55	06,21	17,69	41,80
10	Eiche	081	04,46	04,01	15,98	50,19
11	Eiche	069	11,72	05,25	20,51	42,10
12	Eiche	038	01,74	04,32	14,81	65,00
13	Eiche	102	03,82	04,89	17,00	62,67
14	Buche	162	17,02	11,67	22,59	39,72
15	Buche	083	14,42	07,34	21,94	41,33
16	Eiche	097	11,88	06,23	27,73	45,77
17	Buche	077	14,13	07,90	22,52	39,94
18	Buche	105	21,41	06,63	19,61	45,00
19	Buche	064	07,50	05,86	16,99	45,47
20	Buche	096	14,30	06,56	20,50	39,84
21	Eiche	062	01,89	04,24	16,75	50,16
22	Buche	112	03,71	06,15	16,20	60,09
23	Eiche	067	09,19	05,57	22,70	41,19
24	Buche	057	08,60	05,19	15,72	42,98
25	Eiche	061	04,49	04,83	16,02	49,52
26	Buche	126	26,80	10,84	25,76	45,71
27	Buche	105	29,54	10,79	23,59	44,85
28	Buche	065	05,05	06,43	14,70	48,32
29	Buche	169	30,48	13,96	29,76	43,06
Gesamt	Buche	1475				
Gesamt	Eiche	1381				
Gesamt	Total	2856				

Tabelle 54: Übersicht der wichtigsten waldwachstumskundlichen Kenngrößen der am liegenden Baum aufgenommenen lebenden Äste.

BESTANDESWEISE ANGABEN DER AM LIEGENDEN BAUM AUFGENOMMENEN TOTÄSTE

Bezeichnung Probefläche	Baumart	Anzahl gemessene Totäste	Alter _{1,3} zum Zeitpunkt der Astbildung [Jahre]	Astalter [Jahre]	Astdurchmesser [mm]	Astansatzwinkel [°]
			Arithmetischer Mittelwert			
1	Buche	09	11,10	17,00	28,18	48,50
2	Eiche	89	13,02	10,45	26,86	52,92
3	Eiche	58	13,22	09,68	33,78	40,91
4	Eiche	90	07,14	08,18	26,86	53,25
5	Eiche	55	11,04	07,88	28,43	53,57
6	Eiche	92	05,80	07,27	22,38	55,17
7	Eiche	70	09,59	08,72	26,05	48,13
8	Eiche	75	12,25	08,30	22,81	43,63
9	Buche	18	04,67	07,33	16,53	51,75
11	Eiche	57	07,00	06,39	18,06	46,73
14	Buche	31	10,55	15,44	17,91	43,00
15	Buche	39	07,54	10,50	21,29	45,16
16	Eiche	71	07,24	07,68	22,12	50,89
17	Buche	18	08,50	10,25	17,45	41,64
18	Buche	30	15,50	09,90	21,96	45,05
19	Buche	23	03,04	08,71	14,04	57,38
20	Buche	22	06,45	09,69	21,62	31,10
23	Eiche	72	04,97	07,32	18,47	50,31
24	Buche	06	05,33	07,40	13,49	50,58
25	Eiche	04	03,75	05,33	14,91	50,00
26	Buche	05	24,00	13,00	22,94	44,30
27	Buche	08	27,00	11,40	14,74	47,69
29	Buche	03	26,33	11,50	24,19	46,64
Gesamt	Buche	212				
Gesamt	Eiche	734				
Gesamt	Total	946				

Tabelle 55: Übersicht der wichtigsten waldwachstumskundlichen Kenngrößen der am liegenden Baum aufgenommenen Totäste.

ERGEBNISSE DER ASTREINIGUNGSSIMULATIONEN

Buche Ir _{1,3} =3,5; SI10=8m; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 29 Jahre; Astansatzwinkel= 40°, Kronenansatzhöhe= 7,81m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	9,00	0	22,98	✓	4,80	10,00	✓	✗
1-2	10,00	0	24,60	✓	5,22	9,90	✓	✗
2-3	11,00	0	26,20	✓	5,62	9,83	✓	✗
3-4	12,50	0	28,70	✓	6,22	9,70	✓	✗
4-5	14,00	0	31,10	✓	6,83	9,54	✓	✗
5-6	15,50	0	32,00	✓	7,43	9,45	✓	✗
6-7	17,60	0	37,00	✓	8,29	9,33	✓	✗
7-8	20,00	1	39,20	✗	9,12	9,12	✗	✓
8-9	22,50	1	38,10	✗	9,83	9,02	✗	✓
9-10	30,50	1	36,40	✗	12,06	8,95	✗	✓
Eiche Ir _{1,3} =3,5; SI10=8m; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 29 Jahre; Astansatzwinkel= 40°, Kronenansatzhöhe= 10,74m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	6,00	0	28,55	✓	6,36	10,00	✓	✗
1-2	7,00	0	32,20	✓	7,23	9,87	✓	✗
2-3	7,00	0	32,10	✓	7,21	9,75	✓	✗
3-4	7,50	0	33,80	✓	7,64	9,62	✓	✗
4-5	8,00	0	35,60	✓	8,06	9,50	✓	✗
5-6	9,00	0	39,40	✓	8,93	9,41	✓	✗
6-7	9,00	0	39,30	✓	8,92	9,33	✓	✗
7-8	10,50	0	44,90	✓	10,23	9,25	✗	✓
8-9	11,50	0	48,70	✓	11,11	9,12	✗	✓
9-10	15,00	0	62,00	✗	14,18	8,95	✗	✓

Eiche $Ir_{1,3}=2,5$; $Sl_{10}=7m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 40 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 14,77m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	7,00	0	36,66	✓	6,94	9,91	✓	✗
1-2	7,00	0	35,89	✓	6,88	9,79	✓	✗
2-3	7,00	0	35,43	✓	6,83	9,70	✓	✗
3-4	7,00	0	34,97	✓	6,78	9,62	✓	✗
4-5	7,00	0	34,50	✓	6,73	9,54	✓	✗
5-6	7,00	0	34,20	✓	6,69	9,37	✓	✗
6-7	7,50	0	35,56	✓	7,08	9,20	✓	✗
7-8	8,30	0	37,08	✓	7,41	9,12	✓	✗
8-9	9,50	0	40,28	✓	8,28	9,00	✓	✗
9-10	10,00	0	43,48	✓	9,10	8,87	✗	✓
Buche $Ir_{1,3}=2,5$; $Sl_{10}=8m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 40 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 12,53m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	8,00	0	25,44	✓	3,48	10,00	✓	✗
1-2	8,50	0	26,86	✓	3,87	9,95	✓	✗
2-3	9,30	0	26,96	✓	3,87	9,83	✓	✗
3-4	10,00	0	28,43	✓	4,27	9,70	✓	✗
4-5	10,60	0	29,90	✓	4,66	9,58	✓	✗
5-6	11,50	0	30,71	✓	4,86	9,45	✓	✗
6-7	12,30	0	31,53	✓	5,06	9,30	✓	✗
7-8	13,00	0	33,66	✓	5,65	9,20	✓	✗
8-9	15,30	0	35,08	✓	6,04	9,08	✓	✗
9-10	17,50	0	39,24	✓	7,20	8,95	✓	✗

Eiche $I_{r_{1,3}}=2,5$; $SI_{10}=8m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter 1,3 bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 40 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 15,37m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	6,00	0	33,00	✓	6,10	10,00	✓	✗
1-2	6,00	0	32,56	✓	6,05	9,87	✓	✗
2-3	6,00	0	32,08	✓	6,00	9,75	✓	✗
3-4	6,00	0	31,62	✓	5,93	9,62	✓	✗
4-5	6,30	0	31,15	✓	5,90	9,50	✓	✗
5-6	6,60	0	34,50	✓	6,73	9,37	✓	✗
6-7	7,00	0	34,20	✓	6,68	9,29	✓	✗
7-8	7,50	0	35,56	✓	7,08	9,20	✓	✗
8-9	8,00	0	37,08	✓	7,47	9,12	✓	✗
9-10	9,00	0	40,13	✓	8,27	8,95	✓	✗
Buche $I_{r_{1,3}}=3,5$; $SI_{10}=7m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter 1,3 bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 29 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 6,74m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	11,00	0	30,61	✓	5,49	10,00	✓	✗
1-2	11,50	0	32,25	✓	5,90	9,85	✓	✗
2-3	13,30	0	34,00	✓	6,31	9,75	✓	✗
3-4	14,50	0	36,56	✓	6,92	9,62	✓	✗
4-5	16,00	0	39,02	✓	7,53	9,45	✓	✗
5-6	18,30	0	41,49	✓	8,13	9,30	✓	✗
6-7	21,00	0	44,77	✗	9,30	9,20	✗	✓
7-8	24,00	1	43,55	✗	9,90	9,08	✗	✓
8-9	27,50	1	41,11	✗	11,07	8,90	✗	✓
9-10	32,00	1	38,67	✗	12,24	8,79	✗	✓

Eiche $Ir_{1,3}=3,5$; $Sl_{10}=7m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 29 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 9,86m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	8,00	0	41,93	✓	8,73	9,95	✓	✗
1-2	8,00	0	41,73	✓	8,71	9,79	✓	✗
2-3	8,00	0	41,58	✓	8,69	9,66	✓	✗
3-4	8,50	0	43,36	✓	9,12	9,54	✓	✗
4-5	9,00	0	45,15	✓	9,54	9,41	✗	✓
5-6	10,50	0	48,91	✗	10,42	9,25	✗	✓
6-7	11,00	0	52,62	✗	11,28	9,20	✗	✓
7-8	11,50	0	54,45	✗	11,70	9,12	✗	✓
8-9	13,00	0	63,97	✗	13,91	9,00	✗	✓
9-10	17,00	1	69,61	✗	15,92	8,85	✗	✓
Buche $Ir_{1,3}=3,5$; $Sl_{10}=8m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 40 Jahre; Astansatzwinkel= 10°; Kronenansatzhöhe= 7,81m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast-durchmesser zum Mortalitätszeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel-Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)-Astung notwendig?
0-1	9,00	0	27,75	✓	4,71	10,00	✓	✗
1-2	10,00	0	29,39	✓	5,11	9,90	✓	✗
2-3	11,00	0	31,03	✓	5,52	9,83	✓	✗
3-4	12,50	0	33,49	✓	6,13	9,70	✓	✗
4-5	14,00	0	35,95	✓	6,73	9,54	✓	✗
5-6	15,50	0	38,41	✓	7,34	9,45	✓	✗
6-7	17,60	0	42,31	✓	8,34	9,33	✓	✗
7-8	20,00	1	44,05	✗	9,04	9,12	✓	✗
8-9	22,50	1	43,55	✗	9,75	9,02	✗	✓
9-10	30,50	1	41,11	✗	11,96	8,95	✗	✓

Eiche $I_{r_{1,3}}=3,5$; $SI_{10}=8m$; Zieldurchmesser: 60cm; Alter _{1,3} bei Erreichen der ein-Drittel-Grenze= 40 Jahre; Astansatzwinkel= 10°, Kronenansatzhöhe= 10,74m								
Astansatzhöhe [m]	Mittleres Maximales Astalter [Jahre]	Aststatus („0“=tot, „1“=lebend)	Mittlerer Ast- durchmesser zum Mortalitäts- zeitpunkt [mm]	Äste überwallt?	Mittlerer Radius asthaltiger Kern [cm]	Mittlerer Radius ein-Drittel- Grenze [cm]	Radius asthaltiger Kern < 1/3- Grenze?	(Trocken)- Astung notwendig?
0-1	6,00	0	34,25	✓	6,97	10,00	✓	✗
1-2	7,00	0	37,06	✓	7,84	9,87	✓	✗
2-3	7,00	0	37,81	✓	7,82	9,75	✓	✗
3-4	7,50	0	39,58	✓	8,25	9,62	✓	✗
4-5	8,00	0	41,38	✓	8,67	9,50	✓	✗
5-6	9,00	0	45,14	✓	9,54	9,41	✗	✓
6-7	9,00	0	46,92	✓	9,97	9,33	✗	✓
7-8	10,50	0	50,69	✓	10,84	9,25	✗	✓
8-9	11,50	0	54,45	✗	11,72	9,12	✗	✓
9-10	15,00	0	67,78	✗	14,79	8,95	✗	✓